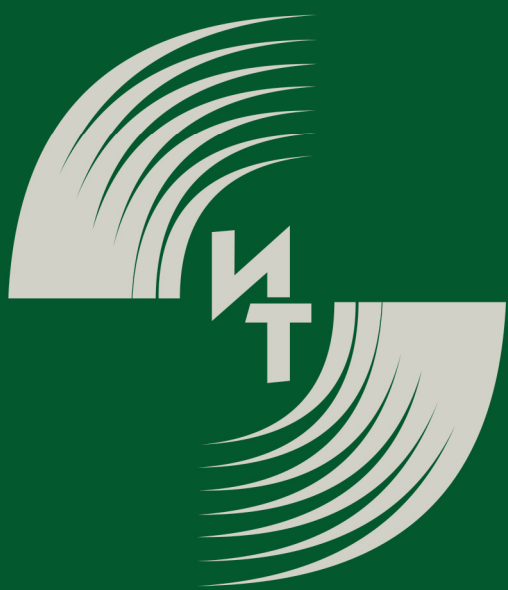




**ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА
2020
№8**



ВСЕМИРНЫЙ ДЕНЬ МЕТРОЛОГИИ

Измерения для глобальной торговли

РСТ

ВНИИМС



Bureau
International des
Poids et
Mesures



20 мая 2020
www.worldmetrologyday.org

© 2020 BIPM, OIML

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА 2020

№ 8 август

Ежемесячный
научно-технический
журнал

Основан в 1939 г.

Издаётся
с приложением
«Метрология»

УЧРЕДИТЕЛИ

Федеральное агентство
по техническому регулированию
и метрологии

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт метрологии
им. Д. И. Менделеева»

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт оптико-физических
измерений»

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт физико-технических и
радиотехнических измерений»

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт метрологической
службы»

ФГУП «Российский
научно-технический центр
информации по стандартизации,
метрологии и оценке соответствия»

Метрологическая академия

СОДЕРЖАНИЕ

ГОСУДАРСТВЕННЫЕ ЭТАЛОНЫ

- Г. Н. Вишняков, Г. Г. Левин, В. Л. Минаев. Государственный первичный эталон единиц эллипсометрических углов ГЭТ 186-2017..... 3*
- А. В. Оборин, А. Ю. Виллевадьде, С. Г. Трофимчук. Государственный первичный эталон единиц кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы, мощности экспозиционной дозы и потока энергии рентгеновского и гамма-излучений ГЭТ 8-2019 8*

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕТРОЛОГИИ

- С. Л. Чернышев, Л. К. Исаев, А. Д. Козлов. Периодическая система элементов Д. И. Менделеева: между прошлым и будущим..... 13*

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

- Б. Н. Марков, Д. А. Мастеренко, П. Н. Емельянов, В. И. Телешевский. Алгоритмизация вычисления фрактальных параметров рельефа шероховатой поверхности по ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014 20*

ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- А. А. Самойленко, А. Д. Иванов, Г. Г. Левин. Измерение эффективности детектирования однофотонных приёмников на основе спонтанного параметрического рассеяния и метода гетеродинамирования 28*
- С. Б. Бычков, И. В. Волков, А. И. Глазов, И. С. Королёв, К. Б. Савкин, Н. П. Хатырев. Метод измерения параметров быстродействия фотоприёмников 36*
- Е. Н. Савкова. Колориметрическое исследование самосветящихся объектов в программно-аппаратных средах методом реализации многомерных шкал 43*

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- А. И. Казьмин, П. А. Федюнин. Оценка точности реконструкции электрофизических и геометрических параметров многослойных диэлектрических покрытий многочастотным радиоволновым методом поверхностных медленных электромагнитных волн 51*

ИЗМЕРЕНИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

- В. П. Тенишев. Спектральные, дозиметрические и метрологические характеристики радиохромных радиационно-чувствительных композиций 59*

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ

- А. П. Чирков. Оценка влияния метрологии на экономику: новая методология 66*

Главный редактор
С. С. Голубев

Редакционная коллегия:

В. И. Белоцерковский
С. И. Донченко
И. В. Емельянова
(зам. гл. редактора)
Л. К. Исаев
А. Д. Козлов
Е. П. Кривцов
В. Н. Крутиков
А. Ю. Кузин
С. В. Медведевских
А. И. Механиков
В. В. Окрепилов
В. Н. Храменков
И. А. Шайко
В. В. Швыдун

Журнал переводится
на английский язык
под названием
«Measurement
Techniques»
издательством Springer
www.springer.com/11018

Корректор *М. В. Бучная*
Компьютерная вёрстка *С. А. Мамедова*

Сдано в набор: 22.07.2020.
Подписано в печать: 25.08.2020.
Формат 60х90 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. п.л. 9,0. Уч.-изд. л. 11,5. Тир. 250 экз. Зак. 20-660.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-21572
от 15.07.2005.

Адрес редакции: 119361 Москва, ул. Озёрная, 46,
ФГУП «ВНИИМС»
Тел.: +7 (495) 781-48-70
e-mail: izmt@vniims.ru
www.izmt.ru

Редакция не несёт ответственности за
содержание рекламных материалов. Точка зрения
редакции может не совпадать с мнением авторов.

ООО «Типография Миттель Пресс»
127254 Москва, ул. Руставели, 14, с. 6, оф. 14

© Измерительная техника, 2020

STATE STANDARDS

- G. N. Vishnyakov, G. G. Levin, V. L. Minaev.** State primary standard of ellipsometric angles GET 186-20173
- A. V. Oborin, A. Y. Villevalde, S. G. Trofimchuk.** National primary standard of air kerma, air kerma rate, exposure, exposure rate and energy flux for X-rays and gamma radiation GET 8-20198

FUNDAMENTAL PROBLEMS OF METROLOGY

- S. L. Chernyshev, L. K. Isaev, A. D. Kozlov.** The Periodic Table: between the Past and the Future13

GENERAL PROBLEMS OF METROLOGY AND MEASUREMENT TECHNIQUES

- B. N. Markov, D. A. Masterenko, P. N. Emelyanov, V. I. Teleshevskiy.** Algorithmization of calculation of fractal parameters of rough surface relief according to GOST R ISO 25178-2-201420

OPTICOPHYSICAL MEASUREMENTS

- A. A. Samoylenko, A. D. Ivanov, G. G. Levin.** Detection efficiency measurement of single-photon detectors based on spontaneous parametric scattering using the heterodyning method to increase accuracy28
- S. B. Bychkov, I. V. Volkov, A. I. Glazov, I. S. Korolev, K. B. Savkin, N. P. Khatyrev.** Method for measuring the speed parameters of photodetectors36
- Ya. N. Saukova.** Colorimetric research of self-luminous objects in software and hardware environments by the method of multidimensional scales implementation43

RADIO MEASUREMENTS

- A. I. Kaz'min, P. A. Fedjunin.** Evaluation of the accuracy of reconstruction of the electrophysical and geometric parameters of multilayer dielectric coatings by the multi-frequency radio wave method of a slow surface electromagnetic waves51

IONIZING RADIATION MEASUREMENTS

- V. P. Tenishev.** Spectral, dosimetric and metrological characteristics of radiation sensitive-radiochromic compositions59

ECONOMIC PROBLEMS OF METROLOGY

- A. P. Chirkov.** Assessment of the impact of metrology on the economy: new methodology 66

Государственный первичный эталон единиц эллипсометрических углов ГЭТ 186-2017

Г. Н. Вишняков, Г. Г. Левин, В. Л. Минаев

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений,
Москва, Российская Федерация, e-mail: vish@vniiofi.ru,
levin@vniiofi.ru, minaev@vniiofi.ru

Описаны состав, принцип работы и основные метрологические характеристики Государственного первичного эталона единиц эллипсометрических углов ГЭТ 186-2017, обеспечивающего измерение двумерного пространственного распределения эллипсометрических углов. В состав ГЭТ 186-2017 включены спектральный эллипсометр, оснащённый двухкоординатным столом для измерений на сетке 10×10 точек, и интерференционный профилометр, с помощью которого измеряется двумерная карта отклонений от 90° нормалей к поверхности объекта. В точках сканирования, где отклонение нормали превышает $0,01^\circ$, измерения не производятся. Измерение двумерного пространственного распределения эллипсометрических углов позволяет восстанавливать пространственные распределения толщины и комплексного показателя преломления покрытий по площади исследуемого изделия. ГЭТ 186-2017 обеспечивает единство измерений в приоритетных направлениях науки и техники, таких как микроэлектроника, оптика, приборостроение.

Основными потребителями ГЭТ 186-2017 являются организации, занимающиеся разработкой новых изделий микроэлектроники, солнечных батарей, оптики, в частности лазерных гироскопов. В состав таких изделий входят нанесённые на подложки упорядоченные многослойные структуры, толщину которых контролируют с помощью различных типов эллипсометров, в том числе эллипсометров изображений.

Ключевые слова: талон, поверочная схема, эллипсометрия, эллипсометрические углы дельта Δ и пси ψ , эллипсометр изображений.

Введение. История возникновения метода оптической эллипсометрии восходит к работам Друде, Малюса, Брюстера, Релея и других основоположников физической оптики XIX в. В их работах описано применение отражения поляризованного света в основном для измерения оптических констант металлов. Вплоть до середины прошлого столетия метод оставался мало востребованным. Толчок в развитии эллипсометрии был связан с потребностями развивающейся полупроводниковой микроэлектроники: необходимо было разработать простой, доступный и надёжный метод прецизионного контроля толщины диэлектрических слоев полупроводниковых структур. Эллипсометрия удовлетворяла этому требованию. Оказалось, что возможности, заложенные в физических принципах метода, гораздо шире и позволяют не только измерять толщины слоёв, но и характеризовать их физико-химические свойства, а также исследовать достаточно тонкие процессы на поверхности. Метод развивался в нескольких взаимосвязанных направлениях. Прежде всего, это разработка аппаратного обеспечения метода: создание эллипсометров широкого спектрального диапазона, быстродействующих эллипсометров пространственно-временного разрешения, а также приборов с узкофункциональными возможностями. Параллельно развивались методические основы, велась разработка моделей

для интерпретации эллипсометрических измерений, создавались алгоритмы и методы численного решения эллипсометрических задач. Это, в свою очередь, привело к распространению метода эллипсометрии из микроэлектроники в другие области знаний: физику твёрдого тела, физику поверхности, материаловедение, технологию оптических покрытий, химию полимеров и электрохимию, биологию, медицину и др. Существующие на сегодняшний день модели эллипсометрической аппаратуры (эллипсометры) позволяют рассчитать коэффициенты отражения многослойных и неоднородных по толщине структур, гетерогенных слоёв, состоящих из смеси нескольких компонентов, описать отражение от шероховатых поверхностей и островковых плёнок. В результате такого комплексного подхода удаётся проводить неразрушающий оперативный контроль достаточно сложных микро- и наноструктур [1–5].

В эллипсометрии измеряемыми параметрами являются эллипсометрические углы (ЭУ) дельта Δ и пси ψ . Из основного уравнения эллипсометрии [6, 7] следует, что угол дельта Δ – разность фаз между двумя ортогональными составляющими вектора напряжённости электрического поля световой волны (p - и s -компонентами), отражённой или прошедшей через исследуемый объект. Отношение амплитуд p - и s -компонент вектора напряжённости электрического поля световой волны

даёт информацию о втором ЭУ ψ . Зная ЭУ, по специальным моделям и программам можно вычислить толщину и комплексный показатель преломления плёнок.

Таким образом, основные задачи эллипсометрического метода заключаются в высокоточном измерении эллипсометрических углов, а также в создании правильной модели исследуемой структуры с целью определения толщины слоёв, из которых состоит исследуемый объект, и их комплексного показателя преломления.

В Российской Федерации основным разработчиком эллипсометров является лаборатория эллипсометрии полупроводниковых материалов и структур Института физики полупроводников СО РАН (г. Новосибирск), которая выпустила широко известные в стране лазерные эллипсометры ЛЭФ-2 и ЛЭФ-3. Разработанный этим же институтом спектральный эллипсометр «Эллипс-1991» входит в состав Государственного первичного эталона единиц эллипсометрических углов ГЭТ 186-2017.

За рубежом производством эллипсометров занимаются несколько крупных компаний, таких как SENTECH Instruments, Nanofilm, Gaertner, J.A.Woollam Co., Jobin Yvon и др. Они производят эллипсометрическую аппаратуру для научных исследований и специализированные эллипсометры для контроля производственных циклов. Многие из этих фирм поставляют в Российскую Федерацию эллипсометрическую аппаратуру, однако не все приборы проходят государственные испытания с целью утверждения типа средства измерений. В настоящее время в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений внесено 11 типов эллипсометрических приборов.

Для обеспечения единства измерений в области эллипсометрии в 2010 г. во ВНИИОФИ введён в действие Государственный первичный эталон единиц эллипсометрических углов ГЭТ 186-2010, а затем разработан ГОСТ 8.605-2011 «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений

эллипсометрических углов». С помощью ГЭТ 186-2010 можно было обеспечить единство измерений ЭУ лишь в одной точке.

Необходимость модернизации ГЭТ 186-2010 возникла в связи с возрастающей потребностью в измерениях не просто ЭУ, а их пространственного распределения $\Delta(x, y)$, $\psi(x, y)$, что является актуальной задачей. По пространственному распределению $\Delta(x, y)$, $\psi(x, y)$ и модели исследуемого изделия можно восстановить пространственные распределения толщины и комплексного показателя преломления покрытий. Пространственное распределение ЭУ, отображённое в виде двумерной карты полутонов или цветов, можно рассматривать как изображение. Поэтому новый класс эллипсометров, специально предназначенных для измерения пространственного распределения ЭУ, получил название эллипсометров изображений. К ним относится, например, эллипсометр Imaging Ellipsometer nanofilm_er4 фирмы Accurion GmbH (Германия).

Области применения эллипсометров изображений приведены в обзорной статье [8]. Отдельно надо отметить работу [9], в которой описано применение эллипсометра изображений для изучения популярного в настоящее время графена на металлической подложке. В [10] приведена методика калибровки эллипсометра изображений, а в [11] предложено совместить эллипсометр изображений с микроскопом на эффекте плазмонного резонанса.

В настоящее время классические эллипсометры также оснащаются двухкоординатными предметными столами и микронасадками для обеспечения возможности сканирования изделия относительно падающего луча и измерения пространственного распределения ЭУ. К ним относится, например, эллипсометр RC2 фирмы J.A.Woollam Co., Inc. (США).

В результате проведённых работ по совершенствованию ГЭТ 186-2010 утверждён Государственный первичный эталон единиц эллипсометрических углов ГЭТ 186-2017, предназначенный для воспроизведения, хранения и передачи единиц

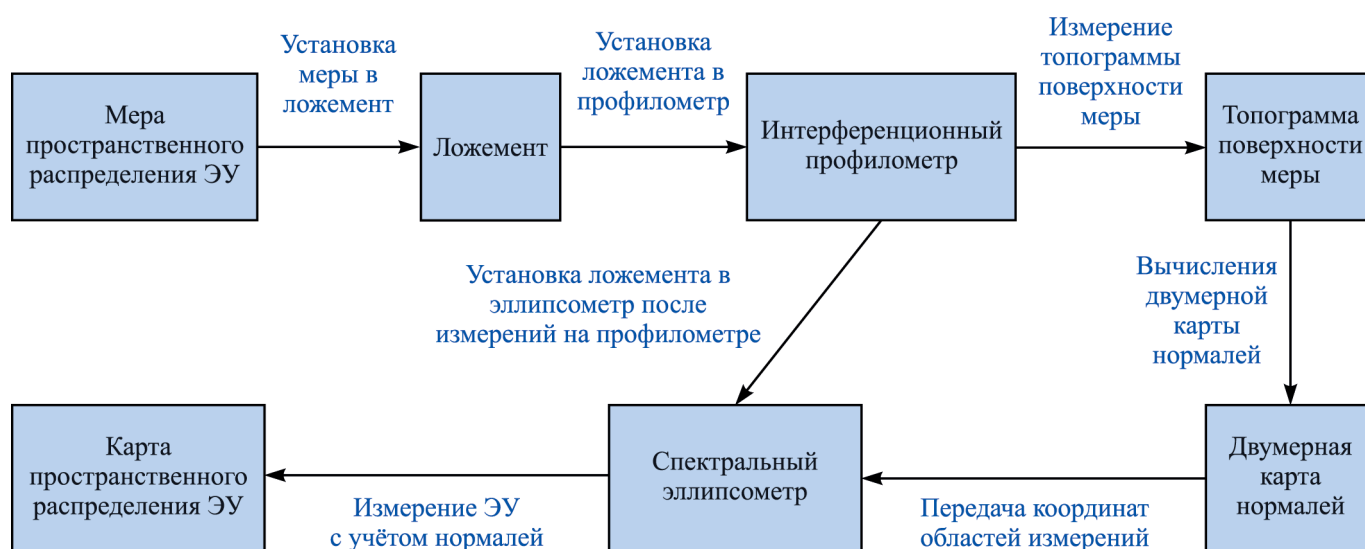


Рис. 1. Последовательность операций при создании карты пространственного распределения эллипсометрических углов (ЭУ)

Fig. 1. Sequence of operations for creating a map of spatial distribution of ellipsometric angles (EA)

пространственного распределения ЭУ дельта $\Delta(x, y)$ и пси $\psi(x, y)$ в декартовой системе координат (x, y) .

Состав ГЭТ 186-2017. Для измерения пространственного распределения ЭУ в состав ГЭТ 186-2017 введена эталонная установка на базе отечественного «Спектрального эллипсометрического комплекса «Эллипс-1991» с двухкоординатной системой позиционирования меры. Материальными носителями пространственного распределения единиц ЭУ дельта $\Delta(x, y)$ и пси $\psi(x, y)$ служат меры в виде кремниевых пластинок с прозрачной плёнкой из двуокиси кремния различной толщины.

Двухкоординатная система позиционирования эталонной меры состоит из двух соединённых под углом 90° моторизованных линейных трансляторов модели 8MT30–50–ME1 фирмы Standa. Область сканирования (размер поля зрения) составляет 30×30 мм². Так как размер светового пятна на объекте в эллипсометре достаточно большой (около 3 мм вдоль большей оси), то шаг сканирования выбран 3 мм, а сетка сканирования составлена из 10×10 точек.

Систему позиционирования калибровали с помощью лазерной измерительной системы XL–80 фирмы Renishaw plc (Госреестр СИ № 35362-13). Предел допускаемой абсолютной погрешности измерений координат (x, y) при воспроизведении единиц пространственного распределения ЭУ дельта $\Delta(x, y)$ и пси $\psi(x, y)$ составил 100 мкм.

Для высокоточного воспроизведения ЭУ по пространству необходимо учитывать угловое положение нормали к поверхности меры ЭУ. Это связано с тем, что для расчёта ЭУ необходимо знать угол падения излучения на измеряемый объект. Обычно этот угол выбирают близким по значению к углу Брюстера для двуокиси кремния. Для большинства эллипсометров угол падения равен 70° , погрешность установки которого не должна превышать $0,01^\circ$. Поэтому если отклонение нормали к объекту в точке сканирования превышает это значение, то увеличивается погрешность измерений ЭУ. Следовательно, в таких точках или нельзя проводить измерения, или надо юстировать рабочий стол эллипсометра по углу до тех пор, пока отклонение вектора нормали от вертикального положения в данной точке сканирования станет меньше $0,01^\circ$.

Угловое положение нормали определяется градиентом профиля поверхности (топограммы) меры в измеряемой точке. Для измерения топограммы поверхности и дальнейшего определения угла отклонения нормали от вертикального положения в состав ГЭТ 186-2017 введён автоматизированный интерференционный профилометр ПИК-30, разработанный во ВНИИОФИ [12].

Меры ЭУ закрепляют в специальном ложементе с координатной привязкой, в нижнюю поверхность которого вмонтированы три закалённых стальных шарика. Этот ложемент устанавливается в три паза предметного столика профилометра. Аналогичные пазы сделаны также в столике двухкоординатной системы позиционирования меры эллипсометра.

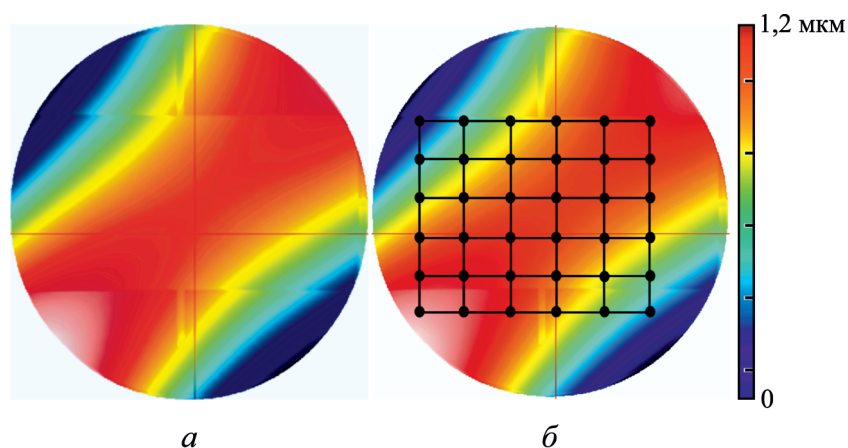


Рис. 2. Топограмма поверхности меры пространственного распределения эллипсометрических углов $\Delta(x, y)$ и $\psi(x, y)$ (а) и расположение на ней точек определения углов нормалей (б). Цветом обозначена различная высота в диапазоне 0–1,2 мкм. Поле зрения 25×25 мм

Fig. 2. The surface of the standard of the spatial distribution of ellipsometric angles $\Delta(x, y)$ and $\psi(x, y)$ (a) and the points for determining the angles of the surface normals (b). The color indicates different heights in the range of 0–1.2 μm . Field of view 25×25 mm

Таблица 1

Значение отклонений, $^\circ$, углов нормалей от 90°

y, мм	x, мм					
	–7,5	–4,5	–1,5	1,5	4,5	7,5
–7,5	0,0308	0,0173	0,0144	0,0111	0,0084	0,0230
–4,5	0,0158	0,0127	0,0100	0,0067	0,0052	0,0045
–1,5	0,0126	0,0092	0,0063	0,0032	0,0052	0,0071
1,5	0,0120	0,0058	0,0028	0,0021	0,0073	0,0138
4,5	0,0076	0,0029	0,0013	0,0046	0,0100	0,0128
7,5	0,0058	0,0017	0,0039	0,0077	0,0120	0,0152

Таблица 2

Пространственное распределение ЭУ пси $\psi(x, y)$, $^\circ$

y, мм	x, мм					
	–7,5	–4,5	–1,5	1,5	4,5	7,5
–7,5	x	x	x	x	7,963 0,001	x
–4,5	x	x	x	29,075 0,001	29,031 0,001	27,166 0,001
–1,5	x	29,249 0,001	29,274 0,001	29,284 0,001	29,278 0,001	27,395 0,001
1,5	x	29,125 0,001	29,149 0,001	29,178; 0,002	29,188 0,001	x
4,5	27,746 0,001	28,038 0,001	28,286 0,002	28,365 0,002	28,433 0,001	x
7,5	10,216 0,001	10,002 0,001	9,911 0,001	10,173 0,001	x	x

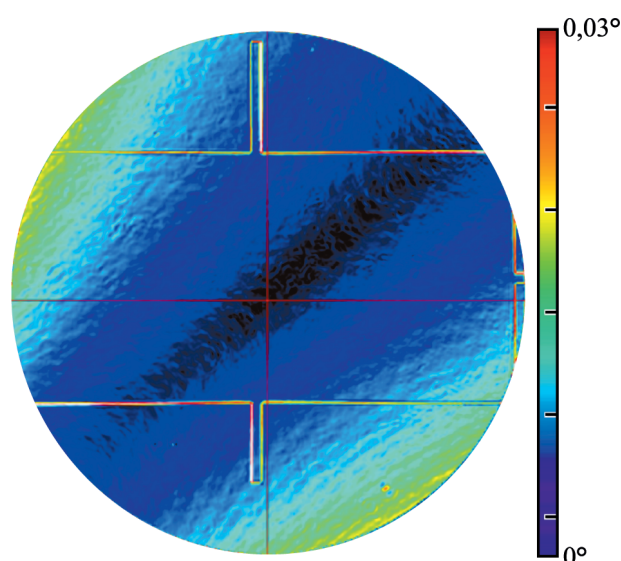


Рис. 3. Двумерная карта отклонений нормалей к поверхности меры от 90°. Цветом обозначены углы отклонения в диапазоне 0–0,03°. Поле зрения 25×25 мм

Fig. 3. 2D-map of deviations of surface normals from 90°. The color indicates the angles of deviation in the range of 0–0.03°. Field of view 25×25 mm

Таблица 3

Пространственное распределение ЭУ дельта $\Delta(x, y)$, °

y, мм	x, мм					
	–7,5	–4,5	–1,5	1,5	4,5	7,5
–7,5	x	x	x	x	172,109 0,007	x
–4,5	x	x	x	275,625 0,002	275,662 0,002	274,240 0,002
–1,5	x	275,621 0,003	275,659 0,003	275,672 0,002	275,677 0,003	274,273 0,003
1,5	x	275,491 0,002	275,514 0,002	275,547 0,002	275,569 0,003	x
4,5	272,169 0,003	272,746 0,002	273,386 0,010	273,576 0,002	273,794 0,002	x
7,5	178,531 0,005	186,586 0,006	192,881 0,009	190,582 0,004	x	x

Такая конструкция ложемента и столиков позволяет осуществлять точную координатную привязку при переносе меры с профилометра на эллипсомер.

Результаты экспериментальных исследований. Последовательность операций для получения карты пространственного распределения ЭУ изображена на рис. 1.

После установки меры в специальный ложемент с помощью интерференционного профилометра измеряется топограмма её поверхности, которая приведена на рис. 2, а. Эта программа реализует метод фазовых шагов для расшифровки интерферограмм [13].

Рабочая зона меры представляет собой прямоугольник, который виден на топограмме и профиле её поверхности вдоль вертикальной прямой (см. рис. 2, а). По измеренным данным о геометрии поверхности расчётным способом формируется карта отклонений нормалей от 90°, приведённая на рис. 3 в виде псевдоцветного изображения. Чёрным цветом показаны области, в которых отклонение близко к нулю. Также видны края рабочей зоны меры.

При визуализации количество точек было сокращено до 36 (см. рис. 2, б) и табл. 1, где голубым цветом показаны точки, в которых отклонение нормалей превышало 0,01°. В этих точках ЭУ не измеряли. В остальных точках были измерены ЭУ пси и дельта, результаты измерения приведены в табл. 2, 3. В точках вне рабочей зоны меры значения сильно отличаются от номинальных.

В ходе исследований подтверждены технические и метрологические характеристики ГЭТ 186-2017.

Метрологические характеристики ГЭТ 186-2017

Пространственный диапазон измерения эллипсометрических параметров (диаметр поля зрения).....	30 мм
Диапазон измерений топограммы	
высот профиля поверхности.....	0,006–20,000 мкм
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерения топограммы высот профиля поверхности.....	0,006 мкм
Погрешность задания координаты.....	100 мкм
Диапазон значений ЭУ:	
дельта Δ	0–360°
пси ψ	0–90°
Расширенная неопределённость воспроизведения единиц ЭУ ($k=2$, $P=0,95$):	
дельта $\Delta U_p(\Delta)$	0,08°
пси $U_p(\psi)$	0,06°

Заключение. Введение в действие ГЭТ 186-2017 позволило на более высоком метрологическом уровне обеспечить решение задач тонкоплёночных технологий. Так, в частности, контроль толщины покрытий кремниевых пластин при создании изделий микроэлектроники позволил уменьшить процент брака микросхем и микропроцессоров. Измерение параметров многослойных покрытий зеркал для лазерных гироскопов с высоким коэффициентом отражения ведёт к повышению точности навигационных измерений летательных аппаратов.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП высокоточных измерительных технологий в области фотоники (skr.vniiofi.ru), созданного на базе ФГУП «ВНИИОФИ» и поддержанного Минобрнауки России в рамках выполнения соглашения № 05.595.21.0005 (уникальный идентификатор RFMEFI59519X0005).

Список литературы

1. Ohlídal I., Vohánka J., Buršíková V., Franta D., and Čermák M., *Opt. Express*, 2020, vol. 28, no. 1, pp. 160–174. <https://doi.org/10.1364/OE.28.000160>
2. Nazarov A., Ney M, and Abdulhalim I., *Opt. Express*, 2020, vol. 28, no. 7, pp. 9288–9309. <https://doi.org/10.1364/OE.28.009288>

3. Dembele V., Jin M., Choi I., Chegal W., and Kim D., *Opt. Express*, 2018, vol. 26, no 2, pp. 1333–1341. <https://doi.org/10.1364/OE.26.001333>
4. Азам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. Пер. с англ. М.: Мир, 1981. 584 с.
5. Ржанов А. В., Свиташев К. К., Семенов А. И., Семенов Л. В., Соколов В. К. Основы эллипсометрии. Н.: Наука, 1978. 424 с.
6. Nestler P., Helm C. A., *Opt. Express*, 2017, vol. 25, no. 22, pp. 27077–27085. <https://doi.org/10.1364/OE.25.027077>
7. Yun Y. H., Joo K.-N., *Opt. Express*, 2018, vol. 26, no. 26, pp. 34396–34411. <https://doi.org/10.1364/OE.26.034396>
8. Asinowski L., Beaglehole D., Clarkson M. T., *Physica status solidi (a)*, 2008, vol. 205, no. 4, pp. 764–771. <https://doi.org/10.1002/pssa.200777855>
9. Li G., Gu L., Hu J., Zhu L., Zeng A., and Huang H., *Chin. Opt. Lett.*, 2019, vol. 17, no. 1, pp. 011201.
10. Jin L., Iizuka Y., Iwao T., Kondoh E., Uehara M., and Geloz B., *Appl. Opt.*, 2019, vol. 58, no. 33, pp. 9224–9229. <https://doi.org/10.1364/AO.58.009224>
11. Shan Y., Hu G., Gu L., He H., Zeng A., Zhao Y., and Sytchkova A., *Appl. Opt.*, 2017, vol. 56, no. 28, pp. 7898–7904. <https://doi.org/10.1364/AO.56.007898>
12. Вишняков Г. Н., Левин Г. Г., Минаев В. Л., Целмина И. Ю. Интерферометр фазового сдвига для контроля плоских и сферических оптических деталей // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 5. С. 76–82.
13. Vishnyakov G., Levin G., Minaev V., Nekrasov N., *Appl. Opt.*, 2015, vol. 54, no 15, pp. 4797–4804. <https://doi.org/10.1364/AO.54.004797>

References

1. Ohlídal I., Vohánka J., Buršíková V., Franta D., and Čermák M., *Opt. Express*, 2020, vol. 28, no. 1, pp. 160–174. <https://doi.org/10.1364/OE.28.000160>

2. Nazarov A., Ney M, and Abdulhalim I., *Opt. Express*, 2020, vol. 28, no. 7, pp. 9288–9309. <https://doi.org/10.1364/OE.28.009288>
3. Dembele V., Jin M., Choi I., Chegal W., and Kim D., *Opt. Express*, 2018, vol. 26, no 2, pp. 1333–1341. <https://doi.org/10.1364/OE.26.001333>
4. R. M. A. Azzam and N. M. Bashara, *Ellipsometry and Polarized Light*, North-Holland, New York, 1979.
5. Rjanov A.V., Svitashov K. K., Semenenko A. I., Semenenko L. V., Sokolov V. K., *Osnovy ellipsometrii*, Novosibirsk, Nauka Publ., 1978. 424 p. (in Russian).
6. Nestler P., Helm C. A., *Opt. Express*, 2017, vol. 25, no. 22, pp. 27077–27085. <https://doi.org/10.1364/OE.25.027077>
7. Yun Y. H., Joo K.-N., *Opt. Express*, 2018, vol. 26, no. 26, pp. 34396–34411. <https://doi.org/10.1364/OE.26.034396>
8. Asinowski L., Beaglehole D., Clarkson M. T., *Physica status solidi (a)*, 2008, vol. 205, no. 4, pp. 764–771. <https://doi.org/10.1002/pssa.200777855>
9. Li G., Gu L., Hu J., Zhu L., Zeng A., and Huang H., *Chin. Opt. Lett.*, 2019, vol. 17, no. 1, pp. 011201.
10. Jin L., Iizuka Y., Iwao T., Kondoh E., Uehara M., and Geloz B., *Appl. Opt.*, 2019, vol. 58, no. 33, pp. 9224–9229. <https://doi.org/10.1364/AO.58.009224>
11. Shan Y., Hu G., Gu L., He H., Zeng A., Zhao Y., and Sytchkova A., *Appl. Opt.*, 2017, vol. 56, no. 28, pp. 7898–7904. <https://doi.org/10.1364/AO.56.007898>
12. Vishnyakov G. N., Levin G. G., Minaev V. L., and Tselmina I. Y., *J. Opt. Technol.*, 2013, vol. 80, no 5, pp. 316–320. <https://doi.org/10.1364/JOT.80.000316>
13. Vishnyakov G., Levin G., Minaev V., Nekrasov N., *Appl. Opt.*, 2015, vol. 54, no 15, pp. 4797–4804. <https://doi.org/10.1364/AO.54.004797>

Дата поступления: 24.04.2020.

Дата принятия: 07.05.2020.

State primary standard of ellipsometric angles GET 186-2017

Gennady N. Vishnyakov, Gennady G. Levin, Vladimir L. Minaev

All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements, Moscow, Russia,
e-mail: vish@vniiofi.ru, levin@vniiofi.ru, minaev@vniiofi.ru

Paper describes the structure, principle of work and metrological characteristics of the State primary standard of ellipsometric angles units GET 186-2017, which provides measurement of the two-dimensional spatial distribution of ellipsometric angles. The GET 186-2017 includes a spectral ellipsometer equipped with a two-coordinate table for measurements on a grid of 10×10 points, and an interference profilometer which measures a two-dimensional map of deviations from 90° normal to the surface of the object. At scan points where the normal deviation exceeds 0.01° there are no measurements. Measurement of the two-dimensional spatial distribution of ellipsometric angles allows restoring the spatial distribution of the thickness and complex refractive index of coatings over the area. GET 186-2017 ensures the uniformity of measurements in priority areas of science and technology, such as microelectronics, optics, instrument making.

The main consumers of GET 186-2017 are organizations involved in the development of new products of microelectronics, solar cells, optics, in particular laser gyroscopes. Such products includes ordered multilayer structures deposited on substrates, which are controlled using various types of ellipsometers, including image ellipsometers.

Key words: the standard, the verification schedule, ellipsometry, ellipsometric angles ψ and Δ , imaging ellipsometer.

Государственный первичный эталон единиц кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы, мощности экспозиционной дозы и потока энергии рентгеновского и гамма-излучений ГЭТ 8-2019

А. В. Оборин, А. Ю. Виллевальде, С. Г. Трофимчук

Всероссийский научно-исследовательский институт им. Д. И. Менделеева,
Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: oav@vniim.ru,
vay@vniim.ru, tsg@vniim.ru

Описаны результаты работ по совершенствованию Государственного первичного эталона единиц кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы, мощности экспозиционной дозы и потока энергии рентгеновского и гамма-излучений ГЭТ 8-2011. Работы выполнены в 2019 г. в целях реализации рекомендаций отчёта № 90 Международной комиссии по радиационным единицам и измерениям «Ключевые данные для дозиметрии ионизирующих излучений: эталоны и применение». В уравнения воспроизведения единиц величин на ГЭТ 8-2019 внесены следующие изменения: в области рентгеновского излучения введены новые поправочные коэффициенты свободно-воздушных ионизационных камер и изменено значение относительной стандартной неопределённости средней энергии ионообразования, в области гамма-излучения изменены значения произведения средней энергии ионообразования на отношение массовых тормозных способностей графита к воздуху при измерениях с полостными ионизационными камерами. Уточнены воспроизводимые ГЭТ 8-2019 значения единиц величин.

Ключевые слова: эталон, рентгеновское излучение, гамма-излучение, керма в воздухе, экспозиционная доза, свободно-воздушная ионизационная камера, полостная ионизационная камера.

Ионизирующие излучения, в том числе гамма-излучение и рентгеновское, находят широкое применение во многих отраслях российской экономики. Измерения дозиметрических величин, характеризующих поля ионизирующих излучений и меру их влияния на человека, являются одними из самых массовых измерений в области метрологии ионизирующих излучений. Дозиметрия повсеместно используется в радиационной диагностике и терапии, радиационной защите и при промышленном применении излучения.

Государственный первичный эталон единиц кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы, мощности экспозиционной дозы и потока энергии рентгеновского и гамма-излучений составляет основу метрологического обеспечения дозиметрических измерений в Российской Федерации. Более чем за восьмидесятилетний период существования эталон неоднократно совершенствовался и модернизировался, результаты модернизации 2007–2011 гг. представлены в [1].

Предпосылкой для очередного усовершенствования Государственного первичного эталона единиц кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы, мощности экспозиционной дозы и потока энергии рентгеновского и гамма-излучений ГЭТ 8-2011 стало внедрение

в отечественную практику эталонных дозиметрических измерений данных и рекомендаций Отчёта № 90 Международной комиссии по радиационным единицам и измерениям (МКРЕ) [2]. Работы по совершенствованию ГЭТ 8-2011 выполнены во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева в период с января по сентябрь 2019 г. Государственный первичный эталон единиц кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы, мощности экспозиционной дозы и потока энергии рентгеновского и гамма-излучений ГЭТ 8-2019 утверждён Приказом Росстандарта № 3386 от 27 декабря 2019 г.

Влияние Отчёта № 90 МКРЕ на эталонные дозиметрические измерения. Основными методами эталонных измерений в дозиметрии ионизирующих излучений традиционно являются ионизационный, основанный на применении свободно-воздушных и полостных ионизационных камер, и калориметрический, предполагающий использование различных калориметров. Современная реализация указанных методов измерений предполагает использование численных методов моделирования взаимодействия излучения с материалами, входящими в конструкцию эталонного измерительного преобразователя. При этом для получения корректных результатов измерений и вычислений необходимо

знание базовых величин или ключевых данных, описывающих взаимодействие излучения с веществом: фотонных сечений взаимодействия, тормозных способностей, средней энергии ионизации в различных веществах и др. Анализ и систематизация полученных данных, а также разработка рекомендаций по их использованию являются задачами МКРЕ с момента её создания в 1925 г.

В октябре 2016 г. МКРЕ опубликовала Отчёт № 90 «Ключевые данные для дозиметрии ионизирующих излучений: эталоны и применение» [2]. Отчёт № 90 МКРЕ содержит полученные в результате современных исследований новые значения ключевых данных, влияющих на результаты воспроизведения единиц дозиметрических величин первичными эталонами. Для анализа этого влияния Консультативным комитетом по ионизирующим излучениям Международного бюро мер и весов была создана специальная рабочая группа [3]. В основном сведения из Отчёта № 90 МКРЕ касаются воспроизведения кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы и мощности экспозиционной дозы рентгеновского излучения с помощью свободно-воздушных эталонных ионизационных камер и гамма-излучения с помощью графитовых полостных эталонных ионизационных камер. Рекомендации Отчёта № 90 МКРЕ направлены на уточнение воспроизводимых значений единиц величин, а также на изменение их неопределённостей.

По состоянию на 2019 г. большинство национальных метрологических институтов заявили о принятии Отчёта № 90 МКРЕ и использовании новых ключевых данных при воспроизведении и передаче единиц величин.

Состав ГЭТ 8-2019. В состав ГЭТ 8-2019 входят следующие установки:

УЭД 5-50М и УЭД 50-320 со свободно-воздушными ионизационными камерами для воспроизведения единиц кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы и мощности экспозиционной дозы рентгеновского излучения при напряжении генерирования соответственно 5–50 кВ и 50–320 кВ;

ПИКЭ-1 с набором полостных ионизационных камер из графита для воспроизведения единиц кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы и мощности экспозиционной дозы гамма-излучения с энергией фотонов 0,2–3 МэВ;

УЭК-1 с калориметрами для воспроизведения единицы потока энергии рентгеновского излучения при напряжениях генерирования 5–200 кВ.

Также в состав ГЭТ 8-2019 входят: набор источников гамма-излучения переменного состава ИГИ; компаратор КПК-1 (набор полостных ионизационных камер объёмом 0,02–10000 см³) для передачи единиц от первичного эталона вторичным и рабочим эталонам; спектрометр на основе полупроводникового детектора GLP-06165/05P5 для определения энергетического распределения рентгеновского излучения.

Использование ключевых данных и рекомендаций Отчёта № 90 МКРЕ в ГЭТ 8-2019. Работа установок УЭД 5-50М,

УЭД 50-320 и ПИКЭ-1 основана на ионизационном методе, поэтому ключевые данные и рекомендации Отчёта № 90 МКРЕ оказывают непосредственное влияние на характеристики ГЭТ 8-2019 при воспроизведении единиц кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы и мощности экспозиционной дозы на этих установках.

Отчёт № 90 МКРЕ не затрагивает вопросы воспроизведения единицы потока энергии рентгеновского излучения калориметрическим методом, поэтому ключевые данные и рекомендации Отчёта № 90 МКРЕ не повлияли на метрологические характеристики эталонной установки УЭК-1.

В установках УЭД 5-50М и УЭД 50-320 в качестве эталонных измерительных преобразователей для воспроизведения единиц кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы и мощности экспозиционной дозы используются свободно-воздушные ионизационные камеры. Воспроизведение единиц величин осуществляется в соответствии со следующими уравнениями:

$$K = \frac{Q}{m} \frac{W_{air}}{e} \frac{1}{1 - g_{air}} k_a k_{sc} k_e k_d k_s k_{ap} k_p k_g k_{CPE} k_{ij} k_w k_h;$$

$$\dot{K} = \frac{I}{m} \frac{W_{air}}{e} \frac{1}{1 - g_{air}} k_a k_{sc} k_e k_d k_s k_{ap} k_p k_g k_{CPE} k_{ij} k_w k_h;$$

$$X = \frac{Q}{m} k_a k_{sc} k_e k_d k_s k_{ap} k_p k_g k_{CPE} k_h;$$

$$\dot{X} = \frac{I}{m} k_a k_{sc} k_e k_d k_s k_{ap} k_p k_g k_{CPE} k_h,$$

где $K, \dot{K}$ – керма и мощность кермы в воздухе соответственно; $X, \dot{X}$ – экспозиционная доза и мощность экспозиционной дозы соответственно; Q – заряд, собранный в ионизационной камере за время измерения; I – сила ионизационного тока в ионизационной камере; m – масса воздуха в измерительном объёме ионизационной камеры; W_{air}/e – средняя энергия, затрачиваемая на образование пары ионов в воздухе (средняя энергия ионизации); g_{air} – доля энергии электронов, идущая на тормозное излучение; k_a – поправочный коэффициент, учитывающий ослабление излучения в воздухе камеры; k_{sc} – поправочный коэффициент, учитывающий рассеяние излучения и флуоресценцию фотонов; k_{ap} – поправочный коэффициент, учитывающий неполное использование ионизирующей способности электронов (потери электронов); k_d – поправочный коэффициент, учитывающий искажение электрического поля в камере; k_s – поправочный коэффициент, учитывающий рекомбинацию ионов; k_{ap} – поправочный коэффициент, учитывающий влияние диафрагмы камеры; k_p – поправочный коэффициент, учитывающий проникновение излучения через стенки камеры; k_g – поправочный коэффициент, учитывающий реальную геометрию пучка излучения; k_{CPE} – поправочный коэффициент, учитывающий недостаток электронного равновесия в камере; k_{ij} – поправочный коэффициент, учитывающий начальную ионизацию; k_w – поправочный коэффициент, учитывающий зависимость средней энергии ионизации от энергии;

k_h – поправочный коэффициент, учитывающий влияние влажности воздуха.

Поправочные коэффициенты k_a , k_s , k_p определяли экспериментально, а поправочные коэффициенты k_{sc} , k_e , k_d , k_{ap} , k_g , k_{CPE} , k_h рассчитывали методами численного моделирования [4–6].

При воспроизведении единиц кермы в воздухе и мощности кермы в воздухе на установках УЭД 5-50М и УЭД 50-320 ключевые данные и рекомендации Отчёта № 90 МКРЕ учтены посредством следующих нововведений:

относительная стандартная неопределённость средней энергии ионизации $W_{air}/e=33,97$ Дж/Кл увеличена с 0,15 до 0,35 %;

в уравнения измерений кермы в воздухе и мощности кермы в воздухе введены два новых поправочных коэффициента: k_{ij} , k_w .

Значение W_{air}/e , определяется для воздействующих заряженных частиц и учитывает заряд, порождённый этими частицами, когда они замедляются до состояния покоя. В то же время в W_{air}/e не учитывается заряд изначально заряженной частицы (в случае фотонного излучения – заряд, порождённый начальным событием ионизации), тогда как он тоже собирается эталонной измерительной системой. Таким образом, поправочный коэффициент k_{ij} вводится для учёта избыточного заряда и правильной оценки энергии, поглощённой веществом. Поскольку при проведении измерений со свободно-воздушными камерами рекомендуется использовать постоянное значение W_{air}/e , то чтобы учесть увеличение W_{air}/e под влиянием неионизирующих процессов при энергии воздействующего излучения меньше 10 кэВ, вводится поправочный коэффициент k_w . По своей природе k_{ij} , k_w не зависят от конструкции свободно-воздушных камер.

Произведение поправочных коэффициентов $k_{ij}k_w$ эталонных свободно-воздушных ионизационных камер из состава установок УЭД 5-50М и УЭД 50-320 рассчитано на основании данных для моноэнергетических фотонов,

представленных в Отчёте № 90 МКРЕ, путем взвешивания значений $k_{ij}k_w$ по измеренным энергетическим спектрам режимов рентгеновского излучения установок.

В установке ПИКЭ-1 в качестве эталонных измерительных преобразователей для воспроизведения единиц кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы и мощности экспозиционной дозы используются полостные графитовые ионизационные камеры. Воспроизведение единиц осуществляется в соответствии со следующими уравнениями:

$$K = \frac{Q}{m} \frac{W_{air}}{e} \frac{1}{1-g_{air}} \left(\frac{\bar{\mu}_{en}}{\rho} \right)_{air,g} \bar{s}_{g,air} k_p k_h k_s k_{st} k_m k_{wall} k_{an};$$

$$\dot{K} = \frac{I}{m} \frac{W_{air}}{e} \frac{1}{1-g_{air}} \left(\frac{\bar{\mu}_{en}}{\rho} \right)_{air,g} \bar{s}_{g,air} k_p k_h k_s k_{st} k_m k_{wall} k_{an};$$

$$X = \frac{Q}{m} \left(\frac{\bar{\mu}_{en}}{\rho} \right)_{air,g} \bar{s}_{g,air} k_p k_h k_s k_{st} k_m k_{wall} k_{an};$$

$$\dot{X} = \frac{I}{m} \left(\frac{\bar{\mu}_{en}}{\rho} \right)_{air,g} \bar{s}_{g,air} k_p k_h k_s k_{st} k_m k_{wall} k_{an},$$

где $(\bar{\mu}_{en}/\rho)_{air,g}$ – отношение массовых коэффициентов поглощения для воздуха и графита; $\bar{s}_{g,air}$ – отношение массовых тормозных способностей для графита и воздуха; k_p – коэффициент, учитывающий реальную плотность воздуха; k_{st} – коэффициент, учитывающий рассеяние от держателя камеры; k_m – коэффициент, учитывающий радиальную неравномерность пучка излучения; k_{wall} – коэффициент, учитывающий ослабление и рассеяние излучения в стенках камеры; k_{an} – коэффициент, учитывающий аксиальную неравномерность пучка излучения.

Поправочные коэффициенты k_s , k_{st} , k_m определяли экспериментально, остальные – методами численного моделирования [5, 7].

В Отчёте № 90 МКРЕ содержатся новые данные, связанные с определением отношения тормозных способностей графита к воздуху $\bar{s}_{g,air}$, которое используется при воспроизведении единиц с помощью эталонных полостных графитовых ионизационных камер:

значение средней энергии возбуждения графита I_g увеличено с 78 до 81 эВ с соответствующим уменьшением стандартной неопределённости с 4 до 1,8 эВ;

Метрологические характеристики ГЭТ 8-2019

Характеристика	Керма в воздухе, мощность кермы в воздухе	Экспозиционная доза, мощность экспозиционной дозы	Поток энергии
Диапазон измерений величины	$1 \cdot 10^{-7}$ – 20 Гр, $1 \cdot 10^{-8}$ – 2 Гр/с	$3 \cdot 10^{-9}$ – $6 \cdot 10^{-1}$ Кл/кг, $3 \cdot 10^{-10}$ – $6 \cdot 10^{-2}$ А/кг	$2 \cdot 10^{-5}$ – $2 \cdot 10^{-4}$ Вт
S_0	$1,1 \cdot 10^{-3}$ – $1,5 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$ – $1,5 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$
θ_0	$4,2 \cdot 10^{-3}$ – $1,1 \cdot 10^{-2}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$ – $8,2 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$
Стандартная неопределённость по типу А u_{0A}	$1,1 \cdot 10^{-3}$ – $1,5 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$ – $1,5 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$
по типу В u_{0B}	$1,7 \cdot 10^{-3}$ – $4,6 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$ – $3,4 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$
суммарная u_{0c}	$2,0 \cdot 10^{-3}$ – $4,8 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$ – $3,7 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$
Расширенная неопределённость при коэффициенте охвата $k=2$ U_0	$4,0 \cdot 10^{-3}$ – $9,6 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$ – $7,4 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-2}$
Нестабильность эталона за год u_0	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	–

плотность графита ρ_g рекомендуется принимать равной кристаллической плотности графита $2,265 \text{ г/см}^3$ при оценке эффекта плотности графита.

С учётом новых данных по I_g и ρ_g получены новые значения произведений средней энергии ионизации и отношения массовых тормозных способностей графита к воздуху $(W_{air}/e)\bar{s}_{g,air}$, используемые в уравнениях воспроизведения единиц величин на установке ПИКЭ-1 при измерениях с эталонными полостными графитовыми ионизационными камерами. Так, для гамма-излучения кобальта-60 $(W_{air}/e)\bar{s}_{g,air} = 33,72 \text{ эВ}$ с относительной стандартной неопределённостью $0,08 \%$ при $\bar{s}_{g,air} = 0,9928$, для гамма-излучения цезия-137 $(W_{air}/e)\bar{s}_{g,air} = 34,05 \text{ эВ}$ с относительной стандартной неопределённостью $0,12 \%$ при $\bar{s}_{g,air} = 1,0023$ [8].

Метрологические характеристики ГЭТ 8-2019. Метрологические характеристики ГЭТ 8-2019, определённые в результате исследований с учётом данных и рекомендаций Отчёта № 90 МКРЕ, приведены в таблице, где S_o – относительное среднее квадратическое отклонение результата измерений при количестве измерений $n=15$, θ_o – относительная неисключённая систематическая погрешность.

В результате значения единиц кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы и мощности экспозиционной дозы, воспроизводимые ГЭТ 8-2019, уточнены с использованием приведённых в Отчёте № 90 МКРЕ современных ключевых данных в области дозиметрии фотонного излучения. В области рентгеновского излучения уточнённые значения единиц кермы в воздухе и мощности кермы уменьшились по сравнению с воспроизводимыми ранее до $0,5 \%$. В области гамма-излучения уточнённые значения единиц кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы и мощности экспозиционной дозы уменьшились по сравнению с воспроизводимыми ранее до $0,8 \%$.

Ключевые данные Отчёта № 90 МКРЕ внедрены на международном уровне, поэтому степени эквивалентности национальных эталонов, полученные ранее в международных сличениях, сохраняются неизменными. Результаты ключевых и дополнительных сличений, выполненных в период 2009–2016 гг., подтверждают соответствие основных метрологических характеристик ГЭТ 8-2019 характеристикам национальных эталонов ведущих зарубежных стран.

Заключение. Дозиметрические измерения, реализующиеся на ГЭТ 8-2019, гармонизированы с современной международной практикой и удовлетворяют требованиям к точности и диапазону воспроизведения и передачи единиц. С помощью ГЭТ 8-2019 реализуются все функции, связанные с поддержанием единства измерений в стране в соответствии с мировыми метрологическими стандартами: поверка и калибровка дозиметрических средств измерений, испытания и сертификация приборостроительной продукции и источников фотонного излучения, проведение ключевых и дополнительных сличений.

Список литературы

1. Оборин А. В., Виллевалде А. Ю., Трофимчук С. Г. Государственный первичный эталон единиц кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы, мощности экспозиционной дозы и потока энергии рентгеновского и гамма-излучений // Измерительная техника. 2012. № 8. С. 3–8.
2. ICRU Report No. 90 Key Data for Ionizing-Radiation Dosimetry: Measurement Standards and Applications, *Journal of the International Commission on Radiation Units and Measurements*, 2014, vol. 14, Iss. 1.
3. McEwen M. et al., Rapp B. Report to CCRI(I) on the recommendations of ICRU Report 90, 2017.
4. Burns D. T., Buermann L., *Metrologia*, 2009, vol. 46, pp. S9–S23. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/46/2/S02>
5. Kawrakow I. et al., The EGSnrc Code System: Monte Carlo simulation of electron and photon transport, Technical Report PIRS-701, 2017, National Research Council Canada.
6. Mainegra-Hing E., Reynaert N., Kawrakow I., *Med. Phys.*, 2008, 35(8), pp. 3650–3660. <https://doi.org/10.1118/1.2955551>
7. Burns D. T., Buermann L., *Metrologia*, 2009, vol. 46, pp. S24–S38. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/46/2/S03>
8. Burns D. T., Kessler C., *Metrologia*, 2018, vol. 55, R21. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aacb01>

References

1. Oborin A. V., Villevalde A. Y., Trofimchuk S. G., *Measurement Techniques*, 2012, vol. 55, no. 8, pp. 849–857. <https://doi.org/10.1007/s11018-012-0050-8>
2. ICRU Report No. 90 Key Data for Ionizing-Radiation Dosimetry: Measurement Standards and Applications, *Journal of the International Commission on Radiation Units and Measurements*, 2014, vol. 14, Iss. 1.
3. McEwen M. et al., Rapp B. Report to CCRI(I) on the recommendations of ICRU Report 90, 2017.
4. Burns D. T., Buermann L., *Metrologia*, 2009, vol. 46, pp. S9–S23. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/46/2/S02>
5. Kawrakow I. et al., The EGSnrc Code System: Monte Carlo simulation of electron and photon transport, Technical Report PIRS-701, 2017, National Research Council Canada.
6. Mainegra-Hing E., Reynaert N., Kawrakow I., *Med. Phys.*, 2008, 35(8), pp. 3650–3660. <https://doi.org/10.1118/1.2955551>
7. Burns D. T., Buermann L., *Metrologia*, 2009, vol. 46, pp. S24–S38. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/46/2/S03>
8. Burns D. T., Kessler C., *Metrologia*, 2018, vol. 55, R21. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aacb01>

Дата поступления: 22.04.2020.

Дата принятия: 22.05.2020.

National primary standard of air kerma, air kerma rate, exposure, exposure rate and energy flux for X-rays and gamma radiation GET 8-2019

Alexandr V. Oborin, Anna Y. Villevalde, Sergey G. Trofimchuk

*D. I. Mendeleev Institute for Metrology (VNIIM), St. Petersburg, Russian Federation,
e-mail: oav@vniim.ru, vay@vniim.ru, tsg@vniim.ru*

The results of development of the national primary standard of air kerma, air kerma rate, exposure, exposure rate and energy flux for X-rays and gamma radiation GET 8-2011 in 2019 are presented according to the recommendations of the ICRU Report No. 90 "Key Data for Ionizing-Radiation Dosimetry: Measurement Standards and Applications". The following changes are made to the equations for the units determination with the standard: in the field of X-rays, new correction coefficients of the free-air ionization chambers are introduced and the relative standard uncertainty of the average energy to create an ion pair in air is changed; in the field of gamma radiation, the product of the average energy to create an ion pair in air and the electron stopping-power graphite to air ratio for the cavity ionization chambers is changed. More accurate values of the units reproduced by GET 8-2019 are obtained and new metrological characteristics of the standard are stated.

Key words: standard, X-rays, gamma radiation, air kerma, exposure, free-air ionization chamber, cavity ionization chamber.

Периодическая система элементов Д. И. Менделеева: между прошлым и будущим

С. Л. Чернышев¹, Л. К. Исаев², А. Д. Козлов²

¹Москва, Российская Федерация, e-mail: nature@front.ru

²Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы,
Москва, Российская Федерация, e-mail: isaev-vm@vniims.ru, kozlov@vniims.ru

Рассмотрены возможности исследования Периодической системы элементов Д. И. Менделеева. Показано, что для классификации химических элементов может служить четырёхзначная логика квантовых измерений. Применение квантовых шкал с информацией о положении химического элемента с заданным порядковым номером позволяет определить новые задачи метрологических исследований и развить новые подходы к квантовой метрологии.

Ключевые слова: периодическая система элементов Д. И. Менделеева, четырёхзначная логика, квантовые измерения, классификация, квантовые шкалы.

Введение. Возможность открытия истинных причин явлений существует благодаря измерениям. Сопоставление результата измерения массы вещества и «индивидуальности вещества, выраженной в химических превращениях», привели Д. И. Менделеева, по его собственному заключению, к открытию периодического закона [1]. В связи с 150-летием периодического закона химических элементов ООН объявила 2019 г. годом периодического закона химических элементов. Открытие Периодической системы элементов (ПСЭ) было бы невозможным без достижений в части определения атомного веса, признанного в то время основной количественной характеристикой элемента. У ПСЭ в форме таблицы Д. И. Менделеева с 1869 г. большая история. Однако и по настоящее время необходимо совершенствование представлений о ПСЭ для извлечения пока ещё недоступной информации, содержащейся в структуре системы. Эта информация нужна для разработки новых технологий с использованием уже открытых элементов, а также для прогнозирования структуры и свойств новых элементов, в том числе сверхтяжёлых элементов с порядковыми номерами более 118. В связи с этим необходимы, в частности, новые модели процесса измерений и применение новых физических и математических понятий. В некоторой степени этот пробел устранён в недавно вышедшей монографии [2].

Систематизация. Важная идея, положенная в основу ПСЭ, заключается в фундаментальном значении, которое придавалось понятию «элемент» [3]. Согласно представлениям Д. И. Менделеева «элемент» – это не только химический элемент, но, кроме того, – некая абстрактная субстанция. Такому «абстрактному элементу» могут быть приписаны различные характеристики: атомный вес, заряд ядра атома, количество электронов в атоме и т. д. Объединяющей сущностью таких элементов может служить порядковый (атомный) номер, роль которого впервые была отмечена Ван ден Брейком на основе

данных по рассеянию α -частиц [4]. Введение в рассмотрение порядковых номеров элементов позволяет в полной мере использовать достижения физики дискретного состояния – квантовой механики. Для описания ПСЭ можно также применить аппарат теории шкал.

Фундаментальное свойство окружающей природы – способность к самоорганизации. Представление результатов эволюционных процессов самоорганизации в виде определённой системы – новый уровень понимания явлений природы. ПСЭ, открытая Д. И. Менделеевым в 1869 г., в интегрированном виде содержит необходимую для будущих исследований и технологий физическую, химическую и метрологическую информацию, во многом ещё не использованную [5]. Возможно, что раскрытие кодов эволюционного саморазвития и логических основ построения ПСЭ послужит стимулом для осмысления функционирования интеллектуальных систем, признаком сознания которых служит способность интуитивного постижения глубокого различия между истиной и ложью [6].

В заключительной, неопубликованной при жизни Д. И. Менделеева, главе «Мировоззрение» книги «Заветные мысли» он писал: «...по моему разумению, грань наук, донныне едва достигнутая и, по всей видимости, ещё и надолго долженствующая служить гранью научного познания, грань, за которою начинается уже не научная область, всегда долженствующая соприкасаться с реальностью, из неё исходить и в неё возвращаться, эта грань сводится (повторю опять для избежания недоразумений – *по моему мнению*) к принятию исходной троицы несливаемых, друг с другом сочетающихся, вечных (насколько это доступно нам узнавать в реальностях) и всё определяющих: вещества (или материи), силы (или энергии) и духа (или психоза). Признание их слияния, происхождения и разделения уже лежит вне научной области, ограничиваемой действительностью или

реальностью. Утверждается лишь то, что во всём реальном надо признать или вещество, или силу, или дух, или, как это всегда и бывает, их сочетание, потому что одинаково немислимы в реальных проявлениях ни вещество без силы, ни сила (или движение) без вещества, ни дух без плоти и крови, без сил и материи» [7].

В начале XIX в. с развитием идей химической атомистики и методов химического анализа появились первые попытки систематизации элементов по их атомному весу, признанному основной количественной характеристикой элемента. За последние годы, спустя почти 150 лет с момента создания периодической системы с 69 элементами, открыты несколько десятков новых химических элементов, до элемента с порядковым номером 118 включительно, положения которых в таблице соответствуют структуре ПСЭ. Однако причины периодичности свойств химических элементов, проявляющейся в зависимости от их массы или порядкового номера, не получили необходимого системного объяснения [8]. В 1889 г. во время выступления в Лондоне Д. И. Менделеев подчёркивал важность поиска «общих начал, которые были бы пригодны для реального постижения и обладания природою химических изменений вещества...» [9]. Данное положение особенно важно для открытия новых элементов с большими порядковыми номерами, поскольку концепции построения ПСЭ в целом не соответствуют классическим представлениям квантовой механики.

Ряд особенностей ПСЭ, а также составляющих её элементов, служат определяющими факторами для исследователей и задают направления дальнейших поисков, часть из которых выполнялась по грантам РФФИ. Отметим следующие факторы: неопределённость задания номеров групп и периодов для всех элементов; неоднозначность определения положений водорода и гелия; ограниченность представления периодических свойств элементов в виде таблицы, содержащей только группы и периоды элементов; неоднозначность валентных свойств элементов; многообразие кристаллических форм химических элементов (полиморфизм); новые свойства квазикристаллических структур; наличие изотопов; проявления размерных факторов при исследовании наноструктур.

Существуют более 700 различных форм изображения ПСЭ, однако поиски новых форм продолжаются и направлены на определение внутренней симметрии (паттерна организации) системы элементов [10]. «Белые пятна» в объяснении строения ПСЭ – причина поисков, которые, так или иначе, обращаются к логическим основам. Известно, что математики обращались к логическим построениям, чтобы укрепить фундамент и наметить пути новых поисков. Для совершенствования представлений о ПСЭ также необходим анализ её логических оснований на базе современной теории измерений.

Известно, что существует противоречие между квантовой теорией и строением ПСЭ, состоящее в том, что построение водородоподобных электронных конфигураций на основе квантовой теории с использованием квантовых чисел соответствует структуре ПСЭ только до 18-го элемента (аргон) включительно. Решение проблемы согласования

строения ПСЭ и квантовой теории заключается в признании того, исследование ПСЭ включает в себе, по меньшей мере, два подхода, что может проявляться в существовании двух видов шкал. Следствием этого является, в частности, двойственное положение первых двух элементов – водорода и гелия – в таких шкалах. Один вид шкал, например, соответствовал бы водородоподобной системе элементов, отображая бесконечное разнообразие структур в соответствии с группами ортогональных преобразований (вращений и отражений), проявляющихся в квазикристаллических объектах. Другой вид шкал воспроизводил бы общепринятую структуру ПСЭ в трёхмерном случае, отображая свойства преобразований элементов в соответствии с группами инвариантных решёток, взаимосвязанных со строением кристаллов. Два вида взаимосвязанных шкал позволяют обеспечить согласование водородоподобной системы и структуры ПСЭ для элементов с произвольными порядковыми номерами.

Логические основания. Понимание логики окружающей среды важно для формирования и развития представлений о ПСЭ. Известно, что измерения вносят изменения в динамику исследуемого процесса и воздействуют на исследуемый объект (измеряемую величину) так же, как и окружающая среда. Принципиальная неустранимость воздействия измерительного прибора на наблюдаемую систему – характерная черта квантовых измерений. Измерение в квантовой механике (квантовое измерение) – взаимодействие между классическим объектом (измерительным прибором) и объектом квантовым. При этом чем точнее измерение, тем сильнее оказываемое им воздействие, и лишь при измерениях очень малой точности воздействие прибора на измеряемый объект может быть слабым. Квантовая механика на основе вероятностной интерпретации позволяет объяснять физические явления и процессы микромира. В то же время ни эволюция волновой функции согласно уравнению Шредингера, ни использование математического аппарата для получения результатов измерений не предусматривают модели процесса измерений. Отсутствие математического описания процесса измерений при исследовании микрообъектов приводит к следующим трудностям: необходимости интерпретации волновой функции и самой квантовой механики; выяснению роли наблюдателя в процессе перехода от физической величины (множества возможных результатов) к её собственному значению (определению конкретного результата); возникновению парадоксов при переходе от квантовой к классической физике [11, 12]. Конечно, все эти проблемы относятся к проблемам квантовой метрологии, которая должна получить принципиально новое развитие после принятия в ноябре 2018 г. реформированной Международной системы единиц SI, которая стала, по существу, *квантовой SI в связи с определением единиц основных физических величин через фиксированные значения фундаментальных физических констант!*

Можно предположить картину, при которой не существование кванта действия с необходимостью приводит к вероятностному описанию явлений микромира, а наоборот, вероятностное описание предполагает существование кванта воздействия. При этом квант воздействия взаимосвязан

с отличными от нуля вероятностями ошибок первого α и второго β рода, характеризующими воздействие окружающей среды. Логические состояния «ложное утверждение», соответствующее вероятности ошибки первого рода, и «ложное отрицание», соответствующее вероятности ошибки второго рода, при сравнениях представляли бы в этом случае, по квантовологической интерпретации фон Неймана, своеобразные объекты физической реальности.

Если информационную модель взаимодействия динамической системы с окружающей средой представить в виде последовательного сравнения с мерами, то вероятности ошибок первого и второго родов при сравнениях будут выполнять функции воздействия окружающей среды – «метанаблюдателя». В результате приходим к дискретному марковскому процессу блуждания по четырём логическим состояниям («истинное утверждение», «истинное отрицание», «ложное отрицание», «ложное утверждение»), связанным с принятием решения о состоянии системы. Переход от традиционной логики двух состояний (утверждение или отрицание какого-либо факта) к четырёхзначной логике измерений сопровождается переходом от метрических пространств к конфигурационному пространству размерностей. В этом случае проблемы, связанные с локализацией микрообъектов, редукцией (стягиванием) волновой функции, исключаются, поскольку в матрицах квантовых измерений вместо координаты или времени используется понятие размерности пространства, включающее представление о D-мерном симплексе [13]. При этом одномерность связана с одномерным симплексом – отрезком; двумерное пространство с двумерным симплексом – треугольником и т. д. В квантовой механике известный логический парадокс связан с рассмотрением двух возможных состояний двух классических и одного квантового объектов: измерительного прибора, «шредингеровского кота» и квантовой частицы. С точки зрения четырёхзначной логики при измерениях как квантового, так и неквантового объекта мы не только не выясняем «жив кот или нет», но и приходим вместо одного или двух состояний к четырём логическим состояниям (с добавлением «может быть» и «не определено»), обусловленным отличными от нуля вероятностями ошибок [9, 14].

Логические основы измерений представляют основу логики окружающей среды. Положения четырёхзначной логики измерений приводят к понятиям «матрица квантовых измерений» и «результаты квантовых измерений» [14], которые могут служить целям классификации элементов с заданными порядковыми номерами [15]. Современные методы классификации в метрологии реализуются на базе теории шкал [16]. При этом ПСЭ может быть представлено как система шкал, отображающих свойства симметрии с учётом размерности пространства. Такое представление может потребовать введения новых математических объектов, например фигурных чисел, объединяющих понятия числа, фигуры и множества и, в частности, служащих элементами матриц квантовых измерений [17].

Классификация. Как известно, классификация заключается в разбиении множества исследуемых объектов на классы

эквивалентности. Значение классификации при этом выходит за рамки только математической проблемы. Примером может служить классификация многомерных наблюдений в процессе построения ПСЭ. При этом каждый химический элемент может быть представлен в виде набора характеризующих его разнотипных признаков. Такой набор включает характеристики конфигурации внешних электронных оболочек атомов с выявленным классифицирующим фактором (зарядом атомного ядра или порядковым номером).

Современное представление ПСЭ основано на квантовых закономерностях и включает описание периодов и групп, в которых располагаются классифицируемые элементы в соответствии с их порядковыми номерами. Классификация элементов, характеризующихся порядковыми номерами, например атомов, может быть проведена на основе эмпирических квантовых последовательностей, представленных в виде шкал. Согласно И. Пфанцглю шкала – это отображение эмпирической системы отношений в числовую систему отношений, индуцирующее определённые отношения эквивалентности между эмпирической и числовой системами [18].

По квантовым представлениям электрон при движении как бы создаёт электронное облако, плотность которого характеризуется волновой функцией. Размер, форма и ориентация облака описываются квантовыми числами. Для полного описания квантового состояния электрона в атоме используются четыре квантовых числа – главное, орбитальное, магнитное и спиновое. Квантовые числа – целые или дробные числа, которые определяют возможные дискретные значения физических величин, характеризующих квантовые системы (атомное ядро, атом, молекулу и др.). В соответствии с принципом запрета Паули в одном и том же атоме не может быть более одного электрона с одинаковым набором четырёх квантовых чисел.

ПСЭ в современном представлении относится к трёхмерному физическому пространству. Переход к пространствам других размерностей может изменить систему классификации, основанную на квантовых числовых последовательностях и взаимосвязанную с решениями уравнения Шредингера. Квантовые числовые последовательности, зависящие от главного квантового числа, могут представлять соответствующие квантовые шкалы [14, 15]. Водородоподобная система элементов в трёхмерном физическом пространстве представляет собой шкалу наименований, характеризующую качественные свойства, в которой определённому атому (названию атома) ставится в соответствие определённое множество значений квантовых чисел. Если при заданном главном квантовом числе значения трёх других квантовых чисел совпадают, то такие элементы (атомы) образуют определённую классификационную группу. Так, например, в первую группу водородоподобной системы попадают элементы: водород, литий, натрий, медь и т. д. Элементы второй группы водородоподобной системы – гелий, бериллий, магний, цинк и т. д. [2].

Определение электронной конфигурации свободного атома часто не позволяет сделать однозначный вывод о важнейших химических свойствах, которые должен проявлять соответствующий элемент. Количественное объяснение

специфики проявляемых химическими элементами свойств и периодичности этих свойств представляет чрезвычайно сложную задачу. Для решения этой задачи необходимо понять взаимосвязанную с процессом измерения логику эволюционного развития, сформировавшего ПСЭ.

Неопределённость измерения характеризуется соответствующими условными вероятностями ошибки первого рода α и ошибки второго рода β . Множество условий проведения эксперимента представлено комплексным числом (α, β) , а результаты измерения отображаются в соответствующих строках матрицы. При безошибочном контроле состояний условные вероятности ошибок α и β равны нулю – в результате получаем единичную матрицу. Таким образом, если исследуемая величина $L=0,1,\dots$ может принимать бесконечное (счётное) число значений $N=0,1,\dots$, а вероятности ошибок измерения α и β не зависят от значения измеряемой величины, то приходим к стохастической матрице бесконечного порядка $M_{L,N}(\alpha,\beta)$, в L -й строке которой определено дискретное распределение вероятности $P_L(N;\alpha,\beta)$.

Квантование воздействий приводит к тому, что от действительных значений вероятностей ошибок первого и второго рода $0<\alpha<1, 0<\beta<1$ переходим к дискретной последовательности вероятностей:

$$(\alpha_0, \beta_0); (\alpha_1, \beta_1); \dots; (\alpha_M, \beta_M) \dots$$

Каждая пара равных значений вероятностей ошибок соответствует определённым условиям окружающей среды и порождает *матрицу квантовых измерений, которая характеризуется параметром порядка $M=0,1,2,\dots$* [14]. Развитие положений четырёхзначной логики путём построения комплексов в матрицах квантовых измерений позволяет классифицировать элементы, характеризуемые порядковым номером в зависимости от условий окружающей среды или параметра порядка. При этом возникает возможность неоднозначного представления структуры сложного объекта, каким является атом [15, 17].

В матрице квантовых измерений каждому элементу, характеризующемуся определённой вероятностью, поставлено в соответствие фигурное число, которое можно трактовать как ортогональное разбиения единицы. Таким образом, фигурные числа определённого вида представляют собой результаты квантовых измерений согласно [13, 14]. *Параметр формы M фигурного числа представляет параметр порядка матриц квантовых измерений* и взаимосвязан с параметром порядка обобщённых золотых пропорций и чисел Фибоначчи [2, С. 294–315]. Отметим, что обобщённые золотые пропорции введены А. П. Стаховым, исходя из задач измерений [19]. В настоящее время интерес к этим математическим объектам обусловлен исследованиями квазикристаллов [15, 20].

Комплексы элементов – результаты квантовых измерений в матрицах – представляют специфические паттерны. При этом порядковый номер химического элемента, помещённый в определённую ячейку комплекса, представляет сумму неотрицательных целочисленных значений параметра,

характеризующего размерность структуры и параметра порядка. Таким образом, в процессе воспроизводства паттерна возникает своеобразная «конкуренция» размерностей и свойств симметрии моделей элемента.

В то же время сложная структура комплекса позволяет провести классификацию элементов с учётом значения параметра порядка. Такая классификация приводит к водородоподобной системе элементов, но обладает принципиальной особенностью: возникает неоднозначность образов классифицируемых элементов.

Многочисленные свойства (химические, физические и др.) сложного объекта могут определяться не в одной, а сразу в нескольких различных шкалах, описывающих как количественные, так и качественные свойства, например особенности атомной структуры или принадлежность к определённой группе преобразований. Исследование ПСЭ предусматривает анализ двух видов шкал: комплексной и степенной. Комплексная шкала, соответствующая водородоподобной системе элементов, отображает бесконечное разнообразие структур в соответствии с неограниченным увеличением наборов квантовых чисел при неограниченном увеличении главного квантового числа. Степенная шкала, приводящая к общепринятой ПСЭ в трёхмерном случае, отображает конечное число преобразования элементов. Степенные шкалы могут быть представлены с помощью нумерующих функций [21]. Два вида квантовых шкал (комплексные и степенные) полностью взаимосвязаны.

По результатам системного анализа ПСЭ может быть представлена в пространствах различных размерностей в зависимости от того, какая степень квантовой числовой последовательности служит основой построения шкал. На определённую размерность пространства в процессе классификации элементов указывают также взаимосвязи степенных шкал и нумерующих функций. Для каждой размерности можно построить два вида шкал: квантовая степенная шкала отображает свойства преобразования элементов, а квантовая комплексная шкала – структурные свойства элементов.

Полный набор отображений структуры и свойств химических элементов в пространствах размерности 1D–4D (и только таких размерностей), включает восемь квантовых шкал, представляющих ПСЭ [2]. Таким образом, эволюция ПСЭ рассматривается в виде четырёх подсистем, последовательно самоорганизующихся в пространствах с размерностями, начиная от 1D и до 4D. Отметим, что впервые подобное представление эволюции ПСЭ для 2D рассмотрено в [22].

К основным результатам построения системы квантовых шкал, представляющих основу построения ПСЭ, относятся: классификация элементов, учитывающая свойства симметрии для различных размерностей пространства;

согласование квантово-механического представления ПСЭ и её современного вида (для трёхмерного пространства), включая порядковые номера элементов от 1 до 118;

возможность системной классификации элементов с порядковыми номерами, выражаемыми натуральными числами;

модели элементов, характеризуемых порядковыми номерами, в виде фигурных чисел и представление порядкового

номера в виде суммы параметров порядка (формы) и размерности;

неоднозначность моделей элементов с одним и тем же порядковым номером, различающихся значениями параметра порядка и соответственно геометрическими образами;

правила преобразования элементов для различных размерностей пространства;

сложный характер моделей элементов и возможность их сопоставления с квазипериодическими структурами [23].

Классификация элементов, характеризуемых порядковыми номерами, на основе комплексных шкал приводит к тому, что один и тот же элемент может иметь один, два или три образа в виде соответствующих фигурных чисел. Отметим, что неоднозначность моделей атомов впервые была выявлена в 1878–1879 гг. в опытах А. Майера. Эти опыты послужили основой первой не квантовой модели атома, построенной Д. Д. Томсоном. Целям такого моделирования служат комплексы в матрицах квантовых измерений, представляющие множества элементов различных размерностей и различных симметрий, объединённых по определённым правилам.

Неоднозначность представления моделей элементов, обусловленная различными значениями параметра порядка, возникает вследствие того, что один и тот же порядковый номер может появляться в комплексах матриц квантовых измерений более одного раза. Таким образом, для комплексных шкал различных размерностей выделены классификационные группы, для которых элементы, расположенные в этих группах, будут иметь по одному, по два или по три образа в виде соответствующих фигурных чисел. Атомы одного и того же вещества в различных условиях способны образовывать разные по симметрии и по форме кристаллы. В то же время существует сходство пространственного расположения атомов или ионов различных веществ. Эта информация может быть полезна для проведения метрологических исследований кластеров воды, металлов и других соединений, в которых определённые атомы одного и того же элемента, например кислорода или железа, могут входить в различные электронные конфигурации [17].

Как указывалось ранее, двойственность положения водорода и гелия в ПСЭ объясняется двойственным видом шкал. Первые изменения свойств, обусловленные размерностью физического пространства, начинают проявляться для элементов с порядковыми номерами 3 и 4 (литий и бериллий). При увеличении порядковых номеров элементов таких отличительных особенностей становится все больше.

В процессе исследования структуры химических элементов и их соединений выявляются связи типа «состав – структура – свойства», где всё большее значение приобретает учёт размерных факторов. В этой связи можно отметить целый ряд проблем, рассматриваемых в грантах РФФИ: исследования свойств одномерных кристаллов; создание наноразмерных структурированных углеродных материалов для систем преобразования и хранения энергии; молекулярный дизайн одно- и двумерных молекулярных структур для молекулярной электроники; синтез квазидвумерных полупроводниковых наночастиц и ансамблей на их основе;

исследования физико-химических свойств нанопроволок и нанонитей. Новые возможности для метрологических исследований свойств элементов открываются в каждой из восьми квантовых шкал, отражающих размерности пространства. Введение одномерной периодической системы в 1D-мире ($D=1$) порождает одномерную химию, в которой существуют четыре группы элементов. Применение положений одномерной химии предполагает постановку новых метрологических задач по исследованию особенностей одномерных квантовых систем, включая исследования свойств квазикристаллов, представляющих структуры размерами от 1 до 100 нм и широко используемых в различных областях науки и техники. Модели плоских структур, представляющие основу химии поверхности, а также особенности их преобразования могут быть исследованы на основе двух квантовых шкал, воспроизводящих ПСЭ для размерности пространства $D=2$. Здесь в комплексной двумерной шкале присутствует бесконечное число симметрий элементов, отвечающее расширяющемуся набору значений квантовых чисел, а в квадратичной шкале число групп элементов равно десяти, т. е. равно числу групп инвариантных решёток плоского мира [2].

Новые свойства элементов ПСЭ, включая свойства преобразований электронного строения элементов с выделением или поглощением энергии, следуют из рассмотрения двух типов квантовых шкал в случае $D=3$ [17]. Отметим, что для исследования сверхтяжёлых элементов с порядковыми номерами, превышающими 118, выявленные с помощью квантовых шкал свойства могут стать незаменимой информацией, поскольку расчётные методы исследования структур таких элементов чрезвычайно сложны. Так, кубическая квантовая шкала позволяет прогнозировать количество элементов в VIII, IX и X периодах соответственно 18, 32 и 8 и свойства этих элементов. Наконец, анализ преобразований элементов в четырёхмерном пространстве на основе комплексной и степенной шкал в 4D может послужить основой развития четырёхмерной или «космической» химии и её метрологического обеспечения [24].

Заключение. Химические элементы, из которых образованы все природные объекты, – результат длительных эволюционных процессов. Представление результатов этих процессов в виде определённой системы – значительное достижение человеческой мысли. Совершенствование представлений о ПСЭ, неразрывно связанной с именем её первооткрывателя – Д. И. Менделеева, необходимо в первую очередь для извлечения пока ещё недоступной информации, содержащейся в структуре системы. Эта информация нужна для разработки новых технологий с использованием уже открытых элементов, а также для прогнозирования структуры и свойств новых элементов, в том числе сверхтяжёлых элементов с порядковыми номерами более 118. Принципиально важным моментом применения теории шкал [18], позволяющей на строгой основе сопоставлять конкретные материальные и определённые числовые системы, к исследованию ПСЭ является использование системы взаимосвязанных шкал, более полно отображающих процессы

самоорганизации [15]. Взаимосвязь таких шкал осуществляется на основе квантовых числовых последовательностей.

Ключевая роль метрологии с необходимостью проявляется в исследованиях новых методов синтеза различных (металлоорганических, фторорганических, фосфорсераорганических и др.) соединений, методов анализа кластеров металлов, используемых в молекулярной электронике, нелинейной оптике и фотокаталитических системах. При этом основой классификации химических элементов может служить четырёхзначная логика квантовых измерений и система взаимосвязанных квантовых шкал. Таким образом, важная информация может быть получена, исходя из положения химического элемента с заданным порядковым номером в определённой квантовой шкале, представляющей систему ПСЭ с учётом размерности пространства. Поскольку многие свойства химических соединений существенно зависят от размерности структур, то на основе этой информации могут быть сформулированы новые задачи метрологических исследований, включая создание баз данных прецизионных значений характеристик новых материалов с определёнными электрическими, магнитными и другими свойствами [24].

Сложность расчётов на основе методов молекулярной квантовой химии приводит к необходимости поиска новых подходов к анализу электронных распределений и химической связи. Один из таких подходов связан с представлением системы квантовых шкал, отображающих ПСЭ в пространствах различных размерностей. Как показано в [17], существует четыре вида таких размерностей, в которых может быть произведена классификация элементов, характеризующихся порядковыми номерами, базирующаяся на квантовых числовых последовательностях, приводящая к восьми квантовым шкалам и согласованная с трёхмерным вариантом ПСЭ. Это одно из направлений в развитии квантовой метрологии.

Список литературы

1. Менделеев Д. И. Периодический закон. Основные статьи. Сер. «Классики науки». М.: Изд-во АН СССР, 1958. С. 529–554.
2. Чернышев С. Л. Четыре измерения Периодической системы элементов. М.: ЛЕНАНД, 2019. 332 с.
3. Scerri E. R., *American Scientist*, 2008, vol. 96, pp. 52–58. <https://doi.org/10.1511/2008.69.52>
4. Льюис М. История физики. Пер. с итальянского Э. Л. Бурштейна. М.: Мир, 1971.
5. Тарбеев Ю. В., Трунов Н. И., Лобашев А. А., Кухарь В. В. Периодическая система элементов и метрология квантовых мезоскопических систем // Измерительная техника. 2001. № 9. С. 53–62.
6. Пенроуз Р. Новый ум короля: о компьютерах, мышлении и законах физики. Пер. с англ. / Под общ. ред. В. О. Малышенко. Изд. 4-е. М.: УРСС, Издательство ЛКИ, 2011. 400 с.
7. Менделеев Д. И. Заветные мысли. М.: Голос-Пресс, 2009. С. 382–383.
8. Кораблева Т. П., Корольков Д. В. Развитие теории периодической системы во второй половине XX в. // Вестник

Московского Университета. Сер. 2. Химия. 2002. Т. 43. № 2. С. 113–116.

9. Менделеев Д. И. Периодическая законность химических элементов. «Фарадеевское чтение» в лондонском Химическом обществе (23 мая – 4 июня 1889 г.). М.: Изд-во АН СССР, 1958, С. 208–236.
10. Scerri E. R., Edwards J., *Foundations of Chemistry* 3: 183–196, 2001. <https://doi.org/10.1023/A:1011458803337>
11. Кадомцев Б. Б. Динамика и информация. М.: Редакция журнала «Успехи физических наук», 1997. 400 с.
12. Kibler M. R., *Foundations of Chemistry*, 2007, no. 9, pp. 221–234. [arXiv:quant-ph/0611287](https://arxiv.org/abs/quant-ph/0611287). <https://doi.org/10.1007/s10698-007-9039-9>
13. Понтрягин Л. С. Обобщения чисел. М.: Наука, 1986.
14. Чернышев С. Л., Чернышев Л. С. Квантовый анализ результатов измерений // Измерительная техника. 2006. № 12. С. 3–8.
15. Исаев Л. К., Чернышев С. Л. Основанная на теории шкал классификация элементов, характеризующихся порядковыми номерами // Нелинейный мир. 2007. № 10-11, Т. 5. С. 705–711.
16. Брянский Л. Н., Дойников А. С., Крупин Б. Н. Метрология. Шкалы, эталоны, практика. Юбилейная серия научных изданий под общей ред. М. В. Балаханова. М.: ВНИИФТРИ, 2004.
17. Чернышев С. Л. Фигурные числа: Моделирование и классификация сложных объектов. М.: Красанд, 2015. 400 с.
18. Пфанцгаль И. Теория измерений / Пер. с нем. М.: Мир, 1976.
19. Стахов А. П. Введение в алгоритмическую теорию измерений. М.: Советское радио, 1977.
20. Векилов Ю. Х., Черников М. А. Квазикристаллы // Успехи физических наук. 2010. Т. 180. № 6. С. 561–586.
21. Исаев Л. К., Чернышев С. Л. Выявление взаимосвязи шкал, характеризующих количественные и качественные свойства сложных объектов, на основе нумерации // Метрология. 2012. № 12. С. 3–12.
22. Negadi T., Kibler M., *International Journal of Quantum Chemistry*, 1996, vol. 57, no. 1, pp. 53–61. <http://arxiv.org/abs/atom-ph/9512001v1>. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-461X\(1996\)57:13.0.CO;2-Y](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-461X(1996)57:13.0.CO;2-Y)
23. Чернышев С. Л., Чернышев Л. С. Сверхрешетки и фигурные числа в модели системы обработки сигналов и восприятия цвета // Журнал радиоэлектроники. 2013. № 12. С. 18.
24. Лорд Э. Э., Маккей А. Л., Ранганатан С. Новая геометрия для новых материалов. / Пер. с англ. к.х.н. Л. П. Мезенцевой, под ред. В. Я. Шевченко, В. Е. Дмитриенко. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 264 с.

References

1. Mendeleyev D. I., *Periodicheskiy zakon. Osnovnye stat'i. "Classiki nauki"*, Moscow, AN SSSR Publ., 1958, pp. 529–554 (in Russian).
2. Chernyshev S. L., *Chetyre izmereniya Periodicheskoy systemy elementov*, Moscow, LENAND Publ., 2019, 332 p. (in Russian).
3. Scerri E. R., *American Scientist*, 2008, vol. 96, pp. 52–58. <https://doi.org/10.1511/2008.69.52>

4. Mario Gliozzi, *STORIA della FISICA*, Torino, 1965.
5. Tarbeev Yu. V., Trunov N. N., Lobashev A. A., Kukhar' V. V., *Measurement Techniques*, 2001, vol. 44, no. 9, pp. 944–952. <https://doi.org/10.1023/A:1013263823125>
6. Penrose R., *The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds and The Laws of Physics*, Oxford Univ., 1989, 480 p.
7. Mendeleyev D. I., *Zavetnye mysli*, Moscow, Golos-Press Publ., 2009, pp. 382–383 (in Russian).
8. Korableva T. P., Korol'kov D. V., *Vestnik MGU. Ser. 2. Chemistry*, 2002, vol. 43, no. 2, pp. 113–116.
9. Mendeleyev D. I., *Periodicheskaya zakonnost' khimicheskikh elementov. Faraday Discussions in London Chemical Society (23 May – 4 June 1889)*, Moscow, AN SSSR Publ., 1958, pp. 208–236.
10. Scerri E. R., Edwards J., *Foundations of Chemistry* 3: 183–196, 2001. <https://doi.org/10.1023/A:1011458803337>
11. Kadomtsev B. B., *Dinamica I informatsiya*, Moscow, Uspekhi fizicheskikh nauk Publ., 1997, 400 p.
12. Kibler M. R., *Foundations of Chemistry*, 2007, no. 9, pp. 221–234. arXiv:quant-ph/0611287 . <https://doi.org/10.1007/s10698-007-9039-9>
13. Pontryagin L. S., *Obobshcheniya chisel*, Moscow, Nauka Publ., 1986 (in Russian).
14. Chernyshev S. L., Chernyshev L. S., *Measurement Techniques*, 2006, vol. 49, pp. 1171–1178. <https://doi.org/10.1007/s11018-006-0256-8>
15. Isaev L. K., Chernyshev S. L., *Nelineinyi mir*, 2007, no. 10–11, vol. 5, pp. 705–711 (in Russian).
16. Bryansky L. N., Doynikov A. S., *Metrologia. Shkaly, etalony, praktika*, VNIIFTRI Publ., 2004 (in Russian).
17. Chernyshev S. L., *Figurnye chisla: Modelirovanie i klassifikatsiya slozhnykh ob'ektov*, Moscow, KRASAND Publ., 2015, 400 p. (in Russian).
18. Pfanzagl I., *Theory of measurement*, Wiirzburg, Wien, 1971.
19. Stakhov A. P., *Vvedeniye v algoritmicheskuyu teoriyu izmereniy*, Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1977 (in Russian).
20. Vekilov Yu. Kh., Chernikov M. A. *Kvazikristally, Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2010, vol. 180, no. 6, pp. 561–586 (in Russian).
21. Isaev L. K., Chernyshev S. L., *Metrologiya*, 2012, no. 12, pp. 3–12 (in Russian).
22. Negadi T., Kibler M., *International Journal of Quantum Chemistry*, 1996, vol. 57, no. 1, pp. 53–61. <http://arxiv.org/abs/atom-ph/9512001v1> . [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-461X\(1996\)57:13.0.CO;2-Y](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-461X(1996)57:13.0.CO;2-Y)
23. Chernyshev S. L., Chernyshev L. S., *Journal of Radio Electronics*, 2013, no. 12, p. 18.
24. Lord E., Mccay A., Ranganatan S., *New Geometries for New Materials*, Cambridge, 2006.

Дата поступления: 03.06.2020.

Дата принятия: 06.07.2020.

The Periodic Table: between the Past and the Future

Sergey L. Chernyshev¹, Lev K. Isaev², Alexander D. Kozlov²

¹Moscow, Russian Federation, e-mail: nature@front.ru

²All-Russian Research Institute of Metrological Service, Moscow, Russian Federation, e-mail: isaev-vm@vniims.ru, kozlov@vniims.ru

Possibilities of the Periodic Table exploration are considered. It is shown that the four-valued logic of quantum measurements may be used for the classification of chemical elements. The application of the quantum scales with information on the position of chemical elements with the known sequence numbers inside them allows to find the new aims for metrological investigations and to develop new approaches in the quantum metrology.

Key words: Periodic Table (PT), four-valued logic, quantum measurements, classification, quantum scales.

Алгоритмизация вычисления фрактальных параметров рельефа шероховатой поверхности по ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014

Б. Н. Марков, Д. А. Мастеренко, П. Н. Емельянов, В. И. Телешевский

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Российская Федерация,
e-mail: bnmarkov@rambler.ru, metrologycenter@gmail.com, pemelyan@rambler.ru, vitel@stankin.ru

Описано применение методов фрактальной геометрии для характеристики свойств поверхностей материалов и изделий. Рассмотрена терминология стандарта ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014 «Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Ареал. Ч. 2. Термины, определения и параметры структуры поверхности». Представлены функции, предусмотренные стандартом для вычисления фрактальной размерности, описаны алгоритмы их вычисления в среде Mathcad. Приведён пример вычислений по результатам измерений высот неровностей поверхности концевой меры длины, полученным с помощью атомного силового микроскопа.

Ключевые слова: поверхность, фрактал, фрактальная размерность, Mathcad, функция масштаба-объёма, функция относительной площади, диагностика, режущий инструмент.

Введение. В последние годы уделяется большое внимание методам фрактальной геометрии применительно к описанию свойств поверхностей материалов, механически обработанных [1–3] или полученных в результате облучения сильноточными электронными и ионными пучками [3, 4], поверхностей композиционных материалов (нанокомпозитов) [5], поверхностей разрушения изделий [6]. Также методы фрактальной геометрии востребованы при анализе особенностей электромагнитных полей после их рассеивания фрактальной шероховатой поверхностью [7], при решении трибологических задач для определения параметров контактного взаимодействия поверхностей с учётом их шероховатости [8].

Задача диагностики режущего инструмента актуальна в настоящее время [9–16]. В машиностроительном производстве для диагностики состояния, в частности степени изношенности, режущего инструмента можно использовать фрактальные характеристики его поверхности. При изучении профилей режущих кромок по данным морфологической фильтрации и построении масштабно-зависимых закономерностей установлено, что структура кромки фракталоподобная и по мере износа изменяется фрактальная размерность кромки [17].

Широкое распространение фрактальных методов вызывает необходимость унификации количественного описания поверхностей как фракталов. В международном стандарте ISO 25178-2:2012 “Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Areal – Pt. 2: Terms, definitions and surface texture parameters” и его российской версии ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014 «Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Ареал. Ч. 2. Термины, определения и параметры структуры поверхности» впервые введены в рассмотрение фрактальные параметры шероховатой поверхности и установлены способы их вычисления по данным измерений. К сожалению,

понимание российской версии ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014 стандарта ISO 25178-2:2012 затрудняется тем, что перевод на русский язык выполнен с некоторыми недостатками, которые будут прокомментированы в настоящей статье.

Основной характеристикой фрактального объекта является его размерность. Интуитивно эту характеристику можно представить при описании поверхности как «изрезанной», «смятой», «неровной», «нерегулярной». При этом важно, что увеличение масштаба рассмотрения поверхности не приводит к её выравниванию, как это имеет место для обычных поверхностей. Достаточно малый участок обычных поверхностей слабо отличается от плоскости, вследствие чего становится возможным ввести понятие площади. Вид фрактальной поверхности при увеличении масштаба всё равно остаётся примерно таким же «смятым» и «изрезанным», в чём проявляется важное свойство фракталов – самоподобие.

Следствием самоподобного характера фрактальной поверхности является невозможность приписать ей какую-либо конечную площадь. Получается, что фрактальная поверхность заполняет пространство в большей степени, чем обычная двумерная поверхность, хотя и в меньшей, чем объёмное, трёхмерное множество. Конечная мера, которую можно сопоставить с размерностью фрактальной поверхности, должна выражаться не квадратными или кубическими единицами длины, а единицами длины в промежуточной степени. Эта степень представляет собой дробную фрактальную размерность. В ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014 вводятся структурные функции, позволяющие оценить размерность фрактальной поверхности согласно определениям Хаусдорфа–Безиковича или Минковского–Булиганда.

Цель настоящей статьи – представить методику вычисления фрактальных параметров шероховатости поверхности

с использованием стандартного программного комплекса Mathcad, а также уточнить перевод некоторых терминов в ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014.

Вычисление фрактальной размерности с помощью функции масштаба-объёма. Анализ фрактальных характеристик поверхности связан с её последовательным рассмотрением в различных размерных масштабах, характеризуемых параметром «масштаб длины наблюдения» (ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014, п. 4.4.9.3). Из этого названия не следует, что наблюдение поверхности проводится на какой-то определённой длине. Здесь речь идёт именно о размерах участков поверхности, на которых рассматриваются метрические свойства поверхности, от относительно больших до наименьших, доступных для изучения. Масштаб с длины наблюдения является аргументом функций масштаба-объёма и относительной площади.

Функция масштаба-объёма. Эта функция обозначается $Svs(c)$ или $S_{vs}(c)$ (volume-scale function – объёмно-масштабная функция, см. п. 4.4.9.1) и определяется с помощью понятий морфологического открытия и закрытия рассматриваемой поверхности, полученных для структурирующего элемента – горизонтального квадратного участка плоскости. Длина стороны квадрата в данном случае будет масштабом с длины наблюдения.

Рассмотрим поверхность, представленную матрицей Z дискретных отсчётов высот в узлах сетки с одинаковыми шагами Δx по обоим горизонтальным координатам. При анализе измерительной информации об этой поверхности, для построения морфологического открытия (нижней огибающей) и закрытия (верхней огибающей) анализируют всевозможные подматрицы размером $k \times k$ при нечётном k с центрами в каждом узле сетки. При этом масштаб длины наблюдения определяется как

$$c = (k-1)\Delta x.$$

Если узел ближе к краю сетки, чем на $(k-1)/2$ шагов, то матрица с соответствующей стороны урезается. Наибольший отсчёт высоты в пределах подматрицы даёт элемент верхней огибающей, а наименьший – элемент нижней огибающей.

В среде Mathcad функция $UpperEnv(DD, k)$, по которой строится верхняя огибающая по описанной схеме, реализуется в виде

$$UpperEnv(DD, k) := \begin{cases} k1 \leftarrow floor\left(\frac{k-1}{2}\right) \\ Nr \leftarrow rows(DD) \\ Nc \leftarrow cols(DD) \\ \text{for } r \in 0 \dots Nr-1 \\ \quad \text{for } c \in 0 \dots Nc-1 \\ \quad \quad r1 \leftarrow \max(0, r-k1) \\ \quad \quad r2 \leftarrow \min(Nr-1, r1+k1) \\ \quad \quad c1 \leftarrow \max(0, c-k1) \\ \quad \quad c2 \leftarrow \min(Nc-1, c1+k1) \\ \quad \quad SD \leftarrow submatrix(DD, r1, r2, c1, c2) \\ \quad \quad UE_{r,c} \leftarrow \max(SD) \\ UE \end{cases}$$

Здесь DD – формальный параметр функции, на место которого при вызове подставляется фактический параметр – матрица высот.

Аналогично реализуется и функция построения нижней огибающей $LowerEnv(DD, k)$ с заменой в предпоследней строке функции $\max$ на $\min$. После построения обеих огибающих вычисляется $EnvVol(DD, k)$ – объём пространства, заключённого между огибающими:

$$EnvVol(DD, k) := \begin{cases} UE \leftarrow UpperEnv(DD, k) \\ LE \leftarrow LowerEnv(DD, k) \\ Nc \leftarrow cols(DD) \\ Nr \leftarrow rows(DD) \\ VC \leftarrow (\Delta x)^2 \cdot \sum_{r=0}^{Nr-1} \sum_{c=0}^{Nc-1} (UE_{r,c} - LE_{r,c}) \\ VC \end{cases}$$

Затем задаётся функция масштаба-объёма:

$$Svs(c) := \begin{cases} k \leftarrow floor\left(\frac{c}{\Delta x}\right) \\ SV \leftarrow EnvVol(Z, k) \text{ if } k \geq 3 \\ SV \leftarrow 0 \text{ otherwise} \\ SV \end{cases} \quad (1)$$

В последней функции значение масштаба длины наблюдения округляется до целого числа шагов сетки, которое должно быть не менее трёх. Если данное условие не выполняется, то функция возвращает нуль, что приводит к ошибке при дальнейшем логарифмировании.

По графику функции $Svs(c)$, построенному в двойном логарифмическом масштабе, можно определить параметр $Svfc(c)$, $S_{vfc}(c)$, названный в ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014, п. 4.4.9.4 «сложность фрактала объёма». Авторы настоящей статьи считают, что точнее смысл соответствующего англоязычного термина передаётся выражением «объёмная сложность фрактала». Этот параметр определяется как увеличенный в 1000 раз тангенс угла наклона (в ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014 указан «угол наклона» – ещё один недостаток перевода) рассматриваемого графика. По объёмной сложности уже непосредственно определяется фрактальная размерность D_f или D_f (см. ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014, Приложение В):

$$D_f = \lim_{s \rightarrow 0} \left\{ 3 - \frac{d(\log_e[F(s)])}{d[\log_e(s)]} \right\}. \quad (2)$$

Формула (2) с практической точки зрения имеет ограниченный смысл, поскольку масштаб длины наблюдения не может быть уменьшен до нуля. При этом логарифмическая производная в (2) – это и есть тангенс угла наклона графика в двойных логарифмических координатах. Таким образом, фрактальная размерность оценивается по формуле

$$D_f = 3 - Svfc/1000, \quad (3)$$

где $Svfc$ – объёмная сложность фрактала на интересующем участке графика функции масштаба-объёма (т. е. в интересующем диапазоне масштабов).

График истинного фрактала становится прямой линией при неограниченном уменьшении масштаба наблюдения, в этом случае использование формулы (2) имеет смысл.

В ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014 не обоснован выбор объёма между верхними и нижними огибающими функции масштаба-объёма. В списке литературы к стандарту имеется ссылка на книгу [18]. В [18], как и в множестве других источников по фракталам, дано определение размерности Минковского–Булиганда и отмечена её эквивалентность так называемой клеточной размерности, но ничего не сказано про объём между огибающими и морфологические операции.

Для определения клеточной размерности требуется при каждом масштабе наблюдения разбить матрицу высот на блоки (подматрицы) одинакового размера и подсчитать количество необходимых для покрытия всех точек поверхности прямоугольных параллелепипедов, имеющих в основании прямоугольник, равный блоку, и одинаковую высоту. При переходе к меньшему масштабу наблюдения высота параллелепипедов уменьшается пропорционально изменениям горизонтальных размеров блока. При уменьшении масштаба наблюдения количество покрывающих параллелепипедов («клеток») возрастает пропорционально c^{-D} , где D – фрактальная размерность, а их общий объём – пропорционально c^{3-D} .

Вместо подсчёта клеток, очевидно, можно подсчитывать объём, заключённый в пределах каждого блока между плоскостями, проведёнными на наибольшей и наименьшей высотах, и суммировать все такие объёмы. Общий объём будет отличаться от результата функции (1), но характер изменения объёма при изменении масштаба наблюдения должен быть таким же.

В среде Mathcad для вычисления клеточной размерности можно записать три функции: функцию $BlockVol(DD)$ для вычисления объёма в пределах одного блока; функцию $CellVol(DD, k)$ для вычисления общего объёма «клеток» при разбиении на блоки размером $k \times k$; функцию $Svs(c)$ масштаба-объёма для клеточной размерности соответственно:

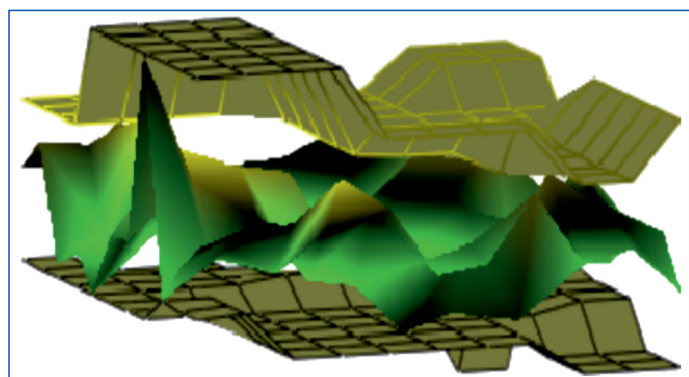


Рис. 1. Фрагмент исследуемой поверхности и её верхней и нижней огибающих

Fig. 1. A fragment of the studied surface with its upper and lower envelopes

$$BlockVol(DD) := \begin{cases} cc \leftarrow cols(DD) \\ rr \leftarrow rows(DD) \\ VB \leftarrow (max(DD) - min(DD)) \cdot rr \cdot cc \\ VB \end{cases}$$

$$CellVol(DD, k) := \begin{cases} MaxCol \leftarrow cols(DD) - k \\ MaxRow \leftarrow rows(DD) - k \\ CV \leftarrow 0 \\ r1 \leftarrow 0 \\ \text{while } r1 \leq MaxRow \\ \quad c1 \leftarrow 0 \\ \quad \text{while } c1 \leq MaxCol \\ \quad \quad CV \leftarrow CV + BlockVol(DD, r1, r1+k-1, c1, c1+k-1) \\ \quad \quad c1 \leftarrow c1 + k \\ \quad \quad r1 \leftarrow r1 + k \\ CV \leftarrow CV \cdot (\Delta x)^2 \\ CV \end{cases}$$

$$Svs(c) := \begin{cases} k \leftarrow floor\left(\frac{c}{\Delta x}\right) \\ SV \leftarrow CellVol(Z, k) \text{ if } k \geq 2 \\ SV \leftarrow 0 \text{ otherwise} \\ SV \end{cases} \quad (4)$$

По наклону графика функции (4) в двойных логарифмических координатах определяются объёмная сложность фрактала и фрактальная размерность. Для истинных фракталов оба способа определения объёмной сложности фрактала и фрактальной размерности – по графику функции (1) и по графику функции (4) – теоретически должны приводить к одному и тому же результату. На практике же результаты зависят от доступного диапазона масштабов, то есть от размера и разрешения картины высот. При этом необходимо учитывать следующие замечания:

вычисление функции (4) происходит значительно быстрее, чем построение огибающих, и разница тем заметнее, чем больше размер матрицы высот;

для построения зависимости масштаб-объём по формуле (1) можно использовать любые масштабы наблюдения, соответствующие нечётным размерам блоков, тогда как использование функции (4) возможно лишь для блоков, размеры которых являются делителями размера матрицы высот;

на графике функции масштаба-объёма, построенном в соответствии с рекомендациями из ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014, можно получить больше точек, что, в свою очередь, позволяет определить объёмную сложность фрактала с меньшей неопределённостью (это вытекает из предыдущего замечания).

Таким образом, можно рекомендовать использовать функцию (4) для экспресс-анализа данных относительно большого разрешения и объёма. Полученные выводы или закономерности должны быть верифицированы при помощи функции (1), полностью соответствующей ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014.

Следующее замечание касается горизонтальных и вертикальных масштабов измеренных координат точек поверхности. При работе с функциями масштаба-объёма абсолютные масштабы совершенно не важны, а масштабы и разрешения данных по горизонтальным и вертикальным координатам могут быть выбраны независимо. Если все значения высот

умножить на одно и то же число, то и все объёмы умножатся на то же самое число, однако наклон графика в двойных логарифмических координатах от этого совершенно не изменится. То же самое верно и в отношении горизонтального масштаба. Здесь важно лишь, чтобы шаги сетки по обоим горизонтальным координатам были одинаковыми, но абсолютное значение этого шага не оказывает влияния на оценку объёмной сложности фрактала. В частности, можно убрать в соответствующих местах из приведённых выше функций умножение на $(\Delta x)^2$ при вычислении объёмов и анализировать зависимость непосредственно от размера k блока.

Функции масштаба-объёма в силу допустимой независимости масштабов горизонтальных и вертикальных координат можно также применять при фрактальном анализе сигналов и полей различной природы, в том числе случайных, у которых третья координата представляет собой иную физическую величину.

Пример вычислений фрактальной размерности на основе функции масштаба-объёма. Исследуем участок поверхности концевой меры длины размером 100×100 мкм с дискретностью отсчёта по обоим горизонтальным координатам $\Delta x = 1$ мкм и высотами в единицы–десятки нанометров, изображение которого получено с помощью атомного силового микроскопа [19]. Заметим, что массив размером 101×101 точек является довольно малым для фрактального анализа, поэтому приведённые далее конкретные значения параметров носят скорее иллюстративный характер.

На рис. 1 показаны часть исследуемого участка поверхности концевой меры размером 10×10 мкм, её верхняя и нижняя огибающие, рассчитанные при ширине окна $s = 7$ мкм.

Для построения графика функции масштаба-объёма зададим массив значений размеров блоков, при которых выполняются вычисления, например:

$$Ks := (3, 5, 9, 11, 15, 17, 21, 25, 33, 45, 65)^T.$$

Затем найдём диапазон индекса и вычислим вектор значений функции:

$$i1 := 0..rows(Ks)-1 \quad Sv_{i1} := EnviVol(D, Ks_{i1}).$$

В данном случае анализируется зависимость функции масштаба-объёма непосредственно от размера блока в точках, а не в единицах длины, а соответствующий линейный размер составит $k-1$ дискрет. График функции масштаба-объёма в двойных логарифмических координатах приведён на рис. 2.

В области малых размеров блоков график близок к прямой линии, поэтому можно говорить о фракталоподобности поверхности в соответствующем диапазоне масштабов. Найдём объёмную сложность фрактала через угловой коэффициент наклона графика на этом участке:

$$Ks := (3, 5, 9, 11)^T,$$

$$Svfc := 1000 \cdot slope(\log(Ks-1), Sv), \quad Svfc = 539,$$

$$Df := 3 - \frac{Svfc}{1000}, \quad Df = 2,461.$$

Чтобы применить функцию масштаба-объёма в виде (4), необходимо задать размеры блоков, служащие делителями размера всей матрицы высот. Число 100 имеет всего четыре делителя. Однако небольшое уменьшение размеров до 96 дискрет даёт возможность использовать следующие размеры блоков:

$$Ks := (2, 3, 4, 6, 8, 12, 16, 24, 32, 48)^T.$$

Этот же приём следует использовать далее при анализе относительной площади.

Вычисления функции (4) в диапазоне масштабов, аналогичном использованному выше, то есть (4, 6, 8, 16), дают значения $Svfc = 553$ и $Df = 2,447$, что близко к предыдущей оценке $Df = 2,461$.

Вычисление фрактальной размерности с помощью функции относительной площади. Функция относительной площади $S_{rel}(c)$ или $Srel(c)$ (ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014, п. 4.4.9.2) определяется как отношение действительной площади поверхности исследуемого участка поверхности изделия в рассматриваемом масштабе к номинальной площади этого участка как двухмерного объекта в зависимости от масштаба длины наблюдения. Действительной считается площадь покрытия поверхности треугольными плитками, размер которых соответствует выбранному масштабу.

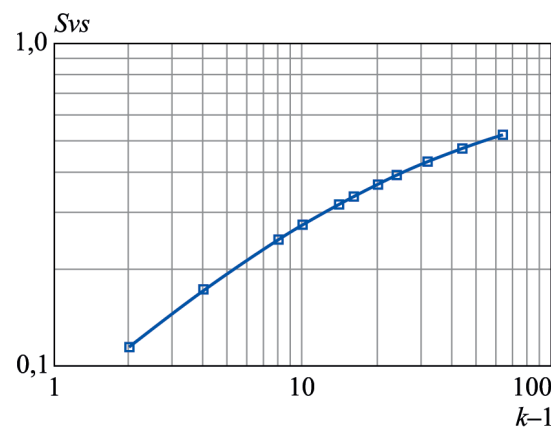


Рис. 2. График функции масштаба-объёма в двойных логарифмических координатах; $Svs(k)$ – функция масштаба-объёма, k – делитель размера матрицы высот точек рельефа шероховатой поверхности

Fig. 2. Graph of the volume-scale function in double logarithmic coordinates; $Svs(k)$ – volume-scale function; k – divisor of the size of the matrix of heights of rough surface points

Для вычисления действительной площади требуется снова разбить матрицу высот на квадратные блоки размером $k \times k$, где k – делитель размера матрицы.

Рассмотрим квадрат со стороной k дискрет и координатами левого нижнего угла $(x_{n(k-1)}, y_{m(k-1)})$. Из углов этого квадрата проведём прямые линии вдоль оси высот до пересечения с исследуемой шероховатой поверхностью. В результате получим точки A, B, C, D (против часовой стрелки, если смотреть сверху), не лежащие в одной плоскости. Для вычисления площади покрытия шероховатой поверхности в пределах данного блока следует вычислить и сложить площади треугольников ABC и ADC , а суммирование по всем таким блокам даст общую площадь покрытия.

Приведём функции Mathcad, позволяющие выполнить описанные операции. Площадь треугольника будет вычисляться по формуле Герона:

$$\text{HeronArea}(a,b,c) := \begin{cases} \text{HalfP} \leftarrow \frac{(a+b+c)}{2} \\ \text{Ar} \leftarrow \sqrt{\text{HalfP} \cdot (\text{HalfP}-a)(\text{HalfP}-b)(\text{HalfP}-c)} \end{cases}$$

Для подстановки в функцию Герона аргументов – длин сторон треугольника – потребуется функция их вычисления:

$$\text{LineLen}(x1, y1, z1, x2, y2, z2) := \sqrt{(x1-x2)^2 + (y1-y2)^2 + (z1-z2)^2}. \quad (5)$$

Две предыдущие функции подставляют в функцию для расчёта площади треугольника по координатам его вершин:

$$\text{TrngArea}(x1,y1,z1,x2,y2,z2,x3,y3,z3) := \begin{cases} a \leftarrow \text{LineLen}(x1,y1,z1,x2,y2,z2) \\ b \leftarrow \text{LineLen}(x2,y2,z2,x3,y3,z3) \\ c \leftarrow \text{LineLen}(x3,y3,z3,x1,y1,z1) \\ \text{TA} \leftarrow \text{HeronArea}(a, b, c) \end{cases}$$

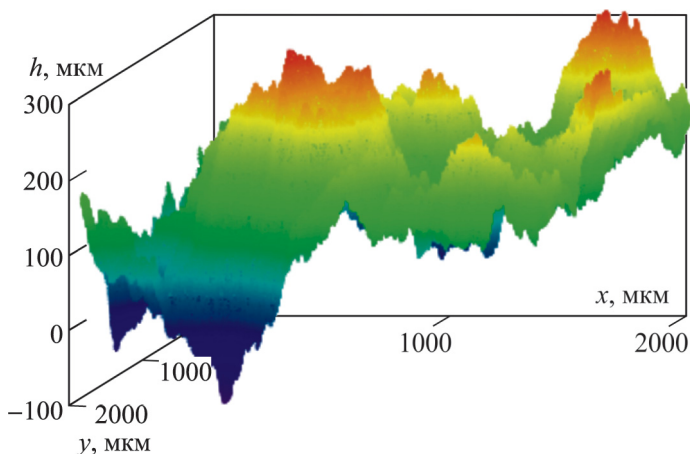


Рис. 3. Смоделированная фракталоподобная поверхность

Fig. 3. Simulated fractal-like surface

Функция для вычисления суммарной площади двух треугольников в пределах блока имеет вид

$$\text{Sq1Area}(DD) := \begin{cases} lx \leftarrow \text{cols}(DD)-1 \\ ly \leftarrow \text{rows}(DD)-1 \\ \text{SA} \leftarrow \text{TrngArea}(0, 0, DD_{0,0}, 0, lx, DD_{0,lx}, ly, 0, DD_{ly,0}) \\ \text{SA} \leftarrow \text{SA} + \text{TrngArea}(ly, lx, DD_{ly,lx}, 0, lx, DD_{0,lx}, ly, 0, DD_{ly,0}) \end{cases}$$

Итоговая функция для расчёта относительной площади для массива высот при разбиении на блоки размером $k \times k$:

$$\text{Srel}(DD, k) := \begin{cases} \text{NCols} \leftarrow \text{cols}(DD)-1 \\ \text{NRows} \leftarrow \text{rows}(DD)-1 \\ \text{Ar} \leftarrow 0 \\ r1 \leftarrow 0 \\ \text{while } r1 < \text{NRows} \\ \quad c1 \leftarrow 0 \\ \quad \text{while } c1 < \text{NCols} \\ \quad \quad \text{Ar} \leftarrow \text{Ar} + \text{Sq1Area}(\text{submatrix}(DD, r1, r1+k, c1, c1+k)) \\ \quad \quad c1 \leftarrow c1+k \\ \quad \quad r1 \leftarrow r1+k \\ \quad \text{Ar} \leftarrow \frac{\text{Ar}}{\text{NRows} \cdot \text{NCols}} \\ \text{Ar} \end{cases}$$

График функции относительной площади также строится в двойных логарифмических координатах. Его наклон в некотором диапазоне масштабов отрицателен. Тангенс угла наклона, умноженный на -1000 , называется «сложность фрактала ареала» S_{afc} , S_{afc} (ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014, п. 4.4.9.5). С точки зрения авторов настоящей статьи, более верный перевод термина “areal fractal complexity” из ISO 25178-2:2012 – «ареальная, или площадная, сложность фрактала».

Ареальная сложность тоже связана с фрактальной размерностью, однако здесь надо проявить осторожность. Соответствующая формула указана только в Приложении В к ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014, причём без достаточно подробных пояснений, хотя из приведённого там примера графика видно, что по горизонтальной оси отложен логарифм квадрата длины наблюдения. При этом фрактальная размерность определяется как

$$D_f = 2 + 2 \frac{S_{afc}}{1000}, \quad (6)$$

где S_{afc} вычислена именно по графику относительной площади в зависимости от квадрата длины наблюдения.

Для функции относительной площади большое значение имеет соотношение разрешений и характерных изменений по горизонтальным и вертикальной координатам: эти параметры должны быть близкими, в противном случае фрактальные свойства поверхности с помощью данной функции выявить не удастся. Отметим, что для истинных фракталов при доступности сколь угодно малых масштабов наблюдения

формулы (3) и (6) должны давать один и тот же результат. Так, в рассмотренном выше примере измерений концевой меры длины дискретность отчёта по обеим горизонтальным координатам составляет 1 мкм, а высота измеряется в долях нанометра, поэтому длины отрезков, вычисляемые функцией (5), очень слабо зависят от вертикальных координат точек, и функция относительной площади мало отличается от единицы во всём доступном диапазоне масштабов.

Пример применения функции относительной площади для моделированного массива измерений. Массив измерений состоит из 2048×2048 дискрет по горизонтальным координатам (рис. 3). Делителями числа $2048 = 2^{11}$ являются все меньшие степени двух, и только они. Значения относительной площади для всех размеров блока $k = 2^m$, $m = 0, 1, \dots, 11$, графически изображены в двойных логарифмических координатах на рис. 4. На рис. 4 есть три существенно различных участка. Участок I аналогичен графику, получаемому по результатам измерения высот неровностей поверхности концевой меры длины: функция изменяется очень мало, и в соответствующем диапазоне масштабов поверхность можно рассматривать как обычную двумерную. На участке II зависимость близка к линейной – имеет место фракталоподобное поведение. Участок III – переходный между первыми двумя. Отсюда становится понятен смысл ещё одного параметра – «масштаб перехода от гладкой к шероховатой поверхности» f_{SRC} (ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014, п. 4.4.9.7). В качестве этого параметра можно принять середину диапазона масштабов участка III графика на рис. 4. Значение функции относительной площади при соответствующей длине наблюдения в стандарте называется «порог» T_h , Th (ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014, п. 4.4.9.8). Понятия масштаба перехода и порога используются также и для функции масштаба-объёма.

Угловой коэффициент графика на участке II (см. рис. 4) для значений $k = 4, 8, 16, 32$, равен $-0,189$, откуда оценка фрактальной размерности составляет $2 + 2 \cdot 0,189 = 2,378$. Применение в данном примере функции масштаба-объёма в виде (4) по тем же значениям k даёт оценку размерности 2,406. Обе оценки вычисляются в течение нескольких секунд даже для массива таких размеров.

Анализ на основе функции масштаба-объёма в полном соответствии со стандартом по размерам блоков (5, 15, 33, 65) занимает около 15 мин. По-видимому, это объясняется не только объёмом вычислительных операций, но и особенностями работы в среде Mathcad с памятью (индексация элементов массивов, а также реальное копирование данных с места на место при выполнении функции submatrix). Оценка размерности в этом случае равна 2,428. Все три значения довольно близки между собой.

Закключение. Приведенные в настоящей статье функции можно непосредственно использовать при вычислении фрактальных параметров согласно ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014 в среде Mathcad. Функция относительной площади вычисляется быстрее, чем функция масштаба-объёма, но требует одинакового разрешения по горизонтальным и вертикальным координатам. Масштабно-объёмный анализ может

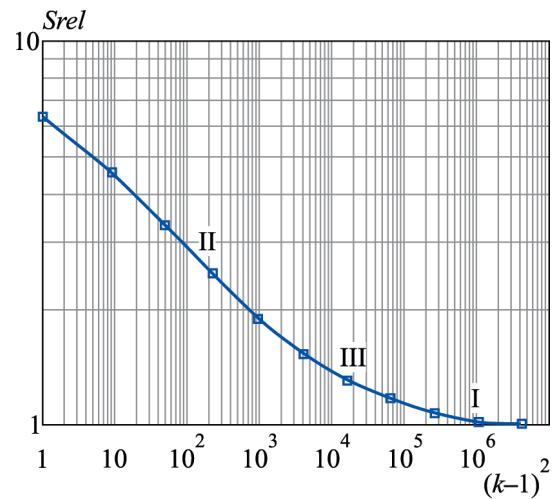


Рис. 4. График функции относительной площади смоделированной поверхности:

$Srel$ – функция относительной площади; I (слабая зависимость), II (значительная зависимость, близкая к линейной), III (переходный характер зависимости между участками I, II) – участки кривой с различным характером зависимости относительной площади от масштаба длины наблюдения

Fig. 4. Graph of the relative area function of the simulated surface: $Srel$ – relative area function; I (weak dependence), II (significant dependence, close to linear), III (transitional nature of the dependence between I and II) – areas with different character of the relative area dependence on the length scale of observation

также выполняться при помощи версии функции, использующей определение «клеточной размерности», производящей вычисления гораздо быстрее, чем по определению из ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014 и, как правило, дающей близкие результаты.

Лучшему пониманию терминологии, применяемой в ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014, способствуют переводы терминов “volume fractal complexity” – «объёмная сложность фрактала», “areal fractal complexity” – «ареальная, т. е. площадная, сложность фрактала».

Список литературы

1. Потапов А. А. Шероховатость и фракталы // Сборник материалов IV Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» DFMN-2011 (Москва, 25 – 28 октября 2011 г.). 2011. С. 953–955.
2. Бавыкин О. Б., Вячеславова О. Ф. Взаимосвязь свойств поверхности и её фрактальной размерности // Известия МГТУ «МАМИ». 2013. Т. 1. № 1 (15). С. 14–18.
3. Григорьев А. Я. Физика и микрогеометрия технических поверхностей. Минск: Белорусская наука, 2016. 247 с.
4. Алтайский М. В., Иванов В. В., Коренев С. А., Орелович О. Л., Пузынин И. В., Черник В. В. Образование фрактальных структур на поверхности материалов, облучаемых

сильноточными электронными и ионными пучками // Краткие сообщения ОИЯИ. 1997. № 2 (82). С. 37–46.

5. Maraeva E. V., Averin I. A., Istomina M. S., Moshnikov V. A., Nalimova S. S., Pronin I. A., and Semenov K. N., *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, vol. 741, no. 1, p. 012185. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/741/1/012185>

6. Савенков Г. Г., Барахтин Б. К. Связь фрактальной размерности поверхности разрушения с комплексом стандартных характеристик материала на растяжение // Прикладная механика и техническая физика. 2011. Т. 52. № 6. С. 177–184.

7. Потапов А. А., Лактюшкин А. В. О статистических свойствах поля, рассеянного фрактальной шероховатой поверхностью // Труды Международной научной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн «ИРЭМВ, 2007», Таганрог, 25–30 июня 2007. Таганрог, 2007. Т. 1. С. 435–440.

8. Тихомиров В. П., Измеров М. А. Контактная механика фрактальных поверхностей // Вестник Брянского государственного технического университета. 2015. № 1 (45). С. 60–66.

9. Григорьев А. С. Инструментарий системы ЧПУ для диагностики и прогнозирования износа режущего инструмента в реальном времени при токарной обработке // Вестник МГТУ «Станкин». 2012. № 1 (18). С. 34–43.

10. Martinova L. I., Sokolov S. V., and Grigoryev A. S., *Automation and Remote Control*, 2012, vol. 73, no. 4, pp. 742–749. <https://doi.org/10.1134/S0005117912040133>

11. Ait Sghir Khalid, El Badaoui Mohamed, Francois Guillet, Driss Aboutajdine and Jean-Paul Dron, *Mechanics & Industry*, 2014, vol. 15, no. 6, pp. 497–507. <https://doi.org/10.1051/meca/2014052>

12. Wang G. F., Yang Y. W., Zhang Y. C., and Xie Q. L., *Sensors and Actuators A: Physical*, 2014, vol. 209, pp. 24–32. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2014.01.004>

13. Козочкин М. П., Гуринов В. Д., Кочеткова А. И. Влияние СОТС на износ цилиндрических фрез и его отображение в виброакустическом сигнале // Вестник МГТУ «Станкин». 2014. № 4 (31). С. 113–118.

14. Потапов К. Г., Сырицкий А. Б. Оценка износа резца на основе измерения неравномерности вращения шпинделя токарного станка // Вестник МГТУ «Станкин». 2014. № 4 (31). С. 107–112.

15. Maia L. H. A., Abrao A. M., Vasconcelos W. L., Sales W. F., and Machado A. R., *Tribology International*, 2015, vol. 92, pp. 519–532. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.07.024>

16. Зверев И. А., Фокин П. В. Тепловое состояние режущей части инструмента при точении труднообрабатываемых материалов // Вестник МГТУ «Станкин». 2017. № 4 (43). С. 52–58.

17. Мастеренко Д. А., Скопцов Э. С. Применение методов морфологической фильтрации в задаче диагностики состояния поверхности режущего инструмента // Измерительная техника. 2019. № 11. С. 24–30. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-11-24-30>

18. Лич Р. Инженерные основы измерений нанометрической точности. Учебное издание: Пер. с англ. Е. В. Заблочной, А. В. Заблочного. Долгопрудный: Долгопрудненский Издательский дом «Интеллект», 2012. 400 с.

19. Марков Б. Н., Меликова О. Н., Шулёпов А. В. Алгоритм построения морфологического дискового фильтра для анализа шероховатости поверхности // Измерительная техника. 2017. № 5. С. 30–33. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2017-5-30-33>

20. Dubuc B., Zucker S. W., Tricot C., Quiniou J. F., and Wehbi D., *Proceeding of the Royal Society London A*, 1989, vol. 425, no. 1868, pp. 113–127. <https://doi.org/10.1098/rspa.1989.0101>

References

1. Potapov A. A., *Proceedings of the IV International conference “Deformation and destruction of materials and nanomaterials” DFMN-2011*, Moscow, October 25–28, 2011, Moscow, 2011, pp. 953–955.

2. Bavykin O. B., Vyacheslavova O. F., *Izvestiya MSTU “MAMI”*, 2013, vol. 1, no. 1 (15), pp. 14–18 (in Russian).

3. Grigoriev A. Ya., *Fizika i mikrogeometriya tekhnicheskikh poverhnostej*, Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2016. 247 p. (in Russian).

4. Altaisky M. V., Ivanov V. V., Korenev S. A., Orelovich O. L., Puzynin I. V., Chernik V. V., *Brief reports of the Joint Institute for Nuclear Research*, 1997, no. 2 (82), pp. 37–46.

5. Maraeva E. V., Averin I. A., Istomina M. S., Moshnikov V. A., Nalimova S. S., Pronin I. A., and Semenov K. N., *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, vol. 741, no. 1, p. 012185. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/741/1/012185>

6. Savenkov G. G., Barakhtin B. K., *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, December 2011, vol. 52, no. 6, pp. 997–1003. <https://doi.org/10.1134/S0021894411060186>

7. Potapov A. A., Laktyunkin A. V., *Proceedings of the International scientific conference “Radiation and scattering of electromagnetic waves. IREMV, 2007”*, Taganrog, June 25–30, 2007, Taganrog, 2007, vol. 1, pp. 435–440.

8. Tikhomirov V. P., Izmerov M. A., *Bulletin of the Bryansk State Technical University*, 2015, no. 1 (45), pp. 60–66 (in Russian).

9. Grigoriev A. S., *Vestnik MSTU “STANKIN”*, 2012, no. 1 (18), pp. 34–43 (in Russian).

10. Martinova L. I., Sokolov S. V., and Grigoryev A. S., *Automation and Remote Control*, 2012, vol. 73, no. 4, pp. 742–749. <https://doi.org/10.1134/S0005117912040133>

11. Ait Sghir Khalid, El Badaoui Mohamed, Francois Guillet, Driss Aboutajdine and Jean-Paul Dron, *Mechanics & Industry*, 2014, vol. 15, no. 6, pp. 497–507. <https://doi.org/10.1051/meca/2014052>

12. Wang G. F., Yang Y. W., Zhang Y. C., and Xie Q. L., *Sensors and Actuators A: Physical*, 2014, vol. 209, pp. 24–32. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2014.01.004>

13. Kozochkin M. P., Gurin V. D., Kochetkova A. I., *Vestnik MSTU “STANKIN”*, 2014, no. 4 (31), pp. 113–118 (in Russian).

14. Potapov K. G., Siritzky A. B., *Vestnik MSTU "STANKIN"*, 2014, no. 4 (31), pp. 107–112 (in Russian).
 15. Maia L. H. A., Abrao A. M., Vasconcelos W. L., Sales W. F., and Machado A. R., *Tribology International*, 2015, vol. 92, pp. 519–532.
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.07.024>
 16. Zverev I. A., Fokin P. V., *Vestnik MSTU "STANKIN"*, 2017, no. 4 (43), pp. 52–58 (in Russian).
 17. Masterenko D. A., Skoptsov E. S., *Measurement Techniques*, 2020, vol. 62, no. 11, pp. 953–959.
<https://doi.org/10.1007/s11018-020-01718-y>
 18. Leach R., *Fundamental Principles of Engineering Nanometrology*, 2nd Edition, Elsevier, 2014, 384 p.
 19. Markov B. N., Melikova O. N., Shulepov A. V., *Measurement Techniques*, 2017, vol. 60, no. 5, pp. 451–456.
<https://doi.org/10.1007/s11018-017-1216-1>
 20. Dubuc B., Zucker S. W., Tricot C., Quiniou J. F., and Wehbi D., *Proceeding of the Royal Society London A*, 1989, vol. 425, no. 1868, pp. 113–127. <https://doi.org/10.1098/rspa.1989.0101>
- Дата поступления: 03.04.2020.
Дата принятия: 28.04.2020.

Algorithmization of calculation of fractal parameters of rough surface relief according to GOST R ISO 25178-2-2014

Boris N. Markov, Dmitry A. Masterenko, Petr N. Emelyanov, Vladimir I. Teleshevskiy

Moscow State University of Technology "STANKIN" Moscow, Russian Federation, e-mail: bnmarkov@rambler.ru,
metrologycenter@gmail.com, pemelyan@rambler.ru, vitel@stankin.ru

Russian version of the ISO 25178-2:2012 standard is commented. The functions provided by the standard for calculating fractal dimension are considered, and the algorithms for calculating them in the Mathcad environment are described. An example of calculations based on the results of measurements of the height of the surface irregularities of the gauge block obtained using an atomic force microscope is given.

Key words: surface, fractal, fractal dimension, Mathcad, volume-scale function, relative area function, diagnostics, cutting tool.

Измерение эффективности детектирования однофотонных приёмников на основе спонтанного параметрического рассеяния и метода гетеродинирования

А. А. Самойленко, А. Д. Иванов, Г. Г. Левин

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений,
Москва, Российская Федерация, e-mail: asamoylenko@vniiofi.ru,
academi@ya.ru, levin@vniiofi.ru

Рассмотрены вопросы метрологического обеспечения компонентов квантовых информационных систем. Описан приведённый в международном стандарте ETSI референтный метод Клышко, который основан на использовании эффекта спонтанного параметрического рассеяния. Показано, что для детекторов единичных фотонов время измерения увеличивается на порядок при шумах с высокой плотностью мощности на низких частотах, сравнимой с уровнем полезного сигнала. Для повышения эффективности накопления сигнала предложено использовать метод гетеродинирования. Метод заключается в накоплении сигнала на более высокой частоте и введении в стандартную схему Клышко модуляции. Предложенный метод численно смоделирован, экспериментально установлено увеличение отношения сигнал–шум в 14 раз по сравнению с простым накоплением сигнала.

Ключевые слова: спонтанное параметрическое рассеяние, референтная калибровка однофотонных детекторов, гетеродинирование.

Введение. В настоящее время ведутся активные разработки в области квантовых информационных систем – квантовых компьютеров и систем квантового распределения ключей (КРК-систем). Квантовая информатика постепенно переходит из области чисто лабораторных исследований в область прикладных решений. Соответственно, возникает необходимость метрологического обеспечения компонентов квантовых информационных систем. В 2016 г. разработан международный стандарт ETSI, в котором регламентированы методы определения характеристик оптических компонентов КРК-систем. Одной из важнейших характеристик является эффективность детектирования. От этой характеристики, в частности, зависит стойкость КРК-системы к атакам, так как детектирование атаки в таких системах выполняется за счёт контроля малых изменений в отношении сигнал–шум (ОСШ).

Другая характеристика КРК-системы – вероятность генерации двух и более фотонов в одном импульсе. Все используемые в мире КРК-системы в качестве носителя ключа используют сильно ослабленные импульсы лазерного излучения, причём среднее количество фотонов в одном импульсе значительно меньше единицы. Однако из-за вероятностной природы ослабления излучения каждый импульс может нести не только ноль или один, но и два и более фотонов, что создаёт уязвимость канала для недетектируемой атаки. В настоящее время во всём мире ведутся разработки источников однофотонного излучения на основе физических принципов, не позволяющих на фундаментальном уровне генерировать два и

более фотонов одновременно, например, на центрах окраски в алмазе [1, 2]. Такие источники обладают относительно невысокой яркостью, поэтому для промышленного использования необходима разработка методики их аттестации с использованием высокоточных калиброванных детекторов, позволяющих регистрировать сверхмалый (вплоть до 100 Гц) поток истинно одиночных фотонов.

В ETSI описано два метода измерения эффективности детектирования. Первым методом является метод подстановки, при котором сравниваются референсный детектор и измеряемый детектор. В качестве референсного обычно используют калиброванный трап-детектор.

Наиболее распространённое средство калибровки эффективности детектирования однофотонных детекторов – криогенный радиометр. Типичное значение оптической мощности для нормального функционирования криогенного радиометра составляет 1–2 мВт [3]. Для передачи единицы в область малофотонного излучения при калибровке трап-детектора применяют калиброванные нейтральные фильтры. Оптические шкалы основаны на методах криогенной радиометрической замены, поскольку достигнутая неопределённость составляет 0,005 % (на уровне 100 мкВт).

Вторым методом определения эффективности детектирования, приведённым в стандарте ETSI, является референтный метод, основанный на эффекте спонтанного параметрического рассеяния (СПР), предложенный Д. Н. Клышко и А. Н. Пениным [4]. С момента изобретения

данный метод детально исследован и разработаны соответствующие протоколы, например [5]. При этом достигнута неопределённость измерения эффективности 0,18 % [6]. Для составления бюджета неопределённости референтного метода, основанного на эффекте СПР, необходимо оценить влияние ряда физических параметров, таких как оптические свойства нелинейного кристалла, линз, фильтров, коммутирующего оптического волокна, и параметры детекторов: вероятность повторных импульсов, ряд статистических параметров счёта фотонов. Следует отметить, что описанные в [6] измерения, проводились на одной длине волны, находящейся вблизи максимума чувствительности используемого детектора единичных фотонов.

Суть метода Клышко–Пенина заключается в измерении совпадения моментов детектирования пар фотонов двумя детекторами. При этом пары фотонов появляются в процессе СПР и строго коррелированы по времени рождения. Один из детекторов играет роль калибруемого датчика (КД), а другой – триггера. Для вычисления эффективности детектирования КД $\eta_{\text{КД}}$ необходимо измерить число отсчётов триггера $n_{\text{тр}}$ и число $n_{\text{с}}$ одновременных срабатываний КД и триггера. Тогда

$$\eta_{\text{КД}} = n_{\text{с}} / n_{\text{тр}}. \quad (1)$$

Из формулы (1) следует, что неопределённость измерения эффективности детектирования зависит от неопределённостей измерения числа совпадений и числа отсчётов триггера.

Существуют методы измерения $n_{\text{с}}$ даже при малой эффективности одного из детекторов [5]. Однако при простом усреднении на неопределённость измерения $n_{\text{тр}}$ оказывают существенное влияние число $n_{\text{т.о}}$ темновых отсчётов триггера. Для каждой заданной длины волны КД можно подобрать комбинацию длины волны накачки, угла оси нелинейного кристалла и типа чувствительного элемента триггера такую, что

$$n_{\text{т.о}} \ll n_{\text{тр}}. \quad (2)$$

Тем не менее, для таких задач, как измерение $\eta_{\text{КД}}$ в широком диапазоне длин волн или настройка на различные излучательные переходы атомов, без замены элементов измерительной системы условие (2) для определённых длин волн может быть невыполнимо. Кроме того, для рутинных измерений, удешевления конструкции и упрощения настройки целесообразно использовать одну систему, перестраиваемую в широком диапазоне длин волн вместо набора сменных элементов.

Таким образом, для достижения неопределённости измерения $n_{\text{тр}}$ порядка единиц процентов, необходимо усреднять число отсчётов триггера с СПР и без СПР в течение длительного времени. Для идеального детектора темновые отсчёты представляют собой дробовой

шум, который имеет спектр белого шума. Следовательно, для идеального детектора частота, на которой происходит накопление сигнала, не имеет значения и можно использовать простое усреднение. Однако в реальных детекторах наблюдаются такие эффекты, как случайный телеграфный сигнал (СТС) [7, 8]. Данный эффект проявляется в случайном скачкообразном изменении числа темновых отсчётов между двумя или более постоянными уровнями. При возникновении СТС резко увеличивается уровень шума на низких частотах, что приводит к увеличению на порядок время измерения $n_{\text{тр}}$ при простом усреднении, т. е. накоплении сигнала на нулевой частоте.

Возможное влияние шумов типа СТС на погрешности измерения эффективности детектирования методом Клышко–Пенина было отмечено в [9]. Данный тип шума также может оказывать влияние на метод подстановки.

В настоящей работе предложен метод измерения $n_{\text{тр}}$ при уровне шумов типа СТС, сравнимых с уровнем полезного сигнала. Данный вид шума при определённых режимах измерений в широком диапазоне длин волн может оказывать влияние на точность измерения эффективности детектирования однофотонных детекторов методом Клышко–Пенина наряду с другими перечисленными выше физическими факторами.

Предложенный метод основан на введении модуляции интенсивности излучения СПР. В процессе обработки сигнала вычисляется амплитуда модуляции измеренного сигнала. В результате амплитуда полезного сигнала измеряется

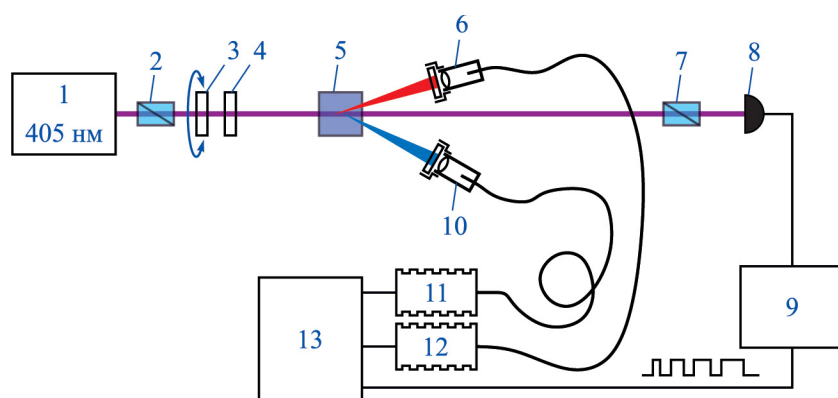


Рис. 1. Оптическая схема экспериментальной установки:

1 – лазер накачки; 2, 7 – поляризаторы (призмы Глана); 3 – фазовая пластинка $\lambda/2$ во вращающемся держателе; 4, 6, 10 – интерференционные фильтры; 5 – нелинейный кристалл; 6 – коллиматор калибруемого детектора; 8 – фотодетектор; 9 – генератор частотно-модулированного меандра; 10 – коллиматор триггера; 11 – детектор единичных фотонов (триггер); 12 – детектор единичных фотонов (калибруемый детектор); 13 – регистрирующая система

Fig. 1. Optical design of the experimental setup:

1 – pump laser; 2, 7 – polarizers (Glan prisms); 3 – $\lambda/2$ phase plate in a rotating holder; 4, 6, 10 – interference filters; 5 – non-linear crystal; 6 – detector under test collimator; 8 – photodetector; 9 – frequency modulated meander generator; 10 – trigger's collimator; 11 – single photon detector (trigger); 12 – single photon detector (detector under test); 13 – recording system

на высокой частоте модуляции, где спектральная плотность шумов сравнима со спектральной плотностью пуассоновского шума. Это позволяет на порядок уменьшить неопределённость измерения $n_{\text{тр}}$ при том же времени накопления сигнала. Данный метод фактически является применением принципа гетеродинирования для обработки однофотонных сигналов.

Экспериментальная установка для измерения эффективности детектирования однофотонных детекторов на основе спонтанного параметрического рассеяния и метода гетеродинирования. В схему установки для измерения эффективности детектирования однофотонных детекторов на основе СПР были введены элементы, которые позволяют модулировать излучение СПР. Оптическая схема установки приведена на рис. 1.

Излучение лазера накачки 1 с длиной волны 405 нм проходит через нелинейный кристалл бета-бората бария (ВВО) 5, в котором часть фотонов накачки в результате процесса СПР распадается на пары фотонов. Излучение СПР на длине волны 651 нм с помощью коллиматора 6 заводится в детектор единичных фотонов 12, который является КД и представляет собой охлаждаемый кремниевый лавинный фотодиод в гейгеровском режиме с оптоволоконным входом (модель SFC, изготовлен МЛЦ МГУ). Излучение СПР на комплементарной длине волны 1100 нм с помощью коллиматора 10 заводится в детектор 11, играющий роль триггера, также охлаждаемый лавинный фотодиод с волоконным входом (модель ID220 фирмы ID Quantique). Излучение накачки, вышедшее из кристалла, попадает на поляризатор 7. Ось поляризатора ориентирована в одной плоскости с главной оптической осью нелинейного кристалла. Таким образом, мощность в прошедшем луче пропорциональна мощности излучения СПР. Прошедший луч детектируется фотодиодом 8. Сигналы с детекторов приходят на регистрирующую систему 13, в основе которой лежит многоканальный время-цифровой преобразователь (ВЦП). Однофотонные детекторы 11, 12 при детектировании фотонов вырабатывают прямоугольные импульсы, время прихода которых регистрирует ВЦП. Чтобы записывать сигнал модуляции с фотодиода 8 синхронно с сигналами детекторов, используется генератор меандра 9, частота которого управляется выходом фотодиода. Для защиты от паразитных засветок используются интерференционные фильтры 4, 6, 10, затемнённая комната и светозащитные боксы.

Описание метода. Предложенный метод измерения предполагает применение принципа гетеродинирования. Во время накопления сигнала производится модуляция мощности излучения СПР по гармоническому закону. Модуляция осуществляется равномерным вращением полуволновой фазовой пластинки, расположенной в луче лазера, что приводит к вращению плоскости поляризации накачки и, соответственно, модуляции СПР от нуля до максимального значения. В проведённом эксперименте период модуляции составлял 4,5 с.

Во время измерения записывается зависимость скорости счёта фотонов триггера от времени $C_{\text{тр}}(t)$. Синхронно с $C_{\text{тр}}$ записывается сигнал модуляции $C_{\text{мод}}(t)$, который представляет собой сигнал, пропорциональный мощности

излучения СПР. На стадии обработки сигналы $C_{\text{тр}}$ и $C_{\text{мод}}$ перемножаются и усредняются. Такая процедура обработки соответствует методу гетеродинирования. Следует отметить, что использование для демодуляции синхронизированного с основной записью сигнала $C_{\text{мод}}$ позволяет избежать возможных проблем, связанных с неравномерностью вращения полуволновой пластинки.

Величину $C_{\text{тр}}$ можно представить как сумму скорости счёта фотонов, порождённых СПР, и шумов различной природы. Скорость счёта фотонов СПР изменяется пропорционально $C_{\text{мод}}$. Данную модель можно описать следующей формулой:

$$C_{\text{тр}} = KC_{\text{мод}} + C_{\text{ш}}, \quad (3)$$

где K – коэффициент пропорциональности; $C_{\text{ш}}$ – сумма всех шумовых составляющих.

В $C_{\text{ш}}$ входят темновые отсчёты $C_{\text{тем}}$ и отсчёты C_3 внешней засветки, при этом $C_{\text{тем}}$ определяется как скорость счёта триггера при выключенном лазере, а C_3 является добавкой скорости счёта, когда лазер накачки включён, но излучение СПР отсутствует. Иными словами, C_3 – это вклад в скорость счёта засветки, вызванной лазером, но не СПР.

В настоящей работе разработанный метод применяли для измерения $n_{\text{тр}}$ – числа фотонов СПР, зарегистрированных триггером за время измерения, с максимальным ОСШ. Величина $n_{\text{тр}}$ является интегралом скорости счёта фотонов СПР по всему времени измерения. Скорость счёта фотонов СПР описывается первым членом в формуле (3). Сигнал $C_{\text{мод}}$ в отличие от $C_{\text{тр}}$ является сильным сигналом и может быть записан с высоким ОСШ. При этом коэффициент K измеряется на частоте модуляции, на которой уровень шумов ниже, чем на нулевой частоте, соответствующей простому усреднению.

Чтобы вычислить измеренное значение K , разобьём всё время измерения на равные интервалы. Ширина интервалов должна быть существенно меньше периода модуляции. Численное моделирование показало, что при выполнении данного условия, конкретное значение интервала не оказывает заметного влияния на результаты вычислений. Обозначим как $C_{\text{тр}}^i$ и $C_{\text{мод}}^i$ средние значения соответствующих величин в i -м интервале. Тогда оценку значения коэффициента K вычислим по формуле

$$K = \frac{\sum_i (C_{\text{тр}}^i (C_{\text{мод}}^i - \overline{C_{\text{мод}}}))}{\sum_i (C_{\text{мод}}^i - \overline{C_{\text{мод}}})^2}. \quad (4)$$

В (4) суммирование производится по всей длине записи. Сумма в числителе описывает кросс-корреляцию $C_{\text{тр}}$ и $C_{\text{мод}}$ с нулевым сдвигом, произведение под знаком суммы реализует смещение сигналов $C_{\text{тр}}$ и $C_{\text{мод}}$, т. е. гетеродинирование. В знаменателе стоит нормировочный коэффициент. Величину K можно также интерпретировать как коэффициент линейной регрессии зависимости $C_{\text{тр}}(C_{\text{мод}})$. Соответственно, $n_{\text{тр}}$ вычисляется по формуле

$$n_{\text{тр}} = K \sum_i C_{\text{мод}}^i. \quad (5)$$

Таким образом, измерение $n_{тр}$ производится на частоте модуляции, где уровень шумов ниже, чем вблизи нулевой частоты, что соответствует простому усреднению.

Оценка ожидаемых значений. Для того чтобы рассчитать, насколько увеличится ОСШ при использовании предложенного метода по сравнению с простым накоплением сигнала, а также оценить ожидаемые значения результатов измерений, необходимо оценить ряд параметров экспериментальной установки.

Параметры СТС. Основным источником неопределённости измерения $n_{тр}$ при обычном усреднении является случайный сигнал СТС. Данный сигнал представляет собой случайную последовательность переходов между двумя или более состояниями, каждое из которых – стационарный пуассоновский процесс. Средняя частота темновых отсчётов $f_{т.от}$ для каждого состояния разная. Этот эффект объясняется дефектами внутри фотодиода, которые способны спонтанно заряжаться и разряжаться, изменяя при этом характеристики устройства [7]. Сигнал СТС можно описать тремя параметрами: τ_B – среднее время в состоянии с высоким $f_{т.от}$; τ_H – среднее время в состоянии с низким $f_{т.от}$; $\Delta f_{т.от}$ – разность $f_{т.от}$ между высоким и низким значениями.

На рис. 2 приведён пример зависимости $f_{т.от}$ от времени при наличии эффекта СТС. Чёрной кривой показано переключение между состояниями в предположении, что уровней СТС два. Чтобы оценить значения τ_B , τ_H и $\Delta f_{т.от}$ была сделана запись длиной 40 мин. На этой записи выделены уровни с высоким и низким $f_{т.от}$ как показано на рис. 2, и рассчитаны интервалы времени, в течение которых система находилась в каждом из состояний t_B^i, t_H^i . По полученным значениям вычислили средние $\tau_B = 83,9$ с и $\tau_H = 22,0$ с. Также построили функции распределения F времени нахождения в каждом состоянии, которые приведены на рис. 3. Линиями с точками показаны результаты измерений, а штриховыми – теоретические кривые, соответствующие экспоненциальному распределению. Из рис. 3 следует, что t_B^i, t_H^i имеют экспоненциальное распределение и, следовательно, подчиняются пуассоновской статистике. Значение $\Delta f_{т.от} = 400,0$ отс./с при среднем значении $f_{т.от} = 2208,3$ отс./с.

Скорость счёта триггера. Для оценки ожидаемой скорости счёта, были произведены измерения скорости счёта триггера и канала модуляции. Основная задача данного эксперимента – оценка амплитуды $A_{СПР}$ модуляции сигнала СПР, необходимой для численного эксперимента по оценке ожидаемой неопределённости измерений $n_{тр}$. Значение $A_{СПР}$ в предположении, что модуляция подчиняется гармоническому закону, можно вычислить через среднее от квадрата $C_{мод}$ и коэффициент K :

$$A_{СПР} = 2K \left[\overline{2(C_{мод} - \overline{C_{мод}})^2} \right]^{1/2}. \quad (6)$$

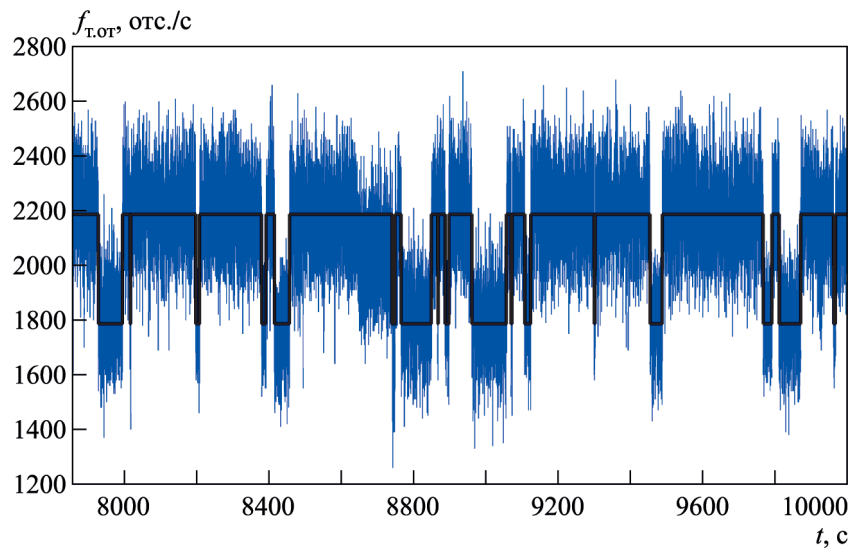


Рис. 2. Пример зависимости $f_{т.от}$ от времени t при наличии эффекта СТС; синяя кривая – зависимость $f_{т.от}$ от времени, чёрная кривая – переключение между состояниями в предположении, что уровней СТС два

Fig. 2. An example of the dependence of dark count rate on time in the presence of the RTS effect; the blue curve – dark count rate, the black curve – switching between states with different dark count rate levels

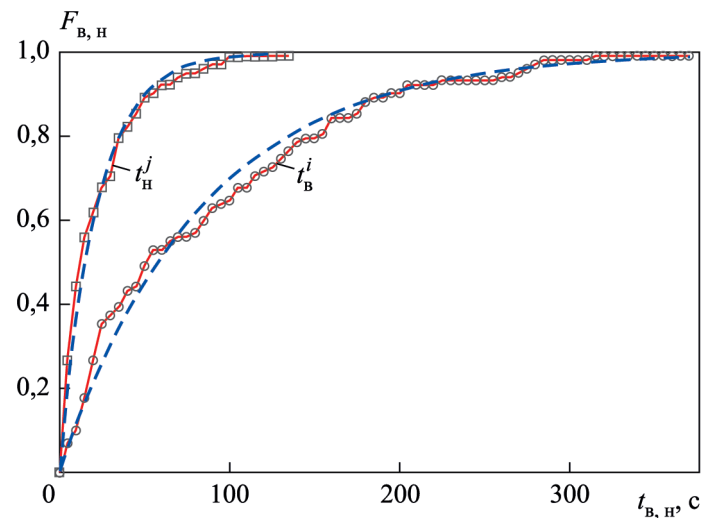


Рис. 3. Функция $F_{B, H}$ распределения времени нахождения системы в состояниях с разными $f_{т.от}$; штриховыми линиями показаны экспоненциальные функции распределения с соответствующими средними значениями

Fig. 3. The distribution function of the time spent by the system in states with different dark count rates; the dashed lines show the exponential distribution functions with the corresponding average values

Для оценки ожидаемой скорости счёта в рабочем режиме установки измерены скорости счёта КД, триггера и канала модуляции. Поскольку основная задача данного

эксперимента – оценка $A_{\text{СПР}}$ триггера, то для максимизации ОСШ использована максимальная мощность лазера. При этом КД оказался перегружен – мощность излучения СПР изменялась по гармоническому закону, при этом зависимость скорости счёта КД от времени имела существенную нелинейность.

Система регистрации записывает время прихода каждого фотона. Всё время записи было разделено на интервалы по 100 мс, и для каждого интервала рассчитана скорость счёта. Ширина интервалов выбрана существенно меньше периода модуляции. Численное моделирование показало, что при выполнении данного условия конкретное значение интервала не оказывает заметного влияния на результаты вычислений.

На рис. 4 приведена зависимость скорости счёта КД $C_{\text{КД}}$ от скорости счёта канала модуляции $C_{\text{мод}}$. Кружками показаны результаты измерений на каждом интервале. Облако кружков описывает зависимость $C_{\text{КД}}$ от мощности излучения СПР (выраженной в скорости счёта канала модуляции). Весь диапазон значений канала модуляции разделён на 40 бинов. В каждом бине вычислено среднее значение $C_{\text{КД}}$ (сплошная кривая). По пяти левым точкам этой кривой построена прямая линейной регрессии (штриховая линия). По графику рис. 4 определено, что линейный участок $C_{\text{КД}}$

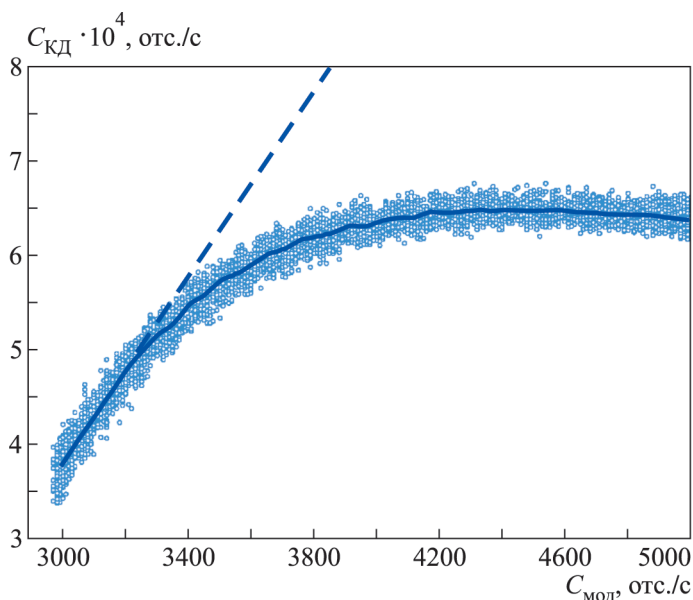


Рис. 4. Зависимость скорости счёта КД $C_{\text{КД}}$ от уровня излучения СПР при максимальной мощности лазера; облако точек – единичные измерения, сплошная кривая – усреднённая зависимость, штриховая прямая – экстраполяция линейного участка усреднённой зависимости

Fig. 4. Dependence of the DUT count rate on the amount of SPDC emission at maximum laser power. Point cloud – single measurements, solid curve – averaged dependence, dashed line – extrapolation of the linear portion of the averaged dependence, inset – dependence of the DUT count rate during SPDC modulation

продолжается до $C_{\text{лин}} = 47000$ отс./с и составляет долю $L = 12\%$ полной амплитуды модуляции.

Скорость счёта при выключенном лазере $C_{\text{тем}} = 18500$ отс./с, а скорость счёта паразитной засветки $C_3 = 19000$ отс./с, C_3 определяется как скорость счёта, соответствующая минимуму скорости счёта при модуляции (излучение СПР отсутствует, но лазер накачки включён) за вычетом $C_{\text{тем}}$. Следовательно, если бы у КД был неограниченный линейный диапазон, то он бы зарегистрировал $C_{\text{СПР}} = (C_{\text{лин}} - C_3 - C_{\text{тем}}) / L = 79197$ отс./с. Здесь в $C_{\text{СПР}}$ учитываются только фотоны излучения СПР, но не фотоны засветки и темновые. Вычислим, во сколько раз (N) необходимо уменьшить мощность лазера, чтобы КД не перегружался и функционировал в линейном режиме. Данную величину получим из уравнения

$$(C_{\text{СПР}} + C_3)N + C_{\text{тем}} = C_{\text{лин}}. \quad (7)$$

Решением (7) будет

$$N = (C_{\text{лин}} - C_{\text{тем}}) / (C_{\text{СПР}} + C_3).$$

При значениях параметров, приведённых выше, величина N составила 0,29.

На рис. 5 приведена зависимость скорости счёта триггера $C_{\text{тр}}$ от скорости счёта канала модуляции. Облако точек и сплошная кривая были получены тем же способом, что и на рис. 4 (использовали 20 бинов). Наклон штриховой прямой рассчитан по формуле (4). Несмотря на то, что ширина шумовой дорожки больше амплитуды модуляции, наклон графика на рис. 5 свидетельствует об уровне регистрируемого излучения СПР. При максимальной мощности лазера $A_{\text{СПР}} = 191$ отс./с.

Численное моделирование процесса измерения. Неопределённость измерения $\eta_{\text{КД}}$ может быть уменьшена в результате увеличения времени накопления сигнала. Чтобы определить необходимое время измерения, проведено численное моделирование процесса измерения с использованием оценённых выше параметров.

Для измерения $\eta_{\text{КД}}$ согласно (1) необходимо измерить число отсчётов триггера вызванных фотонами СПР $n_{\text{тр}}$. Неопределённость $n_{\text{тр}}$ определяется неопределённостью измерения $\Delta A_{\text{СПР}}$. Покажем, что если требуется измерить $\eta_{\text{КД}}$ с заданной неопределённостью $\Delta \eta_{\text{КД}}$, то соответствующую относительную неопределённость измерения $A_{\text{СПР}}$ запишем как

$$\Delta A_{\text{СПР}} / A_{\text{СПР}} = \Delta \eta_{\text{КД}} / \eta_{\text{КД}}. \quad (8)$$

Моделирование производилось следующим образом. Генерировалось большое число тестовых сигналов с одинаковыми параметрами, затем по описанной выше методике для каждого тестового сигнала вычислялось $A_{\text{СПР}}$. По распределению значений $A_{\text{СПР}}$ находили искомую неопределённость.

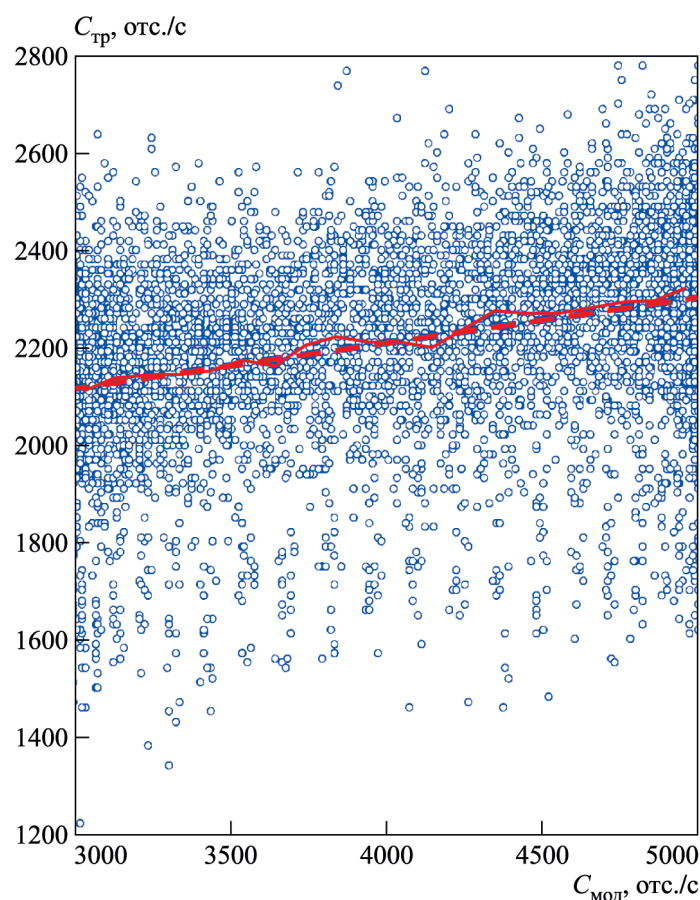


Рис. 5. Зависимость скорости счёта $C_{тр}$ триггера от уровня излучения СПР при максимальной мощности лазера; облако точек – единичные измерения, сплошная кривая – усреднённая зависимость, наклон штриховой прямой получен в результате измерения

Fig. 5. The dependence of the count rate of the trigger on the value of the radiation of the SPDC at the maximum laser power. The points cloud – single measurements, the solid curve – the averaged dependence, the dashed line – the straight line with a slope obtained as a result of measurement

Каждый тестовый сигнал представляет собой сумму сигнала СТС и модулированного сигнала СПР. Каждая точка соответствующего сигнала представляет собой псевдослучайное число, подчиняющееся пуассоновской статистике с соответствующим параметром среднего числа событий. Моменты перехода сигнала СТС между уровнями также определялись генератором псевдослучайных чисел с пуассоновской статистикой. Значения параметров, используемых при моделировании, были взяты из полученных выше оценок и приведены в табл. 1. В процессе моделирования подбирали соотношение между длительностью измерений и значением неопределённости такое, чтобы достигнуть неопределённости порядка единиц процентов при длительности накопления сигнала не превышающей получаса.

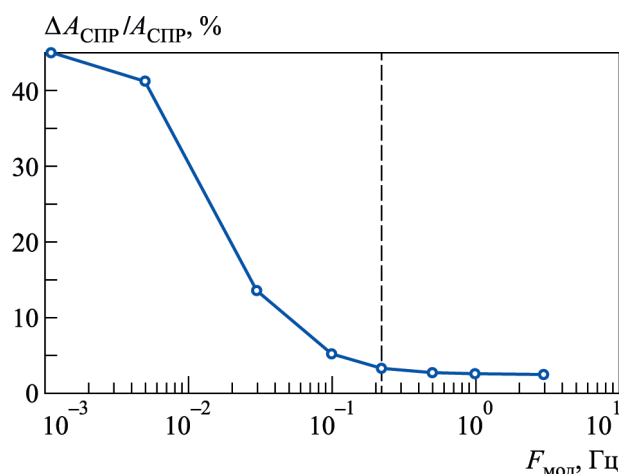


Рис. 6. Зависимость относительной неопределённости измерения $\Delta A_{СПР}/A_{СПР}$ от частоты модуляции СПР; кружки – точки расчёта; штриховая линия соответствует периоду модуляции 4,5 с в эксперименте; время измерения 15 мин

Fig. 6. Relative uncertainty of $\Delta A_{СПР}/A_{СПР}$ measurement versus SPDC modulation frequency. The circles indicate the points at which the calculation was performed, the dashed line corresponds to the modulation period used in the experiment – 4,5 s. Measurement time – 15 min

Таблица 1

Параметры численного моделирования процесса измерения

Сигнал	Параметр	Значение
СТС	τ_B , с	83,9
	τ_H , с	22,0
	$\Delta f_{т.от}$, отс./с	400,0
	Средний уровень $f_{т.от}$, отс./с	2208,3
Модулированный сигнал СПР	$A_{СПР}$, отс./с	191
	Частота модуляции, Гц	0,001–5,000

В качестве меры неопределённости выбрано среднеквадратическое отклонение. На рис. 6 показан результат моделирования при времени измерения 15 мин. Сплошная кривая описывает зависимость относительной неопределённости измерения $A_{СПР}$ от частоты модуляции $F_{мод}$. На частоте модуляции, используемой в эксперименте (чёрная штриховая линия), неопределённость $\Delta A_{СПР}/A_{СПР}$ составляет 3,2 %. Поскольку относительная неопределённость измерения обратно пропорциональна корню из времени измерения, то дальнейшее уменьшение $\Delta A_{СПР}/A_{СПР}$ приводит к существенному удлинению записей, что значительно осложняет процесс измерения.

Из рис. 6 следует, что на частоте модуляции уровень неопределённости выходит на полочку, что означает, что на выбранной частоте эффект СТС не оказывает влияние на неопределённости измерения. На низкой частоте, период

Таблица 2

Результаты измерений

Величина	Среднее значение	Неопределённость	Относительная неопределённость, %
n_c	3382	143	4,2
$n_{тр}$	82106	3049	3,7
$\eta_{КД-осл}, \%$	4,1	0,2	4,1
$D, \%$	17,1	0,3	1,5
$\eta_{КД}, \%$	24,2	1,1	4,5
Число отсчётов триггера	1986028	42975	2,2

которой равен длительности измерения (крайняя левая точка) $\Delta A_{СПР}/A_{СПР}$ составляет 45 %. Эта точка соответствует случаю простого усреднения с вычитанием фона. Таким образом, численное моделирование показывает, что выигрыш по неопределённости $\Delta A_{СПР}/A_{СПР}$ при использовании гетеродинамирования составляет 14 раз. Соответствующий выигрыш по времени измерения, если требуется достигнуть такой же неопределённости, $14^2 \approx 200$ раз.

Измерения. Для проверки работоспособности метода проведены 15 измерений по 15 мин каждое. Чтобы вернуть КД в линейный режим работы (без перегрузки), излучение в канале КД ослаблялось специально подобранным нейтральным светофильтром. Для расчёта эффективности детектирования необходимо определить коэффициент ослабления светофильтра D . Для этого измеряли зависимость перегруженного КД без светофильтра, аналогичную показанной на рис. 4. По наклону линейного участка этой зависимости определили, что если бы КД не имел ограничения динамического диапазона, то $A_{СПР}$ КД составила бы 108113 отс./с. Это значение использовали для определения значения коэффициента D . В результате измерений получали значения эффективности детектирования КД ослабленного нейтральным светофильтром $\eta_{КД-осл}$. Значение $\eta_{КД}$ вычисляли с помощью коэффициента D . Число отсчётов СПР триггера рассчитывали по формуле (5).

Результаты измерений приведены в табл. 2. Эффективность детектирования КД на длине волны 650 нм составила 24,2 % при относительной неопределённости 4,5 %. Ожидаемая эффективность КД составляет 16 % [10]. Следует отметить, что авторы [10] проводили измерения на длине волны 810 нм, где эффективность детектирования кремниевых фотодетекторов меньше. Из табл. 2 следует, что относительная неопределённость числа отсчётов СПР триггера 3,7 % хорошо согласуется с результатами численного моделирования $\Delta A_{СПР}/A_{СПР}$ 3,2 %.

Из имеющихся данных нельзя без дополнительных измерений определить $n_{тр}$ классическим методом (прямым усреднением с вычитанием фона), однако можно оценить

неопределённость такого измерения. Поскольку для классического метода необходимо измерить число отсчётов триггера (с излучением СПР и без), неопределённость числа отсчётов СПР при том же времени измерения совпадает с неопределённостью числа отсчётов триггера (см. табл. 2). Это значение следует сравнивать с абсолютным значением неопределённости числа отсчётов СПР триггера, приведённым во второй строке табл. 2, полученную предложенным методом гетеродинамирования. Согласно данным табл. 2 выигрыш при использовании модуляции составляет 14 раз, что хорошо совпадает с результатами моделирования.

Заключение. Таким образом представлен усовершенствованный метод измерения квантовой эффективности однофотонных приёмников на основе спонтанного параметрического рассеяния за счет использования гетеродинамирования. Гетеродинамирование заключалось в введении дополнительной модуляции и накоплении сигнала на более высокой частоте. Предложенный метод численно промоделирован. Экспериментальная апробация метода установила, что использование гетеродинамирования позволило увеличить отношение сигнал–шум в 14 раз по сравнению с исходным методом, использующим накопление сигнала.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России в рамках выполнения соглашения № 075-11-2019-072 (уникальный идентификатор RFMEFI62419X0052). В работе использовано оборудование ЦКП высокоточных измерительных технологий в области фотоники (сскр.vniiofi.ru), действующего на базе ФГУП «ВНИИОФИ».

Список литературы

1. Dréau A., Tchekoratcheva A., Mahdoui A. E., Bonato C., Hanson R., *Phys. Rev. Applied.*, 2018, vol. 9, p. 064031. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.9.064031>
2. Trofimov S. D., Tarelkin S. A., Bolshedvorskii S. V., Bor-mashov V. S., Troshchiev S. Yu., Golovanov A. V., Luparev N. V., Prikhodko D. D., Boldyrev K. N., Terentiev S. A., Akimov A. V., Kargin N. I., Kukin N. S., Gusev A. S., Shemukhin A. A., Balakshin Y. V., Buga S. G., Blank V. D., *Opt. Mater. Express.*, 2020, vol. 10, p. 198. <https://doi.org/10.1364/OME.10.000198>
3. Jessica Y. Cheung, Christopher J. Chunnillall, Geiland Porrovecchio, Marek Smid, and Evangelos Theocharous, *Opt. Express*, 2011, vol. 19, pp. 20347–20363. <https://doi.org/10.1364/OE.19.020347>
4. Д. Н. Клышко, А. Н. Пенин. Перспективы квантовой фотометрии // Успехи физических наук. 1987. Т. 152. Вып. 4. С. 653–665. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0152.198708e.0653>
5. Migdall A., Castelletto S., Degiovanni I., and Rastello M., *Appl. Opt.*, 2002, vol. 41, pp. 2914–2922. <https://doi.org/10.1364/AO.41.002914>
6. Polyakov S. V., Migdall A. L., *Opt. Express*, 2007, vol. 15, pp. 1390–1407. <https://doi.org/10.1364/oe.15.001390>
7. F. Di Capua et al., *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2018, vol. 65, no. 8, pp. 1654–1660. <https://doi.org/10.1109/TNS.2018.2814823>

8. Karami M. A., Carrara L., Niclass C., Fishburn M., and Charbon E., *IEEE Electron Device Letters*, 2010, vol. 31, no. 7, pp. 692–694. <https://doi.org/10.1109/LED.2010.2047234>

9. Alan L. Migdall, *IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement*, 2001, vol. 50, no. 2, pp. 478–481. <https://doi.org/10.1109/19.918170>

10. Гостев П. П., Агапов Д. П., Дёмин А. В., Левин Г. Г., Мамонов Е. А., Магницкий С. А. Измерение эффективности детектирования счетчиков одиночных фотонов на базе лавинных фотодиодов методом спонтанного параметрического рассеяния с асимметричными по спектру каналами // Измерительная техника. 2018. № 12. С. 27–32. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2018-12-27-32>

References

1. Dréau A., Tchaborateva A., Mahdaoui A. E., Bonato C., Hanson R., *Phys. Rev. Applied.*, 2018, vol. 9, p. 064031. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.9.064031>

2. Trofimov S. D., Tarelkin S. A., Bolshedvorskii S. V., Bor-mashov V. S., Troshchiev S. Yu., Golovanov A. V., Luparev N. V., Prikhodko D. D., Boldyrev K. N., Terentiev S. A., Akimov A. V., Kargin N. I., Kukin N. S., Gusev A. S., Shemukhin A. A., Balakshin Y. V., Buga S. G., Blank V. D., *Opt. Mater. Express.*, 2020, vol. 10, p. 198. <https://doi.org/10.1364/OME.10.000198>

3. Jessica Y. Cheung, Christopher J. Chunnillall, Geiland Porrovecchio, Marek Smid, and Evangelos Theocharous, *Opt. Express*, 2011, vol. 19, pp. 20347–20363. <https://doi.org/10.1364/OE.19.020347>

4. Klyshko D. N., Penin A. N., *Sov. Phys. Usp.*, 1987, vol. 30, pp. 716–723. <https://doi.org/10.1070/PU1987v030n08ABEH002939>

5. Migdall A., Castelletto S., Degiovanni I., and Rastello M., *Appl. Opt.*, 2002, vol. 41, pp. 2914–2922. <https://doi.org/10.1364/AO.41.002914>

6. Polyakov S. V., Migdall A. L., *Opt. Express*, 2007, vol. 15, pp. 1390–1407. <https://doi.org/10.1364/oe.15.001390>

7. F. Di Capua et al., *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2018, vol. 65, no. 8, pp. 1654–1660. <https://doi.org/10.1109/TNS.2018.2814823>

8. Karami M. A., Carrara L., Niclass C., Fishburn M., and Charbon E., *IEEE Electron Device Letters*, 2010, vol. 31, no. 7, pp. 692–694. <https://doi.org/10.1109/LED.2010.2047234>

9. Alan L. Migdall, *IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement*, 2001, vol. 50, no. 2, pp. 478–481. <https://doi.org/10.1109/19.918170>

10. Gostev P. P., Agapov D. P., Demin A. V., Levin G. G., Mamono-v E. A., Magnitsky S. A., *Measurement Techniques*, 2019, vol. 61, no. 12, pp. 1166–1173. <https://doi.org/10.1007/s11018-019-01565-6>

Дата поступления: 30.03.2020.

Дата принятия: 30.04.2020.

Detection efficiency measurement of single-photon detectors based on spontaneous parametric scattering using the heterodyning method

Alexei A. Samoylenko, Alexei D. Ivanov, Gennady G. Levin

All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements, Moscow, Russian Federation,
e-mail: asamoylenko@vniiofi.ru, academi@ya.ru, levin@vniiofi.ru

Recent active development of quantum computers and quantum key distribution systems requires characterization of the parameters of single-photon detectors. A key parameter of single-photon detectors is detection efficiency. One of the methods for measuring the detection efficiency given in the international ETSI standard is the Klyshko reference-free method based on the use of the effect of spontaneous parametric downconversion. The signal-to-noise ratio (SNR) of this method depends on a combination of the pump wavelength, the nonlinear crystal axis angle, and the type of detector sensitive element. When the combination is complex, one has to deal with low SNR. In this case, to obtain a high SNR, long-term signal accumulation is necessary. In real detectors, the situation is complicated by the presence of a high noise level at low frequencies. The heterodyning-based method we have proposed consists in introducing modulation into the standard Klyshko scheme and accumulating the signal at a higher frequency. The method was numerically modeled and experimentally tested. A 14 times improvement in SNR was demonstrated compared to simple signal accumulation.

Key words: spontaneous parametric down-conversion, reference-free single photon detectors calibration, heterodyning.

Метод измерения параметров быстродействия фотоприёмников

С. Б. Бычков¹, И. В. Волков¹, А. И. Глазов¹, И. С. Королёв¹,
К. Б. Савкин¹, Н. П. Хатырев²

¹Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений,
Москва, Российская Федерация, e-mail: vniofi@vniofi.ru

²Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,
г. п. Менделеево, Московская обл., Российская Федерация, e-mail: office@vniiftri.ru

Рассмотрены проблемы, возникающие при измерении параметров быстродействия современных широкополосных фотоприёмных устройств методом, основанным на результатах измерений времени нарастания переходной характеристики. Предложен метод количественной оценки быстродействия, использующий результаты определения импульсной характеристики исследуемого фотоприёмника. Источником испытательных сигналов служит импульсный волоконный лазер, работающий в режиме самосинхронизации мод и обеспечивающий генерацию сверхкоротких (около 3 пс) оптических импульсов. Представлена измерительная установка, позволяющая реализовать предложенный метод измерения. Приведены некоторые результаты экспериментального апробирования метода.

Ключевые слова: фотодиод, фотоприёмник, быстродействие фотоприёмника, импульсная характеристика, амплитудно-частотная характеристика, пикосекундный импульсный лазер.

Введение. Быстродействующие фотоприёмные устройства (оптоэлектронные преобразователи) широко распространены в волоконно-оптических системах связи, системах лазерной дальнометрии и локации, спутниковых лазерных дальнометрах, радиофотонных системах. Для разработчиков и производителей этих устройств крайне важным является знание динамических характеристик фотоприёмников. Под фотоприёмниками здесь и далее понимаются системы, на оптический вход которых подаётся оптический (в том числе модулированный) сигнал, при этом сигнал электрического выхода пропорционален мощности входного оптического сигнала. В качестве преобразователя оптической мощности в электрический сигнал в таких системах могут использоваться *pin*-фотодиоды, лавинные полупроводниковые фотодиоды, а также некоторые вакуумные и пироэлектрические приёмники.

К параметрам быстродействия (динамическим характеристикам фотоприёмников) согласно действующему ГОСТ 17772-88 (СТ СЭВ 3789-82) «Приёмники излучения полупроводниковые. Фотоэлектрические и фотоприёмные устройства. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик» относят время нарастания и спада выходного сигнала при входном «ступенчатом» оптическом импульсе. Кроме того, в технической документации на фотоприёмные устройства часто приводят их частотные характеристики или нормированные значения неравномерности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в полосе пропускания и ширины полосы пропускания.

Наиболее распространенным критерием быстродействия фотоприёмников является время нарастания переходной

характеристики фотоприёмника в диапазоне 0,1–0,9 установившегося значения. Для этого на вход фотоприёмника подаётся оптический импульс прямоугольной формы, длительность которого многократно превышает предполагаемое время нарастания выходного сигнала фотоприёмника. Время нарастания переднего фронта этого испытательного импульса должно составлять, по крайней мере, не более 30 % ожидаемого времени нарастания переходной характеристики испытываемого фотоприёмника (по ГОСТ 17772-88). Однако считать, что изменение мощности оптического импульса во времени имеет прямоугольную или хотя бы трапецидальную форму можно только с определённым приближением. Время нарастания современных фотоприёмников может достигать до десятков и даже до единиц пикосекунд. При этом неизбежно возникает вопрос о том, как контролировать параметры формы испытательного лазерного импульса и, в частности, длительность его переднего фронта. Для этого потребуются более быстродействующие приёмники, время нарастания переходной характеристики которых тоже необходимо измерять. Возникает замкнутый круг. Заметим, что для быстродействующих фотоприёмников с постоянной времени менее 20 пс требуется более строгое соблюдение прямоугольности формы импульса задающего оптического генератора, а осуществление этого требования на практике оказывается сложной задачей. В противном случае неидеальность формы оптического импульса (например, выброс на переднем фронте) может привести к уменьшению измеренного значения времени нарастания переходной характеристики приёмника по сравнению с его действительным значением.

Таким образом, результат измерений будет недостоверным и количественная оценка быстродействия приёмника излучения будет необоснованно увеличена.

Для систем радиофотоники, в которых используется лазерное излучение, модулированное сверхвысокочастотным (СВЧ) сигналом, такой критерий, как время нарастания переходной характеристики, обычно не применяется. Более подходящей характеристикой является неравномерность АЧХ фотоприёмника.

Таким образом, существуют различные области применения быстродействующих фотоприёмников, для которых стандартизированные методы измерений динамических характеристик не реализуемы на практике.

В настоящей работе предложен метод, позволяющий получить количественную оценку быстродействия высокоскоростных приёмников излучения и лишённый описанных недостатков.

Предложенный метод измерения параметров быстродействия фотоприёмников. В теории линейных систем импульсной характеристикой называют реакцию системы при воздействии на её вход сигнала, описываемого единичной импульсной функцией (дельта-функцией Дирака). Эта функция имеет нулевое значение во всех точках, кроме одной, в которой её значение стремится к бесконечности, а определённый интеграл этой функции равен единице. Такой подход можно применить и по отношению к быстродействующим приёмникам оптического излучения, работающим в линейном ненасыщенном режиме. При подаче на вход фотодиода ультракороткого лазерного импульса, моделирующего дельта-функцию Дирака, на выходе будет наблюдаться импульс напряжения некоторой длительности, зависящей от быстродействия фотоприёмника. Под длительностью импульсной характеристики фотоприёмника будем понимать длительность электрического импульса на выходе приёмника, равную половине максимума амплитудного значения импульса.

В рассматриваемом случае для получения достоверного результата критически важным параметром является только длительность испытательного оптического импульса, которая должна быть значительно (хотя бы на порядок) меньше ожидаемой длительности импульсной характеристики приёмника. В отличие от метода измерений длительности фронта переходной характеристики, предлагаемый метод позволяет абстрагироваться от динамики флуктуаций мощности лазерного излучения в пределах длительности сверхкоротких испытательных импульсов. Сверхкороткий испытательный лазерный импульс имеет только один значимый динамический параметр – длительность. Получить верхнюю оценку для длительности сверхкоротких лазерных импульсов

можно с помощью широко используемых для этих целей автокорреляторов [1].

Предлагаемый метод стал актуальным и практически целесообразным в связи со значительными успехами, достигнутыми в последние десятилетия в области создания волоконно-оптических лазеров, работающих в режиме самосинхронизации мод. Такие лазеры могут генерировать последовательности оптических импульсов, длительность которых не превышает нескольких пикосекунд, и давно уже не являются уникальными на рынке лазерной техники.

Основным допущением в предлагаемом методе является линейность режима работы фотоприёмников при входном сверхкоротком лазерном импульсе. Однако это допущение справедливо при известном ограничении энергии испытательных импульсов. Область рабочих режимов источника сверхкоротких лазерных импульсов может быть достоверно установлена с помощью хорошо развитых методов измерений линейности преобразования приёмников излучения [2].

Описание измерительной установки. Для получения импульсных характеристик фотоприёмников и проведения измерений их длительностей, авторами настоящей статьи была разработана экспериментальная установка, состоящая из генератора сверхкоротких импульсов и регистрирующей аппаратуры. Для реализации стабильного импульсного режима работы в качестве генератора оптических импульсов создан иттербиевый волоконно-оптический лазер с линейным резонатором, генерирующий импульсное излучение на длине волны 1,03 мкм (близкой к длине волны неодимового лазера 1,06 мкм) длительностью импульсов порядка 3 пс. Генерация излучения лазером может происходить в режимах модулированной добротности (Q-switch) или самосинхронизации мод.

Схема лазера приведена на рис. 1. Требуемые параметры генерации лазерного излучения достигнуты с использованием режима пассивной самосинхронизации мод. Резонатор лазера состоит из зеркала 2 с напылённым

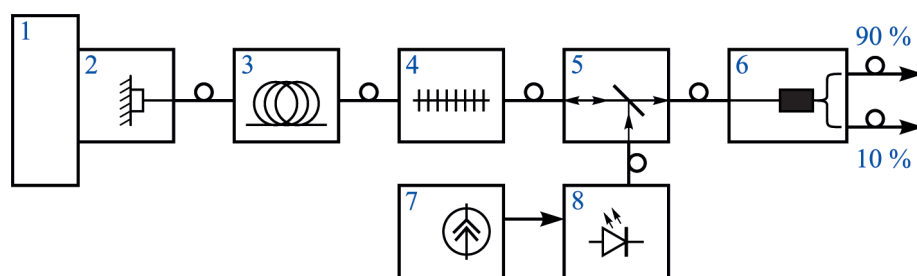


Рис. 1. Схема источника сверхкоротких лазерных импульсов:

1 – радиатор; 2 – зеркало с насыщенным поглотителем SESAM; 3 – оптическое волокно, легированное иттербием; 4 – брэгговская решётка; 5 – WDM-фильтр; 6 – волоконный разветвитель; 7 – драйвер лазерного диода; 8 – лазерный диод накачки

Fig. 1. The source of ultrashort laser pulses scheme:

1 – radiator; 2 – mirror with saturable absorber SESAM; 3 – ytterbium-doped optical fiber; 4 – Bragg grating; 5 – WDM filter; 6 – fiber splitter; 7 – laser diode driver; 8 – laser pump diode

полупроводниковым покрытием из InGaAs/InP (поглотитель SESAM – semiconductor saturable absorber mirror), поглощение которого насыщается лазерным излучением в резонаторе, и брэгговской решётки 4. Решётка, по сути, представляет собой зеркало для длины волны $\lambda=1,03$ мкм, и свободно пропускает все прочие длины волн. В качестве активной среды использовано оптическое волокно 3, легированное иттербием Yb. Накачка осуществляется мощным лазерным диодом с волоконным выходом, диод работает на длине волны 980 нм. Излучение лазерного диода проходит через спектральный WDM-фильтр (WDM – wavelength division multiplexer), содержащий диэлектрическое зеркало 5, и направляется в волокно 3. В этом волокне излучение поглощается активной примесью (атомами иттербия) и возникает спонтанное излучение. Часть спонтанного излучения с длиной волны 1,03 мкм отражается от зеркал резонатора и усиливается за счёт многократного прохождения через активную среду. Выбор длины волны осуществляется путём селективного отражения на длине волны 1,03 мкм брэгговской решётки, играющей роль одного из зеркал резонатора. С помощью драйвера 7 лазерного диода стабилизируется ток лазерного диода и регулируется выходная мощность излучения накачки.

Особенностью зеркала SESAM является зависимость его коэффициента отражения от интенсивности приходящего импульса. В течение одного периода резонатора – времени двойного прохода (туда и обратно вдоль резонатора)

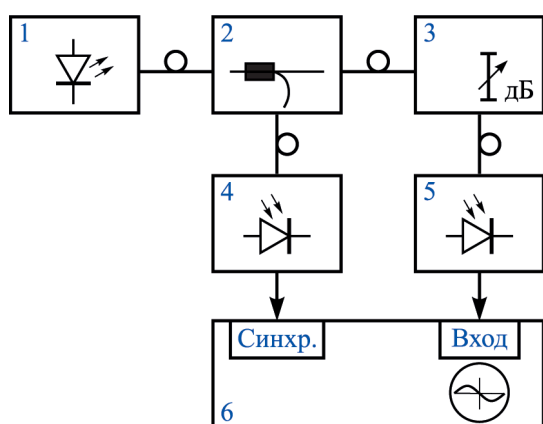


Рис. 2. Структурная схема установки для измерения импульсных характеристик фотоприёмников:

1 – источник сверхкоротких лазерных импульсов; 2, 3 – волоконные оптические разветвитель и аттенуатор соответственно; 4 – фотоприёмное устройство, генерирующее синхроимпульсы; 5 – исследуемое фотоприёмное устройство; 6 – стробоскопический осциллограф

Fig. 2. The structural diagram of the installation for measuring the pulse characteristics of photodetectors:

1 – source of ultrashort laser pulses; 2, 3 – fiber optic splitter and attenuator, respectively; 4 – photodetector for generating clock pulses; 5 – investigated photodetector; 6 – stroboscopic oscilloscope

будет сформирован один импульс. Интенсивность оптических импульсов внутри резонатора при прохождении между зеркалами через активное волокно, легированное иттербием, будет неоднородной во времени. Максимальная интенсивность достигается в середине длительности импульса, а наименьшая – в начале и конце. Импульс внутри резонатора будет укорачиваться до тех пор, пока его длительность не будет ограничена шириной спектральной линии усиления иттербиевого волокна. Зеркало на основе брэгговской решётки частично пропускает падающее на него излучение с длиной волны 1,03 мкм, поэтому часть энергии каждого импульса выходит из резонатора, и проходя через WDM-фильтр, направляется на выход лазера. На выходе лазера расположен волоконный делитель мощности 6 с коэффициентом деления 90:10. Описанный способ обеспечивает режим пассивной синхронизации мод и является удобным способом формирования импульсов длительностью от сотен фемтосекунд до десятков пикосекунд. Применение зеркала с насыщающимся поглотителем SESAM позволяет реализовать в волоконном лазере механизм самозапуска пассивной синхронизации мод. Для отвода избыточного тепла от поглотителя SESAM служит радиатор 1.

Конструкция данного волоконного лазера позволяет изменять длину линейного резонатора, а вместе с ней и частоту следования импульсов. В рассматриваемом случае длина резонатора составляет 2 м, что обеспечивает частоту следования импульсов порядка 50 МГц. Средняя мощность излучения на выходе лазера, измеренная оптическим ваттметром, порядка 1,5 мВт.

Автокорреляционная функция импульсов, генерируемых установкой, получена с использованием автокоррелятора. Верхняя граничная оценка длительности импульсов лазера в режиме самосинхронизации мод составляла около 3 пс.

Значение пороговой мощности разрушения тестируемого фотоприёмника ограничивает среднюю мощность излучения и период следования импульсов измерительной установки. Энергия E одного импульса определяется отношением средней мощности P_{cp} на выходе лазерного источника к частоте f следования импульсов:

$$E = P_{cp} / f. \quad (1)$$

В предположении, что мощность импульса одинакова во времени, можно сделать грубую нижнюю оценку пиковой мощности $P_{имп}$ в импульсе:

$$P_{имп} = E / \tau, \quad (2)$$

где τ – длительность оптического импульса.

Средняя выходная мощность лазера составляет около 1,5 мВт, частота следования импульсов – 50 МГц. Тогда из формул (1), (2) получим максимальную мощность излучения в каждом импульсе $P_{имп} = 10$ Вт и энергию $E = 30$ пДж.

Для определения импульсной характеристики фотоприёмного устройства собрана установка, её схема приведена

на рис. 2. Волоконно-оптический лазер (источник сверхкоротких оптических импульсов) 1 генерирует оптические импульсы длительностью около 3 пс, которые затем поступают на волоконный делитель 2 оптической мощности. Один канал делителя подключается к быстродействующему фотоприёмному устройству ФПУ1 4, подключённому ко входу синхронизации стробоскопического осциллографа 6. Оптические импульсы, выходящие из второго выхода делителя 2, через оптический аттенюатор 3 поступают в тестируемое фотоприёмное устройство ФПУ2 5. Сигнал ФПУ2 поступает на измерительный вход стробоскопического осциллографа 6.

Таким образом, последовательность сверхкоротких оптических импульсов синхронно поступает в ФПУ1, ФПУ2, преобразуясь в последовательности электрических импульсов. Сигнал ФПУ2, близкий по форме к импульсной характеристике фотоприёмника, регистрируется стробоскопическим осциллографом. ФПУ1 выполняет функцию генерации синхросигналов для работы стробоскопического осциллографа.

ФПУ2 представляет собой фотодиодный модуль с InAsGa-фотодиодом с волоконным входом. Модуль имеет трансимпеданс 50 Ом, выход, согласованный на нагрузку 50 Ом, и внешнее питание. С помощью оптического аттенюатора достигается режим, когда оптический импульс не вводит фотодиод модуля в насыщение, т. е. фотодиод работает в линейном режиме, и его работа может быть описана с позиций теории линейных систем. Для фотодиодных фотоприёмников без активных элементов предел линейности обычно находится в районе 5 мВт. В общем случае перед началом работы на установке необходимо определить предел линейности конкретного фотоприёмника. Если максимальная мощность оптического импульса источника 10 Вт (как было показано выше), а предел линейности модуля 10 мВт, то вносимое ослабление аттенюатора должно быть не менее 30 дБ.

Характеристики ФПУ1 и ФПУ2 должны быть близкими. Линейный режим работы ФПУ1 не обязателен, но предпочтителен для уменьшения джиттера канала синхронизации. При этом ФПУ1 должен формировать импульс синхронизации достаточной для осциллографа амплитуды. При подключении фотоприёмников к осциллографу важно, чтобы соединения выполнялись как можно более короткими СВЧ-кабелями с малыми потерями на высоких частотах, фотоприёмные устройства, кабель и осциллограф должны быть согласованы.

Для сравнения результатов измерений использованы осциллографы двух типов: стробоскопический осциллограф DCA-X 86100D с модулем N1055 с полосой 50 ГГц и осциллограф прямого осциллографирования DSO-Z594A с полосой 59 ГГц (оба прибора производства Keysight technologies, США). Использование осциллографа прямого осциллографирования позволяет немного упростить схему измерительной установки, исключив из неё канал синхронизации (ФПУ1), а также устранить влияние джиттера синхросигнала, заметное на рассматриваемых частотах.

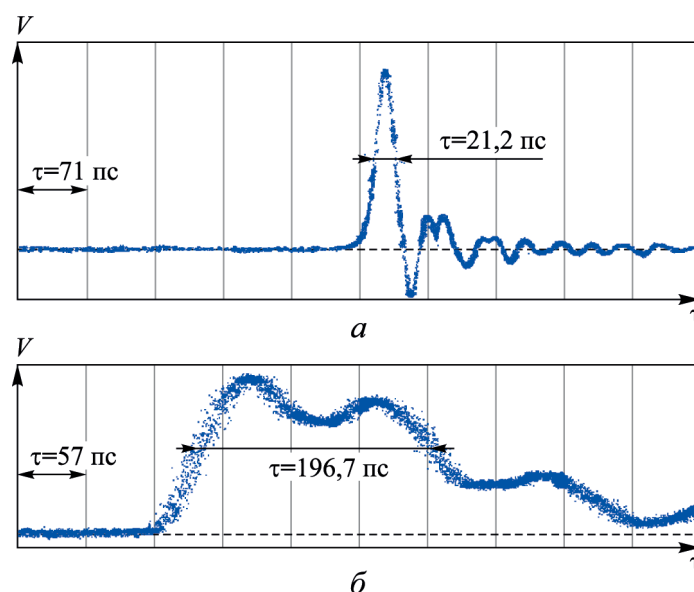


Рис. 3. Результаты измерений импульсной характеристики (осциллограммы) фотоприёмников ФПУ-А (а) и ФПУ-Б (б)

Fig. 3. The measurement results of the impulse response (waveform) of the photodetectors FPU-A (a) and FPU-B (b)

Заметим, что полученные двумя осциллографами импульсные характеристики и их длительности для одних и тех же фотоприёмников фактически не различались.

Описание и результаты эксперимента. Эксперименты состояли в измерениях длительностей импульсных характеристик двух быстродействующих фотоприёмников: ФПУ-А – фотоприёмника ДФДМШ40 (ООО НПФ «ДиЛаз», Россия) с полосой не менее 20 ГГц; ФПУ-Б – преобразователя измерительного ПР-ЗИ (ВНИИОФИ, Россия) с полосой 1,5 ГГц. Осциллограммы импульсных характеристик, полученные на установке со стробоскопическим осциллографом, представлены на рис. 3. Длительность импульсной характеристики, определённая по полувысоте импульса, для ФПУ-А и ФПУ-Б составила (21 ± 1) и (196 ± 3) пс соответственно.

Согласно осциллограммам на рис. 3 некоторое время после окончания импульса продолжается колебательный процесс. Очевидно, что причина этого состоит не в форме оптического импульса, а в так называемом «звоне» электрического сигнала на выходе фотоприёмника, возникающем из-за неидеальности согласования фотодиода с линией передачи электрического сигнала. Характер «звона» зависит от параметров (в частности, длины) подключённого к выходу фотоприёмника высокочастотного кабеля. На осциллограммах, полученных на двух разных осциллографах, этот «звон» отличается.

На рис. 4, а приведена переходная характеристика фотоприёмника ФПУ-А, где точками 1, 2 отмечены моменты, когда переходной процесс минует соответственно 0,1 и 0,9 уровня «полки» переходного процесса, точка 3

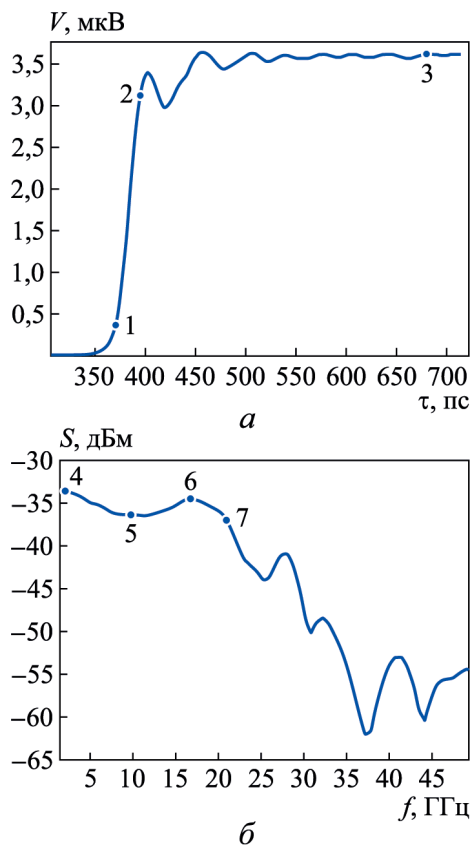


Рис. 4. Характеристики фотоприёмника ФПУ-А:

a – переходная характеристика, полученная интегрированием импульсной характеристики; *б* – амплитудно-частотная, рассчитанная из импульсной характеристики; координаты точек 1 (13,25; $3,603 \cdot 10^{-7}$); 2 (38; $3,124 \cdot 10^{-6}$); 3 (305,1; $3,615 \cdot 10^{-6}$); 4 (2,101; -33,61); 5 (9,804; -36,33); 6 (16,81; -34,51); 7 (21,01; -37,03)

Fig. 4. FPU-A photodetector characteristics:

a – transient response obtained by integrating the impulse response; *b* – amplitude-frequency, calculated from the impulse response; 1 (13,25; $3,603 \cdot 10^{-7}$); 2 (38; $3,124 \cdot 10^{-6}$); 3 (305,1; $3,615 \cdot 10^{-6}$); 4 (2,101; -33,61); 5 (9,804; -36,33); 6 (16,81; -34,51); 7 (21,01; -37,03)

обозначает уровень, принятый за установившийся режим переходного процесса. Данная переходная характеристика получена из импульсной характеристики (см. рис. 3, *a*) путём интегрирования во времени. Время нарастания переходной характеристики в диапазоне 0,1–0,9 значений установившегося режима соответствует половине максимального времени длительности импульсной характеристики $\tau = 218$ пс.

Приведённые на рис. 3, 4, *a* зависимости иллюстрируют главную проблему, возникающую при практическом использовании метода измерения времени нарастания переходной характеристики, описанного в ГОСТ 17772-88. Расчётная переходная характеристика ФПУ-А является колебательной (см. рис. 4, *a*). При непосредственном измерении скорости нарастания переходной характеристики

график, аналогичный приведённому, невозможно рассматривать как информативный, поскольку не определена природа колебаний (причиной может быть форма испытательного оптического импульса). Предложенный метод количественной оценки быстродействия по импульсной характеристике фотоприёмника позволяет с уверенностью утверждать, что колебания наблюдаются из-за несовершенства электрического согласования выхода фотоприёмника, а не из-за колебаний мощности оптического импульса.

В задачах радиофотоники, когда по оптическому каналу передаётся аналоговый СВЧ-сигнал, характеристикой фотоприёмника, не менее важной чем времена нарастания и спада, является неравномерность его чувствительности внутри полосы пропускания, т. е. неравномерность его амплитудно-частотной характеристики (АЧХ). Для непосредственного измерения АЧХ оптоэлектронного преобразователя требуется специальный набор аппаратуры – векторный анализатор цепей и источник оптического излучения с внешней модуляцией оптического сигнала и точно измеренной АЧХ. Точность определения АЧХ исследуемого фотоприёмника будет определяться главным образом точностью определения АЧХ опорного излучателя. В настоящее время в нашей стране отсутствует эталонная база, позволяющая обеспечить единство измерений АЧХ фотоприёмников в СВЧ-диапазоне. Это делает актуальными различные косвенные методы измерений АЧХ.

Частотные характеристики линейных систем связаны с импульсными характеристиками через преобразование Фурье [например, 3]. Искомая АЧХ – это спектральная плотность импульсной характеристики ФПУ [4]. Если оптоэлектронный преобразователь согласован с коаксиальным входом 50 Ом измерительного прибора, то спектральная плотность $S(f)$ его импульсной характеристики вычисляется по формуле

$$S(f) = 10 \log_{10} \left| \int_{-\infty}^{+\infty} g(t) \exp(-j2\pi f t) dt \right|^2 / 50 - 30, \quad (3)$$

где $g(t)$ – функция, описывающая импульсную характеристику оптоэлектронного преобразователя.

На рис. 4, *б* представлена АЧХ, рассчитанная по формуле (3). Этот график был также получен при помощи осциллографа, работающего в режиме «преобразование Фурье» (на рис. 4, *б* не показан). По уровню АЧХ -3 дБ можно приблизительно оценить полосу пропускания. Точками 4–6 отмечены локальные максимумы и минимум АЧХ, достигаемые при значениях частот 2,1; 9,8 и 16,8 ГГц соответственно. Точке 7 соответствует значение АЧХ на частоте 21 ГГц. Таким образом, неравномерность АЧХ превышает 3 дБ в окрестности частоты 21 ГГц, что соответствует паспортным данным фотоприёмника. К недостаткам данного метода можно отнести низкую точность,

связанную со сравнительно низкой точностью получаемых показаний осциллографа.

Необходимо также отметить, что если в качестве системы регистрации в данной установке использовать не осциллограф, а радиочастотный спектроанализатор, стоимость которого существенно ниже стоимости цифрового осциллографа для того же частотного диапазона, то на экране можно наблюдать линейчатый спектр, огибающая которого совпадает с графиком, показанным на рис. 4, б.

Таким образом, в случае линейного режима работы фотоприёмника и при условии, что испытательные оптические импульсы существенно короче длительностей его импульсной характеристики, можно получить численные оценки быстродействия фотоприёмника и неравномерности его АЧХ.

Заключение. Импульсная характеристика фотоприёмника менее подвержена изменениям, обусловленным флуктуациями мощности излучения испытательного импульса, нежели переходная характеристика. При уменьшении длительности испытательного импульса с его помощью можно получать импульсные характеристики более быстродействующих приёмников. Поэтому перспективно использование импульсов фемтосекундного волоконного лазера с длительностью импульсов менее 100 фс. Это значительно меньше времени нарастания выходного сигнала самых быстродействующих на сегодняшний день фотодиодов. До этого существовали попытки применения в метрологии твердотельных фемтосекундных лазеров [5, 6]. Однако волоконные лазеры имеют преимущество перед ними из-за меньшего объёма, простоты изменения конструкции, что имеет первостепенное значение для количественной оценки быстродействия приёмников лазерного излучения в условиях как производства, так и эксплуатации импульсных лазерных систем. Недостатком описанного в настоящей статье метода является необходимость использования дорогостоящего широкополосного осциллографа. Однако экспериментально установлено, что при незначительном усложнении измерительной установки можно заменить этот прибор значительно более дешёвым стробоскопическим осциллографом.

Предложенный авторами настоящей статьи метод измерения параметров быстродействия фотоприёмников лишён многих недостатков «классического» метода и хорошо зарекомендовал себя при работе со скоростными фотоприёмниками. Переходная характеристика фотоприёмника может быть легко получена из импульсной путём интегрирования последней по времени, что позволяет сравнивать результаты измерений, найденные обоими методами. Также можно оценивать и неравномерность АЧХ фотоприёмника. Созданную экспериментальную установку можно использовать для количественной оценки быстродействия фотоприёмников лазерных дальнометров, а также телекоммуникационных приёмников и других устройств. На основании предложенного метода во ВНИИОФИ разработана и аттестована Методика измерений амплитудно-частотных характеристик в диапазоне от $4,5 \cdot 10^7$ до $4 \cdot 10^{10}$ Гц и длительности

импульсных характеристик в диапазоне от $2 \cdot 10^{-11}$ до 10^{-8} с быстродействующих фотоприёмников.

Работа выполнена с применением оборудования Центра коллективного пользования высокоточными измерительными технологиями в области фотоники (ср.vniiofi.ru), созданного на базе ВНИИОФИ и поддерживаемого Минобрнауки России в рамках выполнения соглашения № 05.595.21.0005 (уникальный идентификатор RFMEFI59519X0005).

Список литературы

1. Крюков П. Г. Лазеры ультракоротких импульсов // Квантовая электроника. 2001. Т. 31. № 2. С. 95–119.
2. Бычков С. Б., Глазов А. И., Светличный А. Б. Установка для измерения нелинейности градуировочной характеристики приёмников оптического излучения для ВОСП // Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции «Метрологическое обеспечение фотоники», Москва, 14–17 апреля 2015 г. М.: ВНИИОФИ, 2015. С. 136–138.
3. Ким Д. П. Теория автоматического управления. В 2-х т. Т. 1. М.: Физматлит, 2003.
4. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2007.
5. Кабанов В. Ф., Литвинов В. Ф., Никитин В. В. и др. Использование полупроводникового инжекционного лазера для определения временных характеристик скоростных фотоумножителей // Квантовая электроника. 1974. Т. 1. № 2. С. 420–422.
6. Поврозин А. И., Онищенко И. Н. и др. Фемтосекундный лазер – широкие возможности применения // Сборник докладов IX Международной конференции «Метрология-2014», Харьков, 15–17 октября 2014, Харьков: Институт метрологии, 2014.

References

1. Kryukov P. G., *Quantum electronics*, 2001, vol. 31, no. 2, pp. 95–119. <https://doi.org/10.1070/QE2001v031n02ABEH001906>
2. Bychkov S. B., Glazov A. I., Svetlichny A. B., *Abstracts of the all-Russian scientific and technical conference "Metrologicheskoe obespechenie fotoniki"*, Moscow, 14–17 April, 2015, Moscow, VNIIOFI Publ., 2015. pp. 136–138 (in Russian).
3. Kim D. P., *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya*, in 2 vol., vol. 1, Moscow, Fizmatlit Publ., 2003 (in Russian).
4. Sergienko A. B., *Cifrovaya obrabotka signalov*, Saint Petersburg, Piter Publ., 2007 (in Russian).
5. Kabanov V. F., et al, *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1974, vol. 4, no. 2, p. 236. <http://doi.org/10.1070/QE1974v004n02ABEH006706>
6. Povrozin A. I., et al, *Abstracts of the IX International Scientific & Technical Conference "Metrology and measurement techniques" ("Metrology-2014")*, 15–17 October, 2014, Kharkiv, National Scientific Centre "Institute of Metrology".

Дата поступления: 21.05.2020.

Дата принятия: 21.06.2020.

Method for measuring the speed parameters of photodetectors

Stepan B. Bychkov¹, Igor V. Volkov¹, Aleksander I. Glazov¹, Ivan S. Korolev¹, Konstantin B. Savkin¹, Nikolay P. Khatyrev²

¹All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements,
Moscow, Russian Federation, e-mail: vniofi@vniofi.ru

²Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering (VNIIFTRI),
Mendeleevo, Moscow region, Russian Federation, e-mail: office@vniiftri.ru

The article discusses the difficulties that arise when measuring the speed parameters of modern broadband photodetector devices by a method based on the measurement results of the rise time of the transition characteristic are considered. As a solution of the described problems a method is proposed for quantitatively evaluating of speed parameters using the results of determining the impulse response of the studied photodetector. The source of the test signals is a pulsed fiber laser operating in the self-mode locking mode and generating ultrashort (about 3 ps) optical pulses. The article describes in detail the method itself, the measuring setup that allows it to be implemented, and presents some results of experimental testing of the method.

Key words: photodiode, photodetector, response speed, impulse response, amplitude-frequency characteristic, picosecondspulsed laser.

Колориметрическое исследование самосветящихся объектов в программно-аппаратных средах методом реализации многомерных шкал

Е. Н. Савкова

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь,
e-mail: evgeniya-savkova@yandex.ru

Показано, что для протяжённых самосветящихся объектов с широким диапазоном яркостей пока не решены вопросы метрологической прослеживаемости, поскольку при обработке цифровых изображений используются ранговые шкалы встроенных систем. Для таких шкал отсутствует «фиксированная» единица, что не позволяет получить надёжные результаты и обеспечить единство измерений. Описан эксперимент по оценке точности определения интенсивности (координат) цвета самосветящихся объектов. В условиях повторяемости и промежуточной прецизионности по сравнению с референтной методикой измерений определены координаты цвета и цветности самосветящихся объектов (опорных образцов) путём их многократной цифровой регистрации с помощью систем технического зрения. Определены возможности разрабатываемой методологии колориметрических исследований в программно-аппаратных средах с позиций построения многомерной условной шкалы.

Ключевые слова: колориметрия, цифровое изображение, цветность, цветовая шкала, точность.

Введение. Объективная колориметрия подразделяется на базовую и высшую [1]. Базовая колориметрия – «это инструмент прогнозирования того, будут ли соответствовать друг другу по цвету два световых потока (визуальных стимулов) с разным спектральным распределением энергии при заданных условиях наблюдений; прогноз определения трёхстимульными значениями двух визуальных стимулов, и если трёхстимульные значения у одного стимула точно такие же, как и у другого, то цветовое соответствие будет констатировано усреднённым наблюдателем с нормальным цветовым зрением» [2]. Таким образом, базовая колориметрия основывается на стандартизованных моделях условий наблюдения и находит применение при контроле продукции в медицине, химической, лакокрасочной промышленности, полиграфии [3–5]. В работе [4] описаны колориметрические методы определения следов металлов, в [6] предложены методы исследований влияния водохранилищ на изменение окисляемости и цветности речной воды, автором [7] разработаны методы и средства оперативной идентификации пород древесины. В работах [5, 8, 9] представлены колориметрические методы исследований космических объектов – галактик и туманностей, позволяющие получать информацию о распределениях энергии в их спектре, её абсолютной величине и временных характеристиках переменности.

Колориметрия высокого разрешения определена как методология качественных и количественных методов исследований цветовых характеристик самосветящихся и несамосветящихся объектов, основанная на технологиях

цифровой регистрации и обработке цифровых изображений, позволяющей с заданным уровнем достоверности обеспечивать надёжные результаты. Методология колориметрии высокого разрешения или колориметрии в программно-аппаратных средах разрабатывается на базе научно-исследовательской лаборатории оптико-электронного приборостроения Белорусского национального технического университета в рамках заданий Государственной программы научных исследований «Электроника и фотоника».

Актуальность настоящей работы определяется тем, что в настоящее время повсеместно используются устройства отображения информации индивидуального и коллективного пользования, вблизи которых люди проводят много времени на работе и отдыхе, поэтому важнейшей проблемой является их исследование с позиций безопасности и эргономики. В то же время развиваются перспективные методы контроля объектов, основанные на применении технологий цифровой регистрации с высоким пространственным разрешением и обработке полученных изображений. Данные методы предполагают принятие решений о соответствии–несоответствии объекта установленным требованиям по контролируемому параметру на основе графических данных, считываемых с устройства отображения информации, при измерительном, визуальном и регистрационном контроле.

Учитывая высокую стоимость и потенциальную опасность объектов исследований, а также многообразие средств технического и программного обеспечения, входящих в измерительную систему, первой важной проблемой

является обеспечение метрологической прослеживаемости при измерительном контроле, которое предполагает ссылки на опорные образцы (эталоны, стандартные образцы) путем иерархии калибровок. Существует опыт определения координат цветности продукции – несамосветящихся объектов, с использованием систем технического зрения, например, в медицине, полиграфии, лакокрасочной промышленности, в основу которого положен дифференциальный метод измерений, основанный на определении небольших цветовых различий для узких измерительных задач. Вопросы метрологической прослеживаемости пока не решены для протяжённых самосветящихся объектов с широким диапазоном яркостей, вследствие использования ранговых шкал встроенных систем при обработке цифровых изображений. Применение ранговых шкал не позволяет получать надёжные результаты, поскольку в этих шкалах нет «фиксированной» единицы, т. е. не выполняется условие обеспечения единства измерений.

Вторая проблема касается регистрационного и визуального видов контроля, предполагающего принятие решений о состоянии объекта на основе регистрации событий или наличия (отсутствия) какого-либо признака (капиллярная дефектоскопия, визуально-оптический контроль внутренних поверхностей объектов, лазерное сканирование зданий, зондирование поверхности Земли и др.). В данном случае предусмотрены специальные программы проверки квалификации лабораторий, основанные на использовании шкал наименований для идентификации определенного (известного) свойства или вещества. Однако такие программы применяются для аккредитованных лабораторий в пределах их области аккредитации и не затрагивают научной сферы деятельности.

Цель настоящей статьи – разработка информационно-методического обеспечения и метрологического обеспечения процессов исследований колориметрических свойств объектов в программно-аппаратных средах. Указанные среды основаны на технологиях цифровой регистрации с высоким пространственным разрешением и обработке графических данных и позволяют повысить точность, информативность и эффективность контроля объектов на всех стадиях жизненного цикла за счёт обеспечения метрологической прослеживаемости путём создания условной многомерной шкалы.

Основные положения колориметрии в программно-аппаратных средах. Сформулируем основные положения колориметрии в программно-аппаратных средах:

цифровое изображение представляет собой результат свёртки цветовых охватов элементов информационно-измерительного канала, включающего источник света, освещаемый объект, матричное фотоприёмное устройство, программное обеспечение, устройство отображения информации. Каждый элемент канала есть потенциальный объект исследований в зависимости от поставленной задачи – оценки цветопередачи источника света, контроля цветовых и яркостных свойств освещаемого объекта, оценки возможностей программного обеспечения системы, регулировки цифровой камеры, настройки устройства отображения информации и др. Таким образом, цифровое изображение

является информационной моделью одного из элементов при условии, что все остальные элементы валидированы [10];

принципы и методы измерений фотометрических и колориметрических характеристик объектов в программно-аппаратных средах основаны на цифровой регистрации объекта и аттестованных опорных образцов матричным фотоприёмным устройством, оптико-электронных преобразованиях в информационно-измерительном канале и обработке полученных цифровых изображений, при которой строят градуировочные зависимости интенсивности цифрового изображения от яркости опорных образцов и времени экспозиции для трех цветовых каналов и определяют яркость и цветность объекта в контрольной точке. Аттестованные (опорные) образцы обеспечивают метрологическую прослеживаемость путем построения многомерной условной шкалы и представляют собой неточечные первичные или вторичные излучатели с равномерно распределенной яркостью (коэффициентом отражения) [11];

определение цветовых характеристик в дискретных системах технического зрения с произвольным количеством входных и выходных величин основано на явлениях метамеризма, статистической избыточности, эффектах квантования и заключается в усреднении сигналов цифрового изображения по некоторой области в контексте пространственно-временных факторов, следовательно, методология применима к неточечным (протяжённым) объектам. Дефинициальная неопределённость характеризует наименьшую в многомерном функциональном пространстве область рассеяния значений, обусловленную ограниченной детализацией в определении цвета как субъективного ощущения и афинной векторной величины. Дефинициальная неопределённость зависит от номинальных ступеней квантования, воспроизводимых условными шкалами цифрового изображения, которые в трёхмерных цветовых пространствах в предельном случае представляют собой эллипсы Мак-Адама [12];

результат измерения координат цветности как векторной величины описывается вектор-столбцом (математическим ожиданием) и набором ковариационных матриц (неопределённостью). Метрологическое моделирование результатов колориметрических измерений в программно-аппаратных средах в дискретных системах с произвольным количеством входных и выходных величин основано на модульных восходящем и нисходящем подходах к построению моделей математических ожиданий результатов измерений и моделей их рассеяния (неопределённости и ковариации), комплексировании составляющих неопределённости с учётом энтропии измерительной информации [13].

Метод численного моделирования условной многомерной колориметрической шкалы. Данный метод предложен в [11] и заключается в создании наборов аттестованных опорных образцов. Опорные образцы представляют собой неточечные излучатели, относящиеся к определённому сектору цветовой палитры и образующие при цифровой регистрации с пошагово увеличивающимся временем экспозиции векторы в цветовом пространстве XYZ. Начало векторов совпадает с нулевой точкой отсчёта

пространства. Векторы пересекают плоскость цветового локуса графика цветностей и формируют на ней геометрическое место точек цветности, что позволяет обеспечить единство измерений. В процессе численного моделирования устанавливаются закономерности отображения градуировочных зависимостей в пространстве XYZ для его разделения (зонирования) на секторы [11]. Это позволяет в процессе измерений определять требуемый сектор цветового пространства и тем самым уменьшать методическую составляющую неопределённости измерения координат цветности. Палитра разбивается на секторы по принципу преобладания R (красной), G (зелёной) и B (синей) составляющих, расположенных по убыванию интенсивности в следующем порядке: сектор I – RGB ; сектор II – RBG ; сектор III – GBR ; сектор IV – GRB ; сектор V – BRG ; сектор VI – BGR . Интенсивности (координаты цвета) R , G , B каждого элемента в пределах секторов определяются путём усреднения интенсивностей по области примерно от 60×60 до 128×128 пикселей. Затем координаты цифрового изображения трансформируются $RGB \rightarrow XYZ$ и рассчитываются координаты цветности.

Исследуются по три ячейки одинаковой цветности (от светлого к более тёмному) из каждого сектора. На основе пересчётов определяются границы секторов в пространстве XYZ. Такое разбиение позволяет определить зоны цветности в видимом диапазоне опорных образцов – первичных излучателей, используемых для построения градуировочных зависимостей. Далее оптимизируется количественный и качественный составы опорных образцов в зависимости от требуемых фотометрических и колориметрических характеристик. Цветовое пространство XYZ зонировается в автоматизированном режиме с использованием разработанной компьютерной программы «Фотон» (Свидетельство о регистрации № 009, БНТУ, 2016).

Методология моделирования основана на модульном принципе поэтапной обработки графических данных для осуществления перехода от фотометрического измерения скалярных величин к колориметрическому измерению векторных величин. В способе измерения яркости самосветящегося объекта на поверхности исследуемого объекта выделяют контрольные точки или участки, размещают опорные источники света с известной яркостью, с помощью матричного фотоприёмного устройства осуществляют многократную регистрацию самосветящегося объекта и опорных источников света с пошагово увеличивающимся временем экспозиции, выполняют компьютерную обработку полученных цифровых изображений, при которой определяют интенсивность участков цифровых изображений и яркость в контрольном участке самосветящегося объекта по формуле [14, 15]:

$$L = (N - N_{01})(L_{02} - L_{01}) / (N_{02} - N_{01}) + L_{01}; \quad (1)$$

$$N = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i, \quad (2)$$

где N – усреднённая интенсивность соответствующего участка цифрового изображения, N_i – интенсивность i -го элемента цифрового изображения, отн. ед.; N_{01} , N_{02} , L_{01} , L_{02} – усредненные значения интенсивности участков цифрового изображения и значения яркости опорных источников света соответственно.

По результатам измерений интенсивности участков цифровых изображений строили градуировочные зависимости, показанные на рис. 1, 2. Использование опорных источников света позволяет по градуировочным зависимостям определять яркость самосветящегося объекта в контролируемых участках. Таким образом осуществляется расширение динамического диапазона измерений [15].

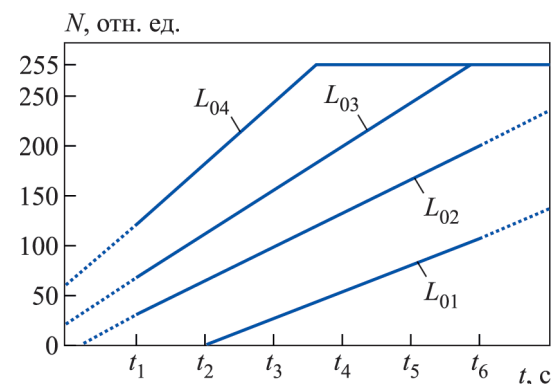


Рис. 1. Градуировочные зависимости интенсивности участка цифрового изображения от времени экспозиции

Fig. 1. Calibration dependences of the digital image section intensity on the exposure time

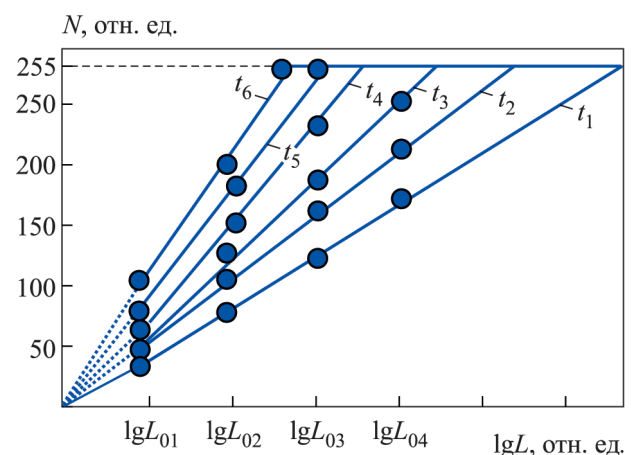


Рис. 2. Градуировочные зависимости интенсивности цифровых изображений от яркости опорных источников света при различных значениях времени экспозиции

Fig. 2. Calibration dependences of digital image intensity on the reference light sources brightness for different exposure times

Таблица 1

Экспериментальные данные колориметрических измерений цветов «жёлтый тёмный» и «жёлтый светлый»

Цвет	t, с	Координаты цвета в пространствах RGB, XYZ						Координаты цветности		
		R	G	B	X	Y	Z	x	y	z
Жёлтый тёмный	0,1	161	150	0	708,5479	423,755	262,755	0,4012	0,4475	0,1523
	0,2	201	210	3	927,7965	1165,2273	28,6479	0,3803	0,4314	0,1883
	0,3	233	229	11	1058,7252	1284,9314	74,4758	0,3981	0,4459	0,1560
Жёлтый светлый	0,1	178	172	2	796,4170	481,5528	303,5528	0,4296	0,4632	0,1072
	0,2	215	222	19	1005,6647	1235,2773	118,8347	0,4313	0,4681	0,1006
	0,3	252	249	39	1178,0139	1397,4282	232,2462	0,4126	0,4642	0,1232

Таблица 2

Экспериментальные данные колориметрических измерений цветов «синий тёмный» и «синий светлый»

Цвет	t, с	Координаты цвета в пространствах RGB, XYZ						Координаты цветности		
		R	G	B	X	Y	Z	x	y	z
Синий тёмный	0,1	0	8	135	166,5906	166,5906	166,5906	0,1241	0,1021	0,7738
	0,2	0	21	167	225,5291	106,4414	935,4346	0,1259	0,1041	0,7700
	0,3	0	45	214	320,6893	219,4429	1199,7230	0,1264	0,1038	0,7708
Синий светлый	0,1	3	16	144	199,0827	199,0827	190,7760	0,1393	0,1162	0,7445
	0,2	6	30	177	269,2098	154,3587	991,8861	0,1310	0,1179	0,7511
	0,3	10	56	225	355,5554	216,3319	1261,0900	0,1416	0,1169	0,7415

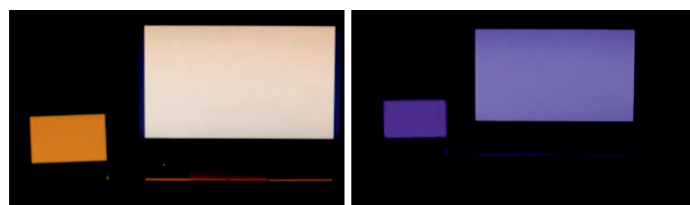


Рис. 3. «Синий» и «жёлтый» опорные образцы для проведения эксперимента

Fig. 3. Reference samples for the experiment

С увеличением времени экспозиции интенсивность цифрового изображения в пределах цветового охвата также возрастает. Это активная область диапазона измерений обычно составляет 60 дБ.

Эксперимент по реализации шкалы был проведен на базе аккредитованной испытательной лаборатории ОАО «Руденск» (г. Руденск, Республика Беларусь). В качестве опорных образцов использовались самосветящиеся объекты – мониторы видеотерминалов, на каждом из которых были созданы однородные цветовые поля. Опорные образцы (самосветящиеся объекты) были подобраны таким образом, чтобы они представляли согласованные пары по

цветности, т. е. находились в одном и том же секторе цветового пространства XYZ, что позволило построить векторы, в совокупности представляющие многомерную условную шкалу. Примеры пар экспериментальных (опорных) образцов представлены на рис. 3. Светотехнические характеристики образцов были определены с помощью измерительной установки, включающей колориметр C1210 с колориметрической головкой (Lichtmesstechnik GMBH Berlin, Германия), источник типа А, с комплектом контрольных светофильтров. Диапазон измерений координат цветности $x=0,0039...0,7347$; $y=0,0048...0,8338$. Предел допускаемой абсолютной погрешности измерений координат цветности $\Delta x=\Delta y=0,007$. Диаметр светочувствительной поверхности 60 мм. Индикация от 0,01 до 600000 лк.

С помощью цифровой камеры полупрофессионального класса Nikon 5100 с оптикой Nikon 35mm f/1.8G AF-S DX

Nikkor (Nikon, Япония) из одной и той же точки пространства осуществляли съёмку опорных образцов при времени экспозиции $t=0,1; 0,2; 0,3$ с. Изображения сохраняли в формате RAW. Далее обрабатывали цифровые изображения и определяли интенсивности R, G, B в красном, зеленом и синем цветовых каналах соответственно, а затем рассчитывались координаты цвета по формулам [16]:

$$X=2,7689R+1,7517G+1,1302B; \quad (3)$$

$$Y=1,0000R+4,5907G+0,0601B; \quad (4)$$

$$Z=0,0565G+5,5943B. \quad (5)$$

Преобразования координат цвета в координаты цветности осуществляли по формулам, указанным в ГОСТ 13088-67 «Колориметрия. Термины, буквенные обозначения» и работе [17]:

$$x=X/(X+Y+Z); \quad (6)$$

$$y=Y/(X+Y+Z); \quad (7)$$

$$z=Z/(X+Y+Z). \quad (8)$$

Далее в соответствии с ИСО 5725-2-2002 «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Ч. 2. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений» находили математические ожидания (средние арифметические значения $\bar{x}$, $\bar{y}$, $\bar{z}$) координат цветности и их средние квадратические отклонения (СКО) s_x , s_y , s_z :

$$s_x = \sqrt{(x_j - \bar{x})^2 / (m-1)}; \quad (9)$$

$$s_y = \sqrt{(y_j - \bar{y})^2 / (m-1)}; \quad (10)$$

$$s_z = \sqrt{(z_j - \bar{z})^2 / (m-1)}, \quad (11)$$

где x_j , y_j , z_j – j -е значения координат цветности; m – количество значений в совокупности (для данного эксперимента $m=3$).

Суммарное СКО s_Σ согласно ISO 7724-2-2008 «Краски и лаки. Колориметрия. Ч. 2. Цветовые измерения» определяли как

$$s_\Sigma = \sqrt{s_x^2 + s_y^2 + s_z^2}. \quad (12)$$

По формулам, приведённым в ИСО 5725-4-2002 «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Ч. 4. Основные методы определения правильности стандартного метода измерений», рассчитывали смещения:

$$\delta_x = \bar{x} - \mu_x; \quad (13)$$

$$\delta_y = \bar{y} - \mu_y; \quad (14)$$

$$\delta_z = \bar{z} - \mu_z, \quad (15)$$

где μ_x , μ_y , μ_z – эталонные значения координат цветности, измеренные стандартным методом.

В табл. 1–3 представлены экспериментальные данные по определению координат цвета и цветности для трёх пар образцов, в табл. 4 – рассчитанные для координат x , y , z указанных образцов средние значения, смещения и СКО.

Зависимости интенсивностей в цветовых каналах для указанных образцов представлены на рис. 4.

Проверка результатов на метрологическую совместимость по критериям Кохрена и Граббса в соответствии с ИСО 5725-2-2002 не выявила выбросов результатов. Стандартное отклонение повторяемости составило $s_R \approx 0,045$ единиц цветности. Стандартное отклонение внутрилабораторной воспроизводимости, рассчитанное согласно ИСО 5725-3-2002, составило $s_w \approx 0,046$ единиц цветности.

В табл. 5 приведены данные расчётов смещений (погрешностей) измерения координат цвета опорных образцов.

Таблица 3

Экспериментальные данные колориметрических измерений цветов «красный тёмный» и «красный светлый»

Цвет	t , с	Координаты цвета в пространствах RGB, XYZ						Координаты цветности		
		R	G	B	X	Y	Z	x	y	z
Красный тёмный	0,1	129	25	1	402,1108	334,7335	44,9227	0,5115	0,2811	0,2074
	0,2	183	33	4	569,0356	402,1108	24,2417	0,5114	0,2829	0,2057
	0,3	244	47	6	764,7227	460,1235	36,2213	0,5153	0,2894	0,1953
Красный светлый	0,1	140	34	4	451,7246	451,7246	64,0786	0,5564	0,3220	0,1216
	0,2	194	44	6	621,0226	396,3514	36,0518	0,5489	0,3212	0,1299
	0,3	253	55	8	805,9168	505,9693	47,8619	0,5515	0,3222	0,1263

Таблица 4

Расчётные параметры экспериментальных (опорных) образцов

Цвет	x	y	z	$\bar{x}$	$\bar{y}$	$\bar{z}$	δ_x	δ_y	δ_z	s_x	s_y	s_z	s_Σ
Жёлтый тёмный	0,3920	0,4445	0,1635	0,3840	0,4355	0,1655	0,0080	–0,0090	0,0200	0,026	0,0250	0,0270	0,0450
Жёлтый светлый	0,4229	0,4670	0,1101	0,4245	0,4651	0,1113	0,0160	–0,0190	0,0120	0,027	0,0270	0,0280	0,0460
Синий тёмный	0,1250	0,1030	0,7720	0,1261	0,1033	0,7715	0,0110	–0,0300	0,0500	0,027	0,0270	0,0280	0,0470
Синий светлый	0,1326	0,1173	0,7501	0,1373	0,1170	0,7457	0,0047	–0,0003	–0,0044	0,0027	0,0028	0,0028	0,0047
Красный тёмный	0,5104	0,2826	0,2070	0,5127	0,2845	0,2028	0,0660	0,0190	–0,0420	0,0240	0,0240	0,0250	0,0420
Красный светлый	0,5506	0,3219	0,1276	0,5523	0,3218	0,1259	0,0170	–0,0010	–0,0170	0,0250	0,0250	0,0260	0,0440

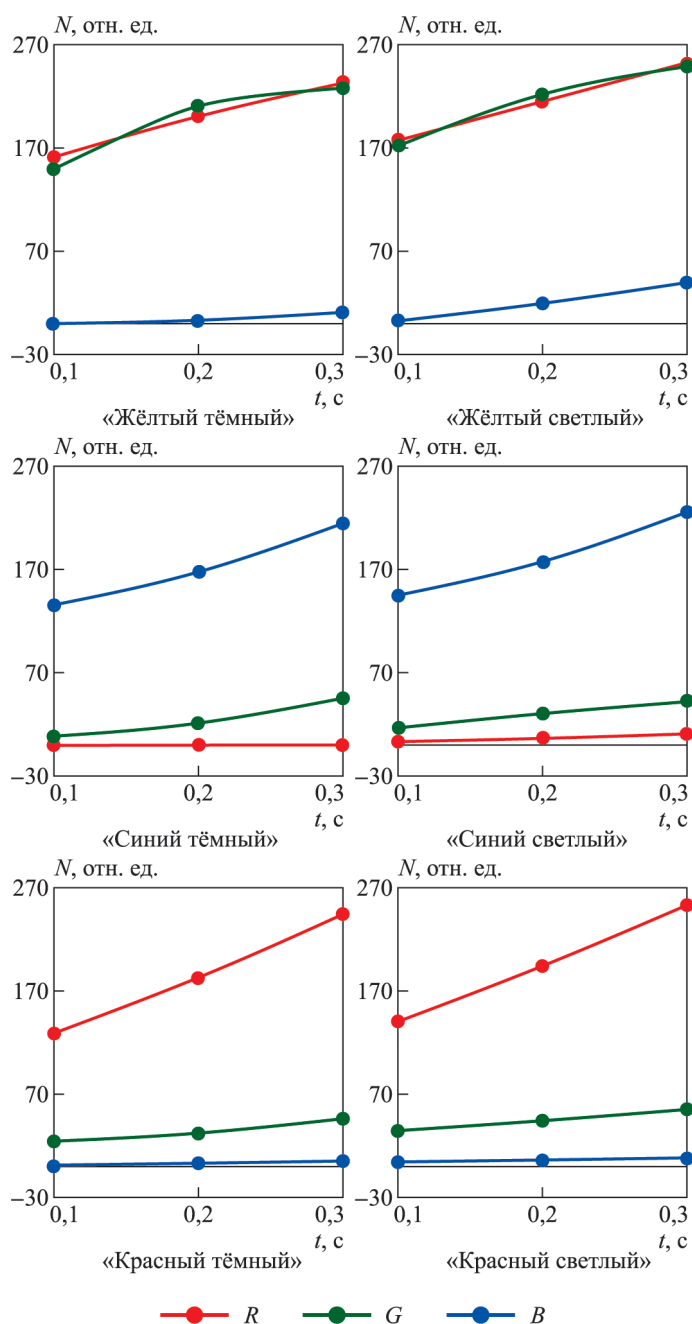


Рис. 4. Зависимости интенсивностей N от времени t экспозиции, полученные при обработке цифровых изображений «жёлтых», «синих» и «красных» опорных образцов

Fig. 4. Dependences of intensities N on exposure t obtained during processing of digital images of reference samples

В результате эксперимента установлены практически линейные зависимости (см. рис. 4) интенсивностей R , G , B в цветовых каналах пространства RGB от времени t экспозиции в активной части динамического диапазона, что может быть использовано для построения условных шкал.

Таблица 5

Погрешности координат цвета опорных образцов

t, c	«Жёлтый»			«Синий»			«Красный»		
	ΔR	ΔG	ΔB	ΔR	ΔG	ΔB	ΔR	ΔG	ΔB
0,1	17	22	2	3	8	9	21	9	3
0,2	14	12	16	6	9	10	11	11	2
0,3	19	20	28	10	11	11	11	8	2

Заключение. Расширение динамического диапазона методов колориметрических измерений позволяет преодолеть ограниченность цветовых охватов элементов информационно-измерительного канала. Предложенная последовательность действий, описывающая процесс построения колориметрической условной шкалы, обеспечивает увеличение разрешения измерения цвета за счёт фиксации номинальных ступеней квантования в цветовых каналах изображений и уменьшение методической составляющей неопределённости. Любой регистрируемый реальный объект может иметь почти бесконечное множество виртуальных реализаций, ограниченное только ресурсами лаборатории. Корректное использование систем технического зрения, в частности, цифровых камер профессионального и полупрофессионального классов, в качестве измерительных устройств в колориметрии программно-аппаратных сред предполагает обеспечение единства измерений. Это единство достигается путём построения условных шкал яркости компьютерных изображений в цветовых каналах и фиксации на них реперных точек метрологической прослеживаемости. В качестве таких реперных точек предложено использовать равнояркие поверхности самосветящихся объектов, например, органических светодиодов или видеотерминалов.

Современные системы технического зрения имеют высокое пространственное разрешение и разрешение по яркости в пределах активной области динамического диапазона, поэтому их можно использовать для колориметрических исследований протяжённых объектов, при этом относительная расширенная неопределённость измерения цветности находится в диапазоне $\pm(1-8) \%$.

Разрабатываемая методология колориметрии в программно-аппаратных средах позволяет оценивать характеристики объектов документировать результаты исследований в режиме реального времени, что может иметь большое значение при эксплуатационном контроле и подтверждении соответствия объектов.

Список литературы

1. Вышецки Г. Развитие современной колориметрии. Международная ассоциация цвета, 1973, pp. 21–51.
2. Фершильд М. Д. Модели цветового восприятия. Пер. с англ. 2-я редакция. Рочестерский технологический институт, Манселловская научная лаборатория по цвету, 2006. 439 с.

URL: <https://mexalib.com/view/36926> (дата обращения: 05.05.2020).

3. Сорокин Д. А. Градация цветового различия и идентификация фарфора методами многомерного шкалирования: автореф. дис. канд. техн. наук (Российская экономическая академия им. Г. В. Плеханова, Москва, 2009).

4. Сендел Е. Колориметрические методы определения следов металлов. Пер. с англ. М.: Мир, 1964. 90 с.

5. Пармасын Э. С. Колориметрия и поляриметрия некоторых кометарных туманностей. Ереван: Бюраканская астрофизическая обсерватория Академии наук Армянской ССР, Ереванский государственный университет, 1963. 10 с.

6. Соколов Д. И. Влияние водохранилищ на изменение окисляемости и цветности речной воды (на примере источников водоснабжения г. Москвы): автореф. дис. канд. геогр. наук (МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, 2013).

7. Воронин А. А. Разработка и исследование спектрального метода и аппаратуры для оперативной идентификации пород древесины: автореф. дис. канд. техн. наук (Государственный университет информатики и технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, 2011).

8. Шаповалова А. И. Детальная колориметрия галактик в окрестности NGC 1068 и иррегулярных галактик: автореф. дис. канд. физ.-мат. наук (Ереванский государственный университет, Ереван, 1975).

9. Шарипова Л. М. Спектрофотометрия звезд, ядер активных галактик и колориметрия слабых звездобразных околядерных объектов: автореф. дис. канд. физ.-мат. наук (Крымская астрофизическая обсерватория, 2001).

10. Савкова Е. Валидационная модель информационного измерительного канала в системах технического зрения // Международный журнал современной техники и технологий, 2017, Т. 1. № 4. С. 28–33. URL: <http://www.newengineeringjournal.com/archives/2017/vol1/issue4/2-1-11> (дата обращения 05.05.2020).

11. Савкова Е., Матюш И. Метрологическое обеспечение колориметрии в программно-аппаратных средах // Международный журнал инновационных исследований в электронике и коммуникациях. 2016. Т. 3. № 5. С. 6–19. <https://doi.org/10.20431/2349-4050.0305002>

12. Савкова Е. Основные положения колориметрии высокого разрешения // Материалы 11-й Международной научно-технической конференции «Приборостроение-2018», Минск, 14–16 ноября 2018 г., Минск: БНТУ, 2018. С. 152–154.

13. Савкова Е. Н. Моделирование результата измерения в колориметрии высокого разрешения // Мир измерений. 2016. № 2. С. 54–62.

14. Савкова Е. Н., Зуйков И. Е. Способ измерения яркости несамосветящихся объектов с использованием матричных фотоприемных устройств // Материалы IX Международной научно-практической конференции «Современные исследования и развитие-2013», София, Болгария, 17–25 января 2013. Т. 2. Математика. Физика. Современные технологии информации. Харьков, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, 2013. С. 38–42.

15. Савкова Е. Н., Зуйков И. Е. Колориметрические измерения на основе цифровой регистрации с высоким пространственным разрешением // Материалы 6-й Международной научно-технической конференции «Приборостроение-2013», Минск, 20–22 ноября, 2013, Минск: Белорусский национальный технический университет. С. 176–178.

16. Мешков В. В., Матвеев А. Б. Основы светотехники: Учеб. пособие для вузов в 2-х частях. Ч. 2. Физиологическая оптика и колориметрия. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1989. 432 с.

17. Годен Ж. Колориметрия при видеообработке. Пер. с англ. М.: Техносфера, 2008. 328 с.

References

1. Wyszecki G., *International Colour Association*, 1973, pp. 21–51.

2. Fairchild M. D., *Modeli cvetovogo vospriyatiya*, 2nd edition, Rochester Institute of technology, Mansell color science laboratory, 2006, 439 p., available in Russian at: <https://mexalib.com/view/36926> (accessed: 05.05.2020).

3. D. A. Sorokin, Extended abstract of candidate's dissertation in Technical Sciences (Plekhanov Russian Academy of Economics, Moscow, 2009).

4. Sendel E., *Kolorimetrichekie metody opredeleniya sledov metallov*, Moscow, Mir Publ., 1964, 90 p. (in Russian).

5. Parmasyan E. S., *Kolorimetriya i polyarimetriya nekotoryh komentarnykh tumannostej*, Byurakan Astrophysical Observatory of the Academy of Sciences of the Armenian SSR, Yerevan Yerevan State University Publ., 1963. 10 p. (in Russian).

6. D. I. Sokolov, Extended abstract of candidate's dissertation in Geography (Lomonosov Moscow State University, Moscow, 2013).

7. A. A. Voronin, Extended abstract of candidate's dissertation in Technical Sciences (Saint Petersburg, State University of Informatics and technologies, mechanics and optics, 2011).

8. A. I. Shapovalova, Extended abstract of candidate's dissertation in Geography Physical and Mathematical Sciences (Yerevan, Yerevan State University, 1975).

9. L. M. Sharipova, Extended abstract of candidate's dissertation in Geography Physical and Mathematical Sciences (Crimean astrophysical Observatory, Crimea, 2001).

10. Saukova Y., *International Journal of Advanced Engineering and Technology*, 2017, vol. 1, no. 4, pp. 28–33, available at: <http://www.newengineeringjournal.com/archives/2017/vol1/issue4/2-1-11> (accessed: 05.05.2020).

11. Saukova Y., Matyush I., *International Journal of Innovative Research in Electronics and Communications (IJIREC)*, 2016, vol. 3, no. 5, pp. 6–19. <https://doi.org/10.20431/2349-4050.0305002>

12. Saukova Y., *Proceedings of the 11th International scientific and technical conference "Instrumentation-2018"*, Minsk, November 14–16, 2018, Minsk, BNTU Publ., 2018, pp. 152–154.

13. Saukova Y., *Mir izmerenij*, 2016, no. 2, pp. 54–62 (in Russian).

14. Saukova Y., Zuikov I. E., *Proceedings of the IX International scientific and practical conference "Modern research and development-2013"*, Sofia, Bulgaria, January 17–25, Kharkov, Kharkov National University of Radio Electronics Publ., 2013, vol. 27, pp. 38–42.

15. Saukova Y., Zuikov I. E., *Proceedings of the 6th International scientific and technical conference "Instrumentation-2013"*, Minsk, 20–22 November, Minsk, BNTU Publ., pp. 176–178.

16. Meshkov V. V., Matveev A. B., *Osnovy svetotekhniki. Ucheb. posobie dlya vuzov in 2 pts. Pt. 2. Fiziologicheskaya optika i kolorimetriya Fundamentals of lighting engineering*, Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989, 432 p. (in Russian).

17. Gauden J., *Kolorimetriya pri videoobrabotke*, Moscow, Technosphaera Publ., 2008. 328 p. (in Russian).

Дата поступления: 06.04.2020.

Дата принятия: 27.05.2020.

Colorimetric research of self-luminous objects in software and hardware environments by the method of multidimensional scales implementation

Yauheniya N. Saukova

Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus, e-mail: evgeniya-savkova@yandex.ru

It is shown that the issues of metrological traceability for extended self-luminous objects with a wide range of brightness have not yet been resolved, since the rank scales of embedded systems are used for processing digital images. For such scales, there is no "fixed" unit, which does not allow you to get reliable results and ensure the unity of measurements. An experiment is described to evaluate the accuracy of determining the intensity (coordinates) of the color of self-luminous objects. In terms of repeatability and intermediate precision compared to the reference measurement method, the color and chromaticity coordinates of self-luminous objects (reference samples) were determined by their multiple digital registration using technical vision systems. The possibilities of the developed methodology for colorimetric studies in hardware and software environments from the point of view of constructing a multidimensional conditional scale are determined.

Key words: colorimetry, digital image, chromaticity, color scale, accuracy.

Оценка точности реконструкции электрофизических и геометрических параметров многослойных диэлектрических покрытий многочастотным радиоволновым методом поверхностных медленных электромагнитных волн

А. И. Казьмин, П. А. Федюнин

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Воронеж, Российская Федерация, e-mail: alek-kazmin@yandex.ru, fpa1@yandex.ru

Рассмотрена одна из важнейших проблем диагностики многослойных диэлектрических материалов и покрытий – разработка методов количественной интерпретации результатов контроля электрофизических и геометрических параметров этих материалов. Представлены результаты исследования потенциальной информативности многочастотного радиоволнового метода поверхностных медленных электромагнитных волн при реконструкции электрофизических и геометрических параметров многослойных диэлектрических покрытий. Представлена имитационная модель, позволяющая оценить точность реконструкции электрофизических и геометрических параметров многослойных диэлектрических покрытий. В модели учитываются значения электрофизических и геометрических параметров покрытия, уровень шума в измерительных данных и ширина полосы частот измерений. Приведены результаты имитационного моделирования и экспериментальной проверки реконструкции относительных диэлектрических проницаемостей и толщин одно- и двухслойных разнотолщинных диэлектрических покрытий на основе полиметилметакрилата, фторопласта Ф-4Д, РО3010 при различных значениях среднего квадратического отклонения уровня шума в измеренных коэффициентах ослабления поля поверхностной медленной электромагнитной волны. Установлено, что точность реконструкции геометрических и электрофизических параметров слоёв уменьшается с увеличением числа оцениваемых параметров и уровня шума, а также с уменьшением диэлектрической проницаемости и толщины слоёв. Результаты экспериментальных исследований подтверждают адекватность разработанной имитационной модели. Представленная модель позволяет для конкретного измерительного комплекса, реализующего многочастотный радиоволновый метод поверхностных медленных электромагнитных волн, количественно оценить потенциально возможную точность реконструкции геометрических и электрофизических параметров многослойных диэлектрических материалов и покрытий. Согласно результатам имитационного моделирования и экспериментального исследования многослойного диэлектрического покрытия, при ширине полосы частот измерений 1 ГГц погрешности оценок диэлектрических проницаемостей и толщин слоёв составляют не более 10 % с вероятностью 0,95 при среднем квадратическом отклонении уровня шума 0,003–0,004.

Ключевые слова: многослойное диэлектрическое покрытие, многочастотный радиоволновый метод поверхностных медленных электромагнитных волн, имитационная модель, обратная задача, коэффициент ослабления поля поверхностной медленной электромагнитной волны, диэлектрическая проницаемость.

Введение. Постановка задачи. Многослойные диэлектрические материалы и покрытия широко применяются в различных областях науки и техники при работе в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне. Эффективность таких покрытий определяется их электрофизическими и геометрическими параметрами (ЭФГП). Таким образом, разработка новых методов измерения ЭФГП многослойных диэлектрических покрытий, а также обнаружение межслойных дефектов покрытий является актуальной научной задачей.

В работах [1–5] показано, что повысить эффективность контроля ЭФГП многослойных диэлектрических материалов и покрытий можно, применив метод квази-решений в рамках многочастотной (широкополосной) СВЧ-интроскопии. В качестве информативного параметра для оценки ЭФГП слоёв при этом используют комплексный коэффициент отражения $\hat{R}(f, \xi)$, где f – частота зондирующего сигнала; $\xi = \{\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n, b_{n+1}, \dots, b_{2n}\}$, $i = 1, \dots, 2n$ – $2n$ -мерный вектор, описывающий ЭФГП n -слойного материала;

ε – относительная диэлектрическая проницаемость материала; $b_{n+1}=(t_{n+1}/\lambda)_{n+1}, \dots, b_{2n}=(t_{2n}/\lambda)_{2n}$ – относительные толщины слоёв n -слойного материала; $t_{n+1}, \dots, t_{2n}$ – толщины слоёв материала; λ – длина волны зондирующего сигнала.

Между тем, потенциальные возможности применения метода квазирешений [1–5] для оценки ЭФГП многослойных диэлектрических материалов и покрытий не исследованы при других типах взаимодействия электромагнитного поля с исследуемыми материалами и, соответственно, с другими измеряемыми информативными параметрами. Как показано в работе [6], использование в качестве информативного параметра коэффициента $\alpha(f, \xi)$ ослабления поля поверхностных медленных электромагнитных волн (далее – коэффициента ослабления поля), который определяется в результате косвенных измерений, позволяет повысить точность и достоверность реконструкции ЭФГП многослойных диэлектрических материалов и покрытий. Под повышением достоверности понимают повышение точности оценки ЭФГП слоёв путём учёта частотной дисперсии электрофизических параметров и уменьшения ширины полосы частот измерений.

Цель работы – численное исследование и экспериментальная проверка потенциальной информативности много-частотного радиоволнового метода поверхностных медленных электромагнитных волн при реконструкции ЭФГП многослойных диэлектрических покрытий с учётом параметров материала покрытия, уровня шума в измерительных данных и ширины полосы частот измерений.

Имитационная модель реконструкции ЭФГП многослойных диэлектрических материалов и покрытий. При таком моделировании на ЭВМ выполняется совокупность расчётов, позволяющих имитировать процесс реконструкции, т. е. восстановления значений относительных диэлектрических проницаемостей и толщин слоёв многослойного диэлектрического покрытия по экспериментально полученным значениям коэффициентов ослабления поля $\alpha_3(f, \xi)$.

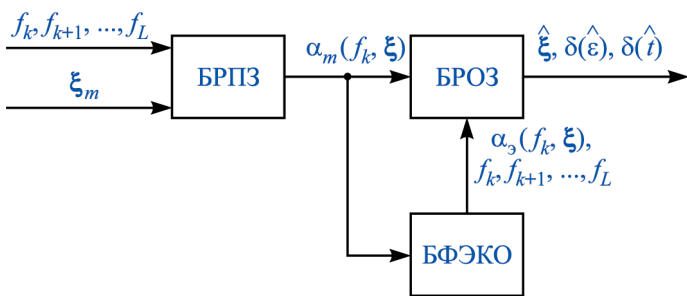


Рис. 1. Структурная схема имитационной модели:

БРПЗ, БРОЗ – блоки решения прямой и обратной задач соответственно; БФЭКО – блок формирования экспериментальных коэффициентов ослабления поля поверхностной электромагнитной волны

Fig. 1. Block diagram of a simulation model:

BSDP, BIPS – blocks for solving the direct and inverse problems, respectively; BGEAC – block for generating experimental attenuation coefficients of the surface electromagnetic wave

Для моделирования разработана имитационная модель измерительного комплекса [6–8], структурная схема которой приведена на рис. 1. В состав имитационной модели входят три блока: блок решения прямой задачи БРПЗ, позволяющий определять теоретические значения $\alpha_T(f_k, \xi)$ коэффициентов ослабления поля для частот $f_k, k=1, 2, \dots, L$, и вектора ЭФГП $\xi = \{\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n, b_{n+1}, \dots, b_{2n}\}$; блок формирования экспериментальных значений $\alpha_3(f_k, \xi), k=1, 2, \dots, L$, коэффициентов ослабления поля БФЭКО, имитирующий абсолютные погрешности $\Delta\alpha(f_k, \xi)$ измерений коэффициента ослабления поля; блок решения обратной задачи БРОЗ, реализующий нахождение минимума целевой функции.

В блоке БРПЗ рассчитываются теоретические значения коэффициентов ослабления $\alpha_T(f, \xi)$ многослойного диэлектрического покрытия путём решения дисперсионного уравнения по известному вектору ЭФГП $\xi = \{\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n, b_{n+1}, \dots, b_{2n}\}$ на частотах $f_k, k=1, 2, \dots, L$ [6]:

$$D[\alpha_T(f_k, \xi); f_k] = 0. \quad (1)$$

В блоке БРОЗ реализуется представленный в [6] метод определения вектора ЭФГП $\xi = \{\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n, b_{n+1}, \dots, b_{2n}\}, i=1, \dots, 2n$ многослойных диэлектрических материалов и покрытий. Метод основан на минимизации целевой функции, построенной по невязке между полученными экспериментально $\alpha_3(f, \xi)$ и вычисленными теоретически значениями $\alpha_T(f, \xi)$ коэффициентов ослабления поля на частотах $f_k, k=1, 2, \dots, L$:

$$\xi = \underset{\xi \in \xi_{\text{доп}}}{\operatorname{argmin}} \rho(\xi) = \sum_{k=1}^L \left| [\alpha_3(f_k, \xi) - \alpha_T(f_k, \xi)] / \alpha_T(f_k, \xi) \right|^2, \quad (2)$$

где $\rho(\xi)$ – расстояние между значениями $\alpha_3(f, \xi)$ и $\alpha_T(f, \xi)$ в области допустимых значений $\xi \in \xi_{\text{доп}}$.

Решение обратной задачи (2) является некорректным [6]. Регуляризация задачи сводится к жёстким ограничениям области допустимых значений составляющих вектора ЭФГП (границы области допустимых значений составляющих вектора ЭФГП $\xi_i \in [\xi_{i\min}, \dots, \xi_{i\max}]$ отличаются от истинных значений не более чем на 10 %). Для повышения устойчивости решения обратной задачи (2) без использования жёстких ограничений области допустимых значений составляющих вектора ЭФГП в целевую функцию (2) добавлен дополнительный стабилизатор $q_i \|\xi_i - \xi_{i0}\|^2$ с параметром регуляризации ϖ [9]:

$$\xi = \underset{\xi \in \xi_{\text{доп}}}{\operatorname{argmin}} \rho(\xi) = \sum_{k=1}^L \left| [\alpha_3(f_k, \xi) - \alpha_T(f_k, \xi)] / \alpha_T(f_k, \xi) \right|^2 + \varpi \sum_{i=1}^{2n} q_i \|\xi_i - \xi_{i0}\|^2, \quad (3)$$

где q_i – вес, определяющий степень априорной информации о каждой составляющей вектора ЭФГП; ξ_i – i -я составляющая вектора ЭФГП; ξ_{i0} – найденное с учётом априорной информации о составляющей среднее значение i -й составляющей вектора ЭФГП из области допустимых значений $\xi_{i0} \in [\xi_{i\min}, \dots, \xi_{i\max}]$.

Проведённые исследования показали, что при числе слоёв диэлектрического покрытия больше трёх прямые алгоритмы минимизации целевой функции (3) перестают давать устойчивые оценки ЭФГП и целесообразно использовать алгоритмы стохастической минимизации, например генетический алгоритм. Поэтому при имитационном моделировании для минимизации функционала (3) применяли генетический алгоритм, реализованный в виде функции «ga» приложения Global Search системы Matlab.

В общем случае коэффициенты ослабления $\alpha_3(f, \xi)$ наблюдаются в эксперименте при аддитивных случайных помехах и их можно представить в виде [1, 3]:

$$\alpha_3(f_k, \xi) = \alpha_T(f_k, \xi) + n(f_k), \quad k = 1, 2, \dots, L, \quad (4)$$

где $n(f_k)$ – шум, обусловленный как погрешностями самого физического прибора и другими измерительными погрешностями при проведении эксперимента, так и достоверностью выбранной электродинамической модели реальной физической ситуации; L – число частот, на которых проводятся измерения.

Ввиду множества случайных факторов, влияющих на точность реконструкции ЭФГП многослойных диэлектрических покрытий, погрешность их измерения в блоке БФЭКО моделировали аддитивным некоррелированным гауссовым шумом $n(f_k)$ с нулевым математическим ожиданием $m(n(f_k))=0$ и заданным уровнем дисперсии σ_n^2 . Формировали искажённые значения результатов измерений частотной зависимости коэффициента ослабления поля:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_3(f_k, \xi) &= \alpha_T(f_k, \xi) + n(f_k); \\ m(n(f_k)) &= 0; \\ k &= 1, 2, \dots, L. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Таким образом, в соответствии с принятой моделью нормального распределения погрешностей измерений (5), имитировали абсолютные погрешности измерений $\Delta\alpha(f_k, \xi)$.

Блоки структурной схемы имитационного моделирования реализованы в виде подпрограмм в системе Matlab.

Описание имитационного моделирования реконструкции ЭФГП диэлектрических покрытий. Имитационное моделирование включает следующее. По принятым точным значениям толщин $t_1, t_{i+1}, \dots, t_n$ и относительных диэлектрических проницаемостей $\varepsilon_1, \varepsilon_{i+1}, \dots, \varepsilon_n$, $i=1, \dots, n$ n -слойного диэлектрического покрытия вычисляли теоретические значения коэффициентов ослабления $\alpha_T(f_k, \xi)$ для каждой из f_k фиксированных частот, решая дисперсионное уравнение (1).

Полученные при моделировании значения $\alpha_3(f_k, \xi)$ представляли в качестве регистрируемой величины в целевую функцию (3). Далее в блоке БРОЗ оптимизировали выражение (3). Точность реконструкции относительных диэлектрических проницаемостей и толщин исследуемых диэлектрических покрытий исследовали при возрастающих значениях среднего квадратического отклонения (СКО) шума 0–0,008. По 300 реализациям каждого значения СКО шума

определяли средние значения относительных погрешностей оценки относительных диэлектрических проницаемостей $\delta(\varepsilon_i)$ и толщин слоёв $\delta(t_i)$, $i=1, \dots, n$ – число слоёв диэлектрического покрытия.

В качестве материалов для исследования выбраны диэлектрики – полиметилметакрилат ($\varepsilon=2,7$), фторопласт Ф-4Д ($\varepsilon=2,2$), а также СВЧ-материал RO3010 (Rogers Corporation, USA) ($\varepsilon=11,2$). Толщина материалов 1–3 мм. Также при имитационном моделировании исследователи диэлектрические материалы с относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon=1,2 \dots 20$.

Для определения значений СКО уровня шума в данных, измеренных с помощью реального измерительного комплекса [6], оценивали закон распределения экспериментальных значений $\alpha_3(f_k, \xi)$ коэффициентов ослабления поля на стандартном образце полиметилметакрилата толщиной 1 мм ($\varepsilon=2,7$) и образце материала с более высоким значением диэлектрической проницаемости – RO3010 ($\varepsilon=11,2$). Диапазон частот измерений составил 9–12 ГГц с дискретным шагом по частоте 0,1 ГГц (количество частот $N=10$). На каждой частоте формировали выборку из 500 значений $\alpha_3(f_k, \xi)$. Для аппроксимации закона распределения экспериментальных данных использовали метод модернизированных распределений Пирсона [10, 11]. Расчётные оценки показали, что плотность распределения вероятностей коэффициентов ослабления поля в диапазоне частот 9–12 ГГц для стандартного образца полиметилметакрилата описывается распределением Пирсона VII типа, что соответствует нормальному закону распределения с СКО $\sigma(f_k, \xi)=0,0015 \dots 0,0018$:

$$p[\alpha_3(f_k, \xi)] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(f_k, \xi)} \exp \left[-\frac{\alpha_3(f_k, \xi) - m[\alpha_3(f_k, \xi)]^2}{2\sigma(f_k, \xi)^2} \right], \quad (6)$$

где $m[\alpha_3(f_k, \xi)]$ – математическое ожидание коэффициента ослабления образца полиметилметакрилата на частоте f_k ; $\sigma(f_k, \xi)$ – СКО коэффициента ослабления поля на частоте f_k .

Плотность распределения вероятностей для образца RO3010, также подчиняется нормальному закону (6) с меньшим значением СКО $\sigma(f_k, \xi)=0,0014 \dots 0,0017$.

Проверка правильности согласованности экспериментальных данных нормальному закону распределения осуществлялась по критерию χ^2 Пирсона в системе Matlab. Полученные значения СКО распределения коэффициентов ослабления приняли в качестве экспериментального значения уровня шума для сравнения с результатами имитационного моделирования.

Результаты решения обратной задачи (3) при других значениях СКО уровня шума измеренных данных исследовали методом имитационного моделирования на ЭВМ.

Экспериментальные результаты реконструкции ЭФГП одно- и двухслойных покрытий. Однослойное диэлектрическое покрытие. Поскольку разрешающая способность метода реконструкции ЭФГП материалов слоёв многослойных диэлектрических структур определяется в основном слоем с наименьшей электрической толщиной [2], то в первую очередь изучали параметры однослойного диэлектрического покрытия.

Эта (однослойная) структура является базовой для дальнейших исследований. При численном моделировании и обработке результатов реальных экспериментов теоретические значения коэффициента ослабления для целевой функции (3) определяли на основе решения дисперсионного уравнения (1) для однослойного диэлектрического покрытия. Согласно методу поперечного резонанса для однослойного диэлектрического покрытия использовали следующий вид дисперсионного уравнения [6, 12–15]:

$$D[\alpha(f, \xi); f] \equiv \bar{Z}(1, 0) = 0; \quad (7)$$

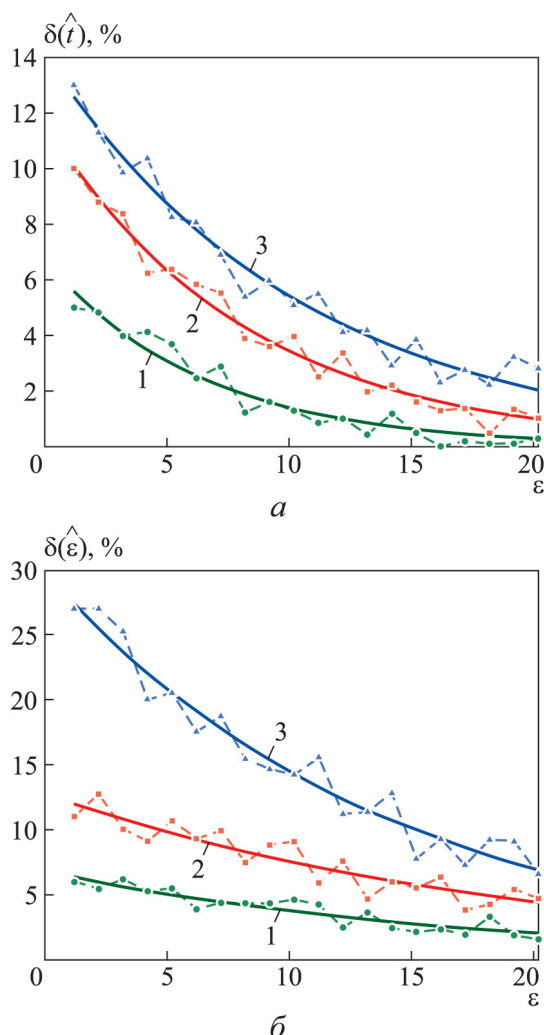


Рис. 2. Зависимости средней относительной погрешности оценки диэлектрической проницаемости (а) и толщины (б) однослойного покрытия толщиной $b=1$ мм от его диэлектрической проницаемости при фиксированных значениях СКО шума $\sigma=0,001$ (1); $0,003$ (2); $0,005$ (3)

Fig. 2. The dependence of the average relative error in the estimation of permittivity (a) and thickness (b) of a single-layer coating with the thickness of $b=1$ mm on the value of its permittivity, for fixed values of the standard deviation of noise $\sigma=0,001$ (1); $0,003$ (2); $0,005$ (3)

$$\bar{Z}(1, 0) = Z_1 \frac{Z_0 + jZ_1 \operatorname{tg}(qt)}{Z_1 + jZ_0 \operatorname{tg}(qt)},$$

где $\bar{Z}(1, 0)$ – эквивалентное характеристическое сопротивление слоя покрытия и области над покрытием; $Z_0 = -j\alpha_T(f, \xi)/(\omega\epsilon_0)$ – характеристическое сопротивление на границе между слоем диэлектрика и свободным пространством; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота; ϵ_0 – диэлектрическая постоянная; $Z_1 = q/(\omega\epsilon_0\epsilon)$ – характеристическое сопротивление слоя покрытия; $q = \sqrt{k^2 - k_0^2 - \alpha_T^2(f, \xi) + \beta^2}$ – поперечное волновое число, характеризующее распределение поля поверхностной медленной электромагнитной волны по толщине t покрытия; $k_0 = 2\pi/\lambda$, $k = 2\pi\sqrt{\epsilon}/\lambda$ – волновые числа свободного пространства и слоя покрытия соответственно; $\beta = m2\pi/d$ – поперечное волновое число, характеризующее распределение поля поверхностной медленной электромагнитной волны по ширине d покрытия.

В методах реконструкции ЭФГП на основе комплексного коэффициента отражения погрешности оценок ЭФГП слоёв существенно зависят от значений ЭФГП. Поэтому оценивали значения погрешностей $\delta(\hat{\epsilon})$, $\delta(\hat{t})$ при увеличении значений ЭФГП и заданном уровне СКО уровня шума.

На рис. 2 представлены зависимости средних относительных погрешностей $\delta(\hat{\epsilon})$, $\delta(\hat{t})$ однослойного покрытия толщиной $t=1$ мм от его диэлектрической проницаемости, при фиксированных значениях СКО шума $\sigma=0,001$ (1); $0,003$ (2); $0,005$ (3). Зависимости построены с помощью функций регрессии «gauss1» и «exp1» приложения Curve Fitting Toolbox системы Matlab.

Анализ зависимостей рис. 2 для однослойного диэлектрического покрытия показывает, что относительные погрешности оценок диэлектрической проницаемости слоя $\delta(\hat{\epsilon})$ и толщины $\delta(\hat{t})$ при фиксированных значениях уровня СКО шума и толщины слоя уменьшаются с увеличением диэлектрической проницаемости. При этом точность оценки толщины слоя в 2–2,5 раза выше точности оценки диэлектрической проницаемости.

По результатам имитационного моделирования получили оценки диэлектрической проницаемости и толщины однослойного покрытия при СКО уровня шума $\sigma=0,003$ во всём диапазоне исследуемых значений диэлектрической проницаемости ($\epsilon=1,2 \dots 20$) с погрешностью не более 10 % при доверительной вероятности 0,95.

Экспериментальные значения погрешности $\delta(\hat{\epsilon})$ оценки диэлектрической проницаемостей однослойных покрытий толщиной 1 мм на основе полиметилметакрилата ($\epsilon=2,7$), фторопласта Ф-4Д ($\epsilon=2,2$) и РО3010 ($\epsilon=11,2$), полученные на измерительном комплексе [6], составили 6, 7 и 5 % соответственно, погрешности оценки толщин слоя – 5, 6 и 4 % соответственно.

Сравнение с экспериментально полученным значением СКО уровня шума $\sigma=0,0015 \dots 0,0020$ и значениями экспериментальных погрешностей оценки ЭФГП подтверждает практическую работоспособность многочастотного радиоволнового метода поверхностных медленных электромагнитных волн и адекватность работы имитационной модели.

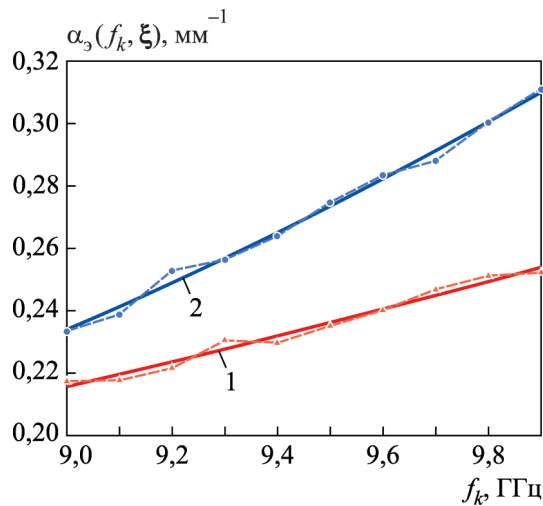


Рис. 3. Экспериментальные зависимости коэффициента ослабления $\alpha_3(f_k, \xi)$ от частоты для покрытий «полиметилметакрилат–RO3010» (1) и «RO3010–полиметилметакрилат» (2)

Fig. 3. The experimental frequency dependence of the field attenuation coefficient $\alpha_3(f_k, \xi)$ on the frequency for the coating “polymethyl methacrylate–RO3010” (1) and coating “RO3010–polymethyl methacrylate” (2)

С увеличением толщины слоя при фиксированных значениях диэлектрической проницаемости и СКО уровня шума погрешность оценок диэлектрической проницаемости $\delta(\hat{\varepsilon})$ и толщины слоя $\delta(\hat{t})$ однослойного покрытия также уменьшается.

Двухслойное диэлектрическое покрытие. Дисперсионное уравнение для двухслойной диэлектрической структуры усложняется наличием ещё одной границы раздела сред между первым и вторым слоем покрытия. Теоретические значения коэффициента ослабления для двухслойного покрытия определяли при решении дисперсионного уравнения [6, 12–15]:

$$D[\alpha(f, \xi); f] \equiv \bar{Z}(1, 2, 0);$$

$$\bar{Z}(1, 2, 0) = \bar{Z}(1, 2) \frac{Z_0 + j\bar{Z}(1, 2)\operatorname{tg}(q_2 t_2)}{\bar{Z}(1, 2) + jZ_0 \operatorname{tg}(q_2 t_2)};$$

$$\bar{Z}(1, 2) = Z_1 \frac{Z_2 + jZ_1 \operatorname{tg}(q_1 t_1)}{Z_1 + jZ_2 \operatorname{tg}(q_1 t_1)},$$

где $\bar{Z}(1, 2, 0)$ – эквивалентное характеристическое сопротивление 1-го, 2-го слоёв диэлектрического покрытия и области над покрытием; $\bar{Z}(1, 2)$ – эквивалентное характеристическое сопротивление 1-го и 2-го слоёв диэлектрического покрытия; $Z_1 = q_1/(\omega \varepsilon_0 \varepsilon_1)$, $Z_2 = q_2/(\omega \varepsilon_0 \varepsilon_2)$ – характеристические сопротивления 1-го и 2-го слоёв покрытия; $q_1 = \sqrt{k_1^2 - k_0^2 - \alpha_1^2(f, \xi) + \beta^2}$, $q_2 = \sqrt{k_2^2 - k_0^2 - \alpha_2^2(f, \xi) + \beta^2}$ – поперечные волновые числа 1-го и 2-го слоёв покрытия, $k_1 = 2\pi\sqrt{\varepsilon_1}/\lambda$, $k_2 = 2\pi\sqrt{\varepsilon_2}/\lambda$ – волновые числа 1-го и 2-го слоёв покрытия; t_1 , t_2 – толщины 1-го и 2-го слоёв покрытия.

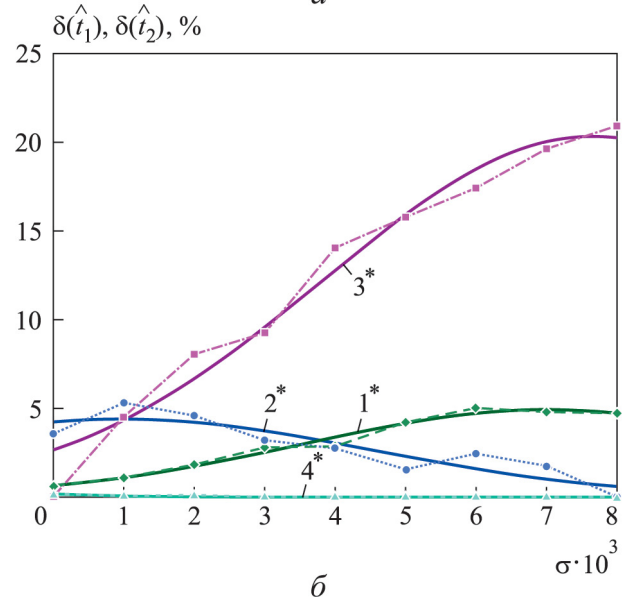
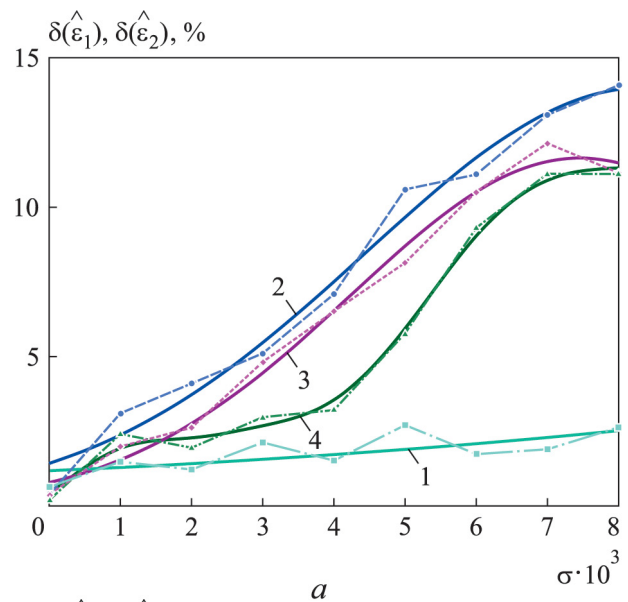


Рис. 4. Зависимости средней относительной погрешности оценок относительной диэлектрической проницаемости (а) и толщины (б) слоёв двух двухслойных диэлектрических покрытий при увеличении СКО уровня шума:

1, 2, 1*, 2* – соответственно оценки $\delta(\hat{\varepsilon}_1)$, $\delta(\hat{\varepsilon}_2)$ и $\delta(\hat{t}_1)$, $\delta(\hat{t}_2)$ покрытия «RO3010–полиметилметакрилат»; 3, 4, 3*, 4* – соответственно оценки $\delta(\hat{\varepsilon}_1)$, $\delta(\hat{\varepsilon}_2)$ и $\delta(\hat{t}_1)$, $\delta(\hat{t}_2)$ покрытия «полиметилметакрилат–RO3010»

Fig. 4. The dependences of the average relative error in the estimates of permittivity (a) and thickness (b) of layers of the two two-layer dielectric coatings with an increase in the standard deviation of the noise level:

1, 2, 1*, 2* – estimations of $\delta(\hat{\varepsilon}_1)$, $\delta(\hat{\varepsilon}_2)$ and $\delta(\hat{t}_1)$, $\delta(\hat{t}_2)$ of the coating “RO3010–polymethyl methacrylate”; 3, 4, 3*, 4* – estimations of $\delta(\hat{\varepsilon}_1)$, $\delta(\hat{\varepsilon}_2)$ and $\delta(\hat{t}_1)$, $\delta(\hat{t}_2)$ of the coating “polymethyl methacrylate–RO3010”

Изучали наиболее сложный случай, когда двухслойное покрытие является высококонтрастным по диэлектрической проницаемости. Исследовали образцы двухслойных

Матрица корреляционных коэффициентов

Δf , ГГц	ξ	R			
		b_1	ε_1	b_2	ε_2
1	b_1	1,0	-0,367	-0,115	0,190
	ε_1	—	1,0	-0,862	-0,262
	b_2	—	—	1,0	0,09
	ε_2	—	—	—	1,0
2	b_1	1,0	-0,541	-0,268	0,220
	ε_1	—	1,0	-0,541	-0,483
	b_2	—	—	1,0	-0,112
	ε_2	—	—	—	1,0

(толщина слоёв 2 мм) покрытий на основе полиметилметакрилата ($\varepsilon=2,7$) и СВЧ-материала RO3010 ($\varepsilon=11,2$). Изучаемые образцы покрытий различались расположением слоёв: «RO3010–полиметилметакрилат» (первый образец), «полиметилметакрилат–RO3010» (второй образец). Коэффициент ослабления поля, как и в случае однослойного покрытия, измеряли в диапазоне частот 9–10 ГГц с шагом по частоте 0,1 ГГц (количество частот $N=10$). На рис. 3 представлены экспериментальные зависимости коэффициента ослабления $\alpha_3(f_k, \xi)$ от частоты для покрытий «Rogers RO 3010–полиметилметакрилат» и «полиметилметакрилат–Rogers RO 3010». Экспериментальное значение уровня СКО шума принимали $\sigma=0,002$. Указанные зависимости для двух покрытий существенно различаются, что позволяет надёжно определять порядок сочетания слоёв двухслойного покрытия.

На рис. 4, а приведены зависимости относительной погрешности оценок диэлектрической проницаемости $\delta(\hat{\varepsilon}_1)$, $\delta(\hat{\varepsilon}_2)$ слоёв толщиной 2 мм двухслойных покрытий «RO3010–полиметилметакрилат» и «полиметилметакрилат–RO3010» при возрастании уровня СКО шума измерительных данных в диапазоне 0–0,008. На рис. 4, б показано, как при этих условиях изменяется погрешность оценки толщин слоёв $\delta(\hat{t}_1)$, $\delta(\hat{t}_2)$ указанных покрытий. Зависимости на рис. 4 (как и на рис. 2) построены с помощью функций регрессии «gauss1» и «exp1» приложения Curve Fitting Toolbox системы Matlab.

Из анализа зависимостей рис. 4 следует, что увеличение числа оцениваемых ЭФГП приводит к увеличению их относительных погрешностей. Погрешности оценок параметров слоёв двухслойного покрытия не совпадают с оценками для однослойного покрытия, однако сохраняется установленная для базового слоя общая закономерность – погрешности оценок диэлектрических проницаемостей и толщин слоёв уменьшаются с увеличением значений диэлектрической проницаемости и электрической толщины слоя.

Получены устойчивые оценки относительных погрешностей ЭФГП слоёв двухслойного покрытия не больше 10 % при уровне СКО шума $\sigma \geq 0,003$ с доверительной вероятностью 0,95. Экспериментальные значения относительных погрешностей оценок

относительных диэлектрических проницаемостей и толщин слоёв для покрытия «RO3010–полиметилметакрилат» составляют $\delta(\hat{\varepsilon}_1)=3\%$, $\delta(\hat{\varepsilon}_2)=7\%$, $\delta(\hat{t}_1)=2\%$, $\delta(\hat{t}_2)=6\%$, для покрытия «полиметилметакрилат–RO3010» $\delta(\hat{\varepsilon}_1)=4\%$, $\delta(\hat{\varepsilon}_2)=5\%$, $\delta(\hat{t}_1)=8\%$, $\delta(\hat{t}_2)=5\%$. Отличие оценок ЭФГП отдельных слоёв от ЭФГП однослойного покрытия объясняется появлением дополнительных корреляционных связей между параметрами слоёв.

С учётом линейности зависимости коэффициента ослабления от частоты [6] для более явного выделения взаимосвязей контролируемых ЭФГП двухслойного диэлектрического покрытия вычисляли его нормированную корреляционную матрицу R оцениваемых ЭФГП [1, 3]:

$$R = \begin{vmatrix} 1 & r_{1,2} & \dots & r_{1,2n-1} & r_{1,2n} \\ r_{2,1} & 1 & \dots & r_{2,2n-1} & r_{2,2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{2n,1} & r_{2n,2} & \dots & r_{2n,2n-1} & 1 \end{vmatrix},$$

где r_{ij} – нормированные корреляционные коэффициенты пар электрофизических параметров $\hat{\xi}_i, \hat{\xi}_j$, $i=1, \dots, 2n$, $j=1, \dots, 2n$; $2n$ – число оцениваемых ЭФГП диэлектрического покрытия (относительных диэлектрических проницаемостей и толщин покрытия).

В данной интерпретации корреляционная матрица R характеризует отличие частотной зависимости коэффициента ослабления $\alpha_3(f_k, \xi)$ от линейного закона при воздействии шума и изменении ширины полосы частот измерений.

В таблице приведена матрица нормированных корреляционных коэффициентов для покрытия «RO3010–полиметилметакрилат» при ширине полосы частот измерений $\Delta f=1$ ГГц (диапазон измерения 9–10 ГГц, шаг по частоте 0,1 ГГц) и $\Delta f=2$ ГГц (диапазон измерения 9–11 ГГц, шаг по частоте 0,2 ГГц) при уровне СКО шума $\sigma=0,002$. Увеличение ширины Δf полосы частот измерений приводит к увеличению абсолютных значений корреляционных коэффициентов и, соответственно, уменьшению погрешности оценок ЭФГП отдельных слоёв диэлектрического покрытия.

Заключение. Разработанная имитационная модель позволяет оценивать точность реконструкции электрофизических и геометрических параметров многослойных диэлектрических покрытий многочастотным радиоволновым методом поверхностных медленных электромагнитных волн. В модели учитываются значения ЭФГП покрытия, уровень шума в измерительных данных и ширина полосы частот измерений. Имитационное моделирование и экспериментальные исследования ЭФГП одно- и двухслойных диэлектрических покрытий показали следующее. Для однослойных, двухслойных и в общем случае многослойных покрытий точность оценок ЭФГП их слоёв уменьшается с уменьшением их диэлектрической проницаемости и электрической толщины. Для многослойных покрытий увеличение числа оцениваемых ЭФГП приводит к увеличению погрешностей их оценки. Для однослойных и двухслойных диэлектрических покрытий при ширине полосы частот измерений 1 ГГц, относительная погрешность оценки

ЭФГП слоёв составляет не более 10 % с доверительной вероятностью 0,95 при СКО уровня шума $\sigma = 0,003 - 0,004$. При этом экспериментальное значение СКО уровня шума для реального измерительного комплекса $\sigma = 0,0015 \dots 0,0020$. Для повышения точности оценок ЭФГП диэлектрического покрытия необходимо либо проводить измерения в более широкой полосе частот, либо повышать точность измерения коэффициентов ослабления (уменьшая шум в измерительных данных). В отличие от методов с информативным параметром – комплексным коэффициентом отражения, предложенный метод позволяет проводить измерения в более узкой полосе частот, что позволяет учесть частотную дисперсию диэлектрической проницаемости и повысить достоверность измерений.

Список литературы

1. Ахметшин А. М., Славин В. И., Тихий В. Г., Платонов Е. Д. Идентификация слоистых диэлектрических структур методом параметрической оптимизации в многочастотной СВЧ интроскопии // Дефектоскопия. 1983. № 12. С. 57–65.
2. Андреев М. В., Борулько В. Ф., Дробахин О. О. Применение концепции квазиразложения для определения параметров слоистых диэлектрических структур по данным измерений характеристик отражения на многих частотах. Ч. I // Дефектоскопия. 1995. № 12. С. 41–50.
3. Борулько В. Ф., Дробахин О. О., Славин И. В. Многочастотные СВЧ неразрушающие методы измерения параметров слоистых диэлектриков. Днепропетровск: Изд-во ДГУ, 1982. 120 с.
4. Mohamed Abou-Khousa, Zoughi R., *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, 2007, vol. 56, no. 4, pp. 1107–1113. <https://doi.org/10.1098/rspa.2009.0664>
5. Mikhnev V. A., Nyfors E., Vainkainen P., *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1997, vol. 45, no. 9, pp. 1405–1410. <https://doi.org/10.1109/8.623130>
6. Казьмин А. И., Федюнин П. А. Восстановление структуры электрофизических параметров многослойных диэлектрических материалов и покрытий по частотной зависимости коэффициента ослабления поля поверхностной электромагнитной волны // Измерительная техника. 2019. № 9. С. 39–45. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-9-39-45>
7. Пат. № 2594761 РФ / А. И. Казьмин, В. А. Манин, П. А. Федюнин, Д. П. Федюнин // Изобретения. Полезные модели. 2016. № 23.
8. Федюнин П. А., Казьмин А. И., Манин В. А. СВЧ-способ дефектоскопии радиопоглощающих покрытий и устройство для его реализации // Контроль. Диагностика. 2017. № 11. С. 32–39. <https://doi.org/10.14489/td.2017.11.pp.032-039>
9. Гринев А. Ю., Темченко В. С., Багно Д. В. Радары подповерхностного зондирования. Мониторинг и диагностика сред и объектов. М.: Радиотехника, 2013. 391 с.
10. Карпов И. Г. Аппроксимация экспериментальных распределений радиолокационных сигналов с использованием модернизированных распределений Пирсона // Радиотехника. № 5. 2003. С. 56–61.
11. Ищук И. Н., Карпов И. Г., Фесенко А. И. Обнаружение скрытых подповерхностных объектов в инфракрасном диапазоне

длин волн на основе идентификации их тепловых свойств // Измерительная техника. 2009. № 4. С. 36–39.

12. Guido Valerio, David R. Jackson, Alessandro Galli, *Proceedings of the Royal Society*, 2010, vol. 466, pp. 2447–2469. <https://doi.org/10.1098/rspa.2009.0664>
13. Andreas Patrovsky, Ke Wu, *Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 2013, no. 1 (3), pp. 87–93. <https://doi.org/10.13189/ujeee.2013.010305>
14. Zhuozhu Chen, Zhongxiang Shen, *Applied Sciences*, 2018, no. 8 (1), p. 102. <https://doi.org/10.3390/app8010102>
15. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 343 с.

References

1. Akhmetshin A. M., Slavin V. I., Tikhii V. G., Platonov E. D., *Defektoskopiya*, 1983, no. 12, pp. 57–65 (in Russian).
2. Andreev M. V., Borul'ko V. F., Drobakhin O. O., *Defektoskopiya*, 1995, no. 12, pp. 41–50 (in Russian).
3. Borul'ko V. F., Drobakhin O. O., Slavin I. V. *Mnogochastotnye SVCh nerazrushayushchie metody izmereniya parametrov sloistykh dielektrikov*, Dnepropetrovsk, Izdatelstvo DGU Publ., 1982, 120 p. (in Russian).
4. Mohamed Abou-Khousa, Zoughi R., *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, 2007, vol. 56, no. 4, pp. 1107–1113. <https://doi.org/10.1098/rspa.2009.0664>
5. Mikhnev V. A., Nyfors E., Vainkainen P., *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1997, vol. 45, no. 9, pp. 1405–1410. <https://doi.org/10.1109/8.623130>
6. Kaz'min A. I., Fedyunin P. A., *Measurement Techniques*, 2019, vol. 62, pp. 809–816. <https://doi.org/10.1007/s11018-019-01699-7>
7. Kaz'min A. I., Manin V. A., Fedyunin P. A., Fedyunin D. P., RF Patent no. 259476, *Bull. Izobret.*, no. 23 (2016).
8. Fedyunin P. A., Kaz'min A. I., Manin V. A., *Kontrol'. Diagnostika*, 2017, no. 11, pp. 32–39 (in Russian). <https://doi.org/10.14489/td.2017.11.pp.032-039>
9. Grinev A. Yu., Temchenko V. S., Bagno D. V. *Radary podpoverhnostnogo zondirovaniya. Monitoring i diagnostika sred i ob'ektov*, Moscow, Radiotekhnika Publ., 2013, 391 p. (in Russian).
10. Karpov I. G., *Radiotekhnika*, 2003, no. 5, pp. 56–61 (in Russian).
11. Ischuk I. N., Karpov I. G., Fesenko A. I., *Measurement Techniques*, 2009, vol. 52, pp. 388–393. <https://doi.org/10.1007/s11018-009-9282-7>
12. Guido Valerio, David R. Jackson, Alessandro Galli, *Proceedings of the Royal Society*, 2010, vol. 466, pp. 2447–2469. <https://doi.org/10.1098/rspa.2009.0664>
13. Andreas Patrovsky, Ke Wu, *Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 2013, no. 1 (3), pp. 87–93. <https://doi.org/10.13189/ujeee.2013.010305>
14. Zhuozhu Chen, Zhongxiang Shen, *Applied Sciences*, 2018, no. 8 (1), p. 102. <https://doi.org/10.3390/app8010102>
15. Brekhovskikh L. M., *Volny v sloistykh sredakh*, Moscow, Nauka Publ., 1973, 343 p. (in Russian).

Дата поступления: 26.02.2020.

Дата принятия: 13.03.2020.

Evaluation of the accuracy of reconstruction of the electrophysical and geometric parameters of multilayer dielectric coatings by the multi-frequency radio wave method of a slow surface electromagnetic waves

Aleksandr I. Kaz'min, Pavel A. Fedjunin

Military Educational and Scientific Center of the Air Force "N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy",
Voronezh, Russian Federation, e-mail: alek-kazmin@yandex.ru, fpa1@yandex.ru

One of the most important diagnostic problems multilayer dielectric materials and coatings is the development of methods for quantitative interpretation of the checkout results their electrophysical and geometric parameters. The results of a study of the potential informativeness of the multi-frequency radio wave method of surface electromagnetic waves during reconstruction of the electrophysical and geometric parameters of multilayer dielectric coatings are presented. The simulation model is presented that makes it possible to evaluate of the accuracy of reconstruction of the electrophysical and geometric parameters of multilayer dielectric coatings. The model takes into account the values of the electrophysical and geometric parameters of the coating, the noise level in the measurement data and the measurement bandwidth. The results of simulation and experimental investigations of reconstruction of the structure of relative permittivities and thicknesses of single-layer and double-layer dielectric coatings with different thicknesses, with different values of the standard deviation (RMS) of the noise level in the measured attenuation coefficients of the surface slow electromagnetic wave are presented. Coatings based on the following materials were investigated: polymethyl methacrylate, F-4D PTFE, RO3010. The accuracy of reconstruction of the electrophysical parameters of the layers decreases with an increase in the number of evaluated parameters and an increase in the noise level. The accuracy of the estimates of the electrophysical parameters of the layers also decreases with a decrease in their relative permittivity and thickness. The results of experimental studies confirm the adequacy of the developed simulation model. The presented model allows for a specific measuring complex that implements the multi-frequency radio wave method of surface electromagnetic waves, to quantify the potential possibilities for the accuracy of reconstruction of the electrophysical and geometric parameters of multilayer dielectric materials and coatings. Experimental investigations and simulation results of a multilayer dielectric coating demonstrated the theoretical capabilities gained relative error permittivity and thickness of the individual layers with relative error not greater than 10 %, with a measurement bandwidth of 1 GHz and RMS of noise level 0,003–0,004.

Key words: multilayer dielectric coating, radio wave method, simulation model, inverse problem, permittivity, attenuation coefficient of field, slow surface electromagnetic wave.

Спектральные, дозиметрические и метрологические характеристики радиохромных радиационно-чувствительных композиций

В. П. Тенишев

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,
р. п. Менделеево, Московская обл., Российская Федерация, e-mail: tenishev@vniiftri.ru

Освещены вопросы обеспечения радиационной безопасности при облучении изделий медицинской, сельскохозяйственной и пищевой промышленности. Рассмотрены средства измерений поглощённой дозы ионизирующего излучения. Показано, что существующих в РФ в настоящее время средств измерений поглощённой дозы недостаточно. Исследованы спектральные, дозиметрические и метрологические характеристики радиационно-чувствительных композиций с целью разработки на их основе новых средств измерений поглощённой дозы. Показана возможность создания на базе таких средств измерений новых плёночных дозиметрических систем, а также расширения диапазона поглощённых доз, включая область малых доз 30–1000 Гр.

Ключевые слова: поглощённая доза, ионизирующее излучение, радиационно-чувствительная композиция, плёнка радиационно-чувствительная, оптическая плотность.

Введение. При обработке изделий пищевой, сельскохозяйственной и медицинской промышленности ионизирующим излучением для гарантированного достижения регламентированного значения радиационного воздействия требуется высокоточная дозиметрия (ГОСТ ИСО 11137-2011 «Стерилизация медицинской продукции. Радиационная стерилизация», ГОСТ ИСО 14470-2014 «Радиационная обработка пищевых продуктов. Требования к разработке, валидации и повседневному контролю процесса облучения пищевых продуктов ионизирующим излучением», ГОСТ Р ИСО/АСТМ 51900-2013 «Руководство по дозиметрии при исследовании влияния радиации на пищевые и сельскохозяйственные продукты») в широком диапазоне поглощённой дозы D для составления карты распределения D по всему объёму облучаемой продукции [1, 2]. В целях обеспечения радиационной безопасности и достижения заданной технологической цели по дозиметрическим данным устанавливаются соответствующие параметры радиационно-технологической установки (РТУ) для управления радиационным воздействием. Диапазон D при облучении изделия должен соответствовать нормативным требованиям, прописанным в технологическом регламенте облучения конкретного изделия. Управление процессом облучения основывается на установлении соотношений между поглощённой дозой и параметрами РТУ:

время выдержки, положение на пути источника (для РТУ с изотропными радионуклидными источниками);

напряжение ускорения и сила тока пучка, ширина и однородность сканирования,

скорость транспортировки облучаемого объекта относительно пучка электронов (для РТУ с ускорителями электронов).

Значение и распределение поглощённой дозы определяются используемой дозиметрической системой с надлежащим уровнем точности и правильности.

В настоящее время в России в радиационных технологиях для дозиметрии используются разработанные во ВНИИФТРИ стандартные образцы (СО) утверждённого типа на основе окрашенных радиационно-чувствительных плёнок (далее – плёнок). СО прослеживаются к Государственному первичному специальному эталону единицы мощности поглощённой дозы интенсивного фотонного, электронного и бета-излучений для радиационных технологий ГЭТ 209-2014 [2–4], хранящему единицу мощности поглощённой дозы, и позволяют измерять значение D высокоинтенсивного излучения только в ограниченном диапазоне 1–200 кГр.

Существующих в настоящее время СО утверждённого типа для измерения поглощённой дозы недостаточно для проведения надлежащей дозиметрии при обработке радиационным способом продукции пищевой и сельскохозяйственной промышленности [2, 5, 6]. В зависимости от технологической цели диапазон требуемых значений D может составлять от десятков единиц грей до нескольких десятков килогрей [5–7], в связи с чем необходимо разработать новые дозиметрические системы с расширенным диапазоном измерения значений D и повышенной чувствительностью для измерения поглощённой дозы высокоинтенсивного ионизирующего излучения. Необходимы новые средства

Таблица 1

Параметры исследуемых РЧК

РЧК	D , Гр	Название плёнки	Толщина слоя РЧК, мкм
Сополимер с феназиновым красителем	$5 \cdot 10^3$ – $5 \cdot 10^5$	ПОР-1	Около 15
Сополимер с красителем 4-диэтиламино-азобензол	30–5000	ПОР-2	50, 75, 90
Сополимер с красителем 4-диэтиламино-азобензол и сенсibilизатором гексахлорэтан (C_2Cl_6)	200–10000	ПОР-3	30, 50, 80

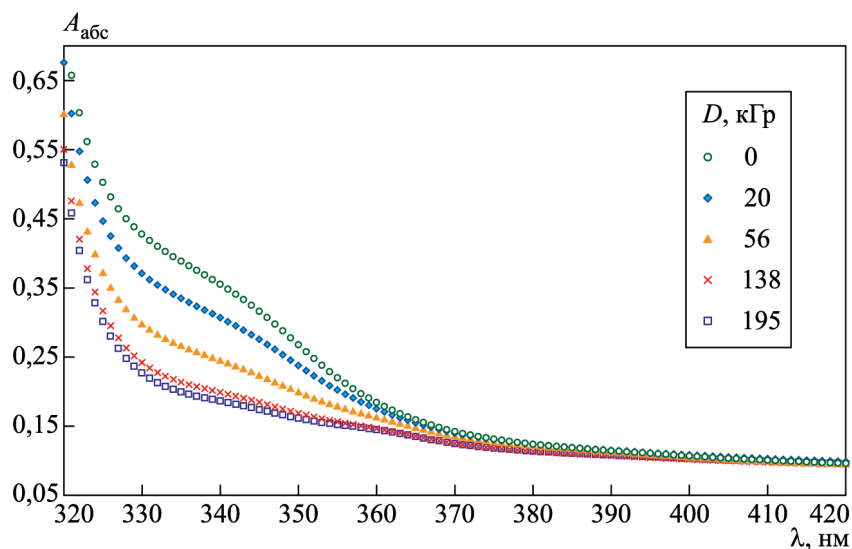


Рис. 1. Спектр абсолютной оптической плотности $A_{\text{абс}}$ ПЭТ-подложки радиохромных плёнок для разных значений поглощённой дозы $D=0 \dots 200$ кГр (при $\lambda > 420$ нм значение $A_{\text{абс}}$ ПЭТ-плёнки практически не зависит от дозы D)

Fig. 1. The absolute optical density A_{abs} spectrum of the polyethylene terephthalate substrate for radiochromic films in dependence of an absorbed dose $D=(0 \dots 200)$ kGy (at $\lambda > 420$ nm the OD A_{abs} of the PET-base practically does not depends on the absorbed dose D)

измерений (СИ) поглощённой дозы утверждённого типа и дозиметрические системы с метрологическими характеристиками, прослеживаемыми к ГЭТ 209-2014 во всём требуемом диапазоне значений D . Такие СИ будут обеспечивать единство измерений поглощённой дозы и гарантировать контроль качества продукции при её обработке ионизирующим излучением.

Для дозиметрии в радиационных технологиях наиболее эффективно применение радиационно-чувствительных плёночных СИ вследствие простоты измерений, а также доступности, дешевизны и высокого пространственного разрешения (до 1 мм) измерений при картировании распределения поглощённой дозы в облучаемой продукции [7, 8]. Дозиметрические системы на основе радиационно-чувствительных композиций (РЧК) хорошо известны и используются в различных областях науки, техники и медицины как для пусконаладочных работ при вводе в эксплуатацию радиационно-технологических установок, так и для валидации

процесса радиационной обработки [1, 2, 5–11].

Цель настоящей работы – исследование измерительных возможностей РЧК в широком диапазоне поглощённой дозы. Для этого рассмотрены спектральные, дозиметрические и метрологические характеристики РЧК, ранее не изученные с этой точки зрения, и показана возможность разработки на их основе новых

плёночных дозиметрических систем и СИ поглощённой дозы в расширенном диапазоне значений D , включая область малых доз 30–1000 Гр.

Материалы, аппаратура и методы. Радиационно-чувствительные композиции.

В табл. 1 приведены краткие характеристики исследуемых образцов РЧК, из которых по технологии согласно ТУ 2379-026-13271746-2006 изготовлены образцы плёнок. Для этого на основу-носитель из прозрачной полиэтилентерефталатной (ПЭТ) плёнки толщиной около 98 мкм наносят слой РЧК из соответствующего сополимера определённой толщины. Для изучения чувствительности к поглощённой дозе от толщины слоя РЧК в диапазоне $(30 \pm 3) \dots (90 \pm 5)$ мкм изготовлены плёнки со слоями РЧК различной толщины (см. табл. 1). В течение суток плёнки высушивали в тёмном помещении с последующей тепловой обработкой в термической печи при 60°C в течение 4–5 ч. После просушки из плёнок вырезали экспериментальные образцы размером 12×25 мм в соответствии с размерами держателей спектрофотометра. Оптическую плотность необлучённых образцов плёнок контролировали на спектрофотометре с целью отбора опорных образцов.

Экспериментальная аппаратура, методика измерений.

Для облучения соответствующей дозой гамма-, бета- или электронного излучений согласно ISO/ASTM 51261-2013 “Practice for calibration of routine dosimetry systems for radiation processing” составляли комплекты, содержащие по шесть образцов плёнок: РЧК ПОР-2 толщиной 90, 75, 50 мкм и РЧК ПОР-3 толщиной 80, 50, 30 мкм (см. табл. 1). Облучение экспериментальных радиационно-чувствительных плёночных образцов проводили на установках МРХ-γ-100 (излучение радионуклидов ^{60}Co , энергия 1,25 МэВ, мощность дозы в процессе облучения $\sim 2,3$ Гр/с) и ЛМБ-γ-1М (излучение радионуклидов ^{137}Cs , энергия 0,65 МэВ, мощность дозы $\sim 0,5$ Гр/с). Эти установки входят в состав эталона ГЭТ 209-2014 [3, 4]. Различные значения D получали накоплением дозы в аттестованном объёме эталона путём изменения времени облучения.

Измерение оптической плотности плёночных образцов проводились на двулучевом спектрофотометре

SPECORD 210 Plus (Analytic Jena, Германия). Относительную оптическую плотность $A_{\text{отн}}$ плёнок, облучённых различными дозами, измеряли на спектрофотометре относительно оптической плотности $A_{\text{оп}}$ необлучённого опорного образца и вычисляли по формуле

$$A_{\text{отн}} = A_{\text{обл}} - A_{\text{оп}}, \quad (1)$$

где $A_{\text{обл}}$ – абсолютная оптическая плотность облучённой радиохромной плёнки.

В настоящей работе для каждого значения D использовали отдельные описанные выше комплекты из шести образцов. Оптические плотности измеряли до и после облучения.

Результаты исследований. Основаноситель из ПЭТ защищает РЧК от механических повреждений при работе. Поскольку слой ПЭТ-носителя может изменить оптическую плотность всей системы «носитель+РЧК-плёнка», исследовали оптическую плотность необлучённой плёнки ПЭТ-носителя и её чувствительность к облучению ионизирующим излучением. На рис. 1 представлены спектры абсолютной оптической плотности ПЭТ-носителя (98 ± 3) мкм до и после облучения ионизирующим излучением дозами до 200 кГр. В рабочей области длин волн оптического излучения 400–600 нм ионизирующее излучение практически не оказывает влияния на оптическую плотность ПЭТ-плёнок в рабочей области (500–600 нм) исследуемых РЧК (относительная неопределённость измерений оптической плотности плёнки $u_A/A \leq 0,06$).

На рис. 2 представлены результаты исследования относительной оптической плотности плёнок ПОР-1 (см. табл. 1). На выделенных длинах волн $\lambda = 340, 512, 525$ и 580 нм (интересных для дозиметрических целей) зависимости $A_{\text{отн}}(D)$ имеют линейный характер. Спектры относительной оптической плотности исследованных образцов радиохромной плёнки ПОР-1 условно можно разделить на три поддиапазона. Длины волн $\lambda < 370$ нм в дозиметрии не используются вследствие неоднородности оптической плотности РЧК. В диапазоне $\lambda = 370 \dots 480$ нм воздействие ионизирующего излучения приводит к просветлению РЧК, но оптическая плотность пропорциональна поглощённой дозе, что можно использовать для дозиметрических целей. В настоящее время плёнки ПОР-1 применяются в дозиметрии на длинах волн 512 и 580 нм для измерений поглощённой дозы в диапазонах соответственно 5–50 и 30–200 кГр.

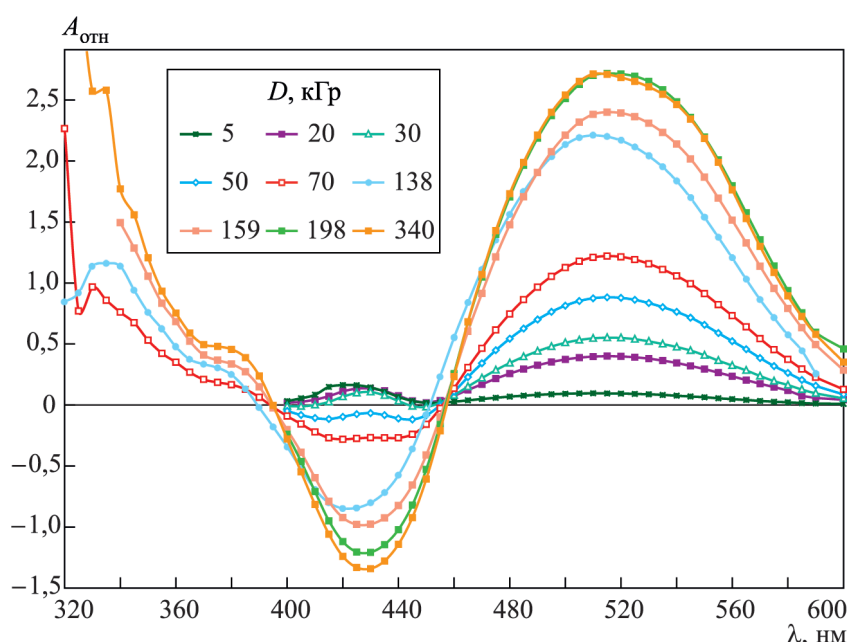


Рис. 2. Спектры относительной оптической плотности $A_{\text{отн}}$ плёнки ПОР-1 для разных значений поглощённой дозы D

Fig. 2. The POR-1 film relative optical density A_{rel} spectra for different values of the absorbed dose D

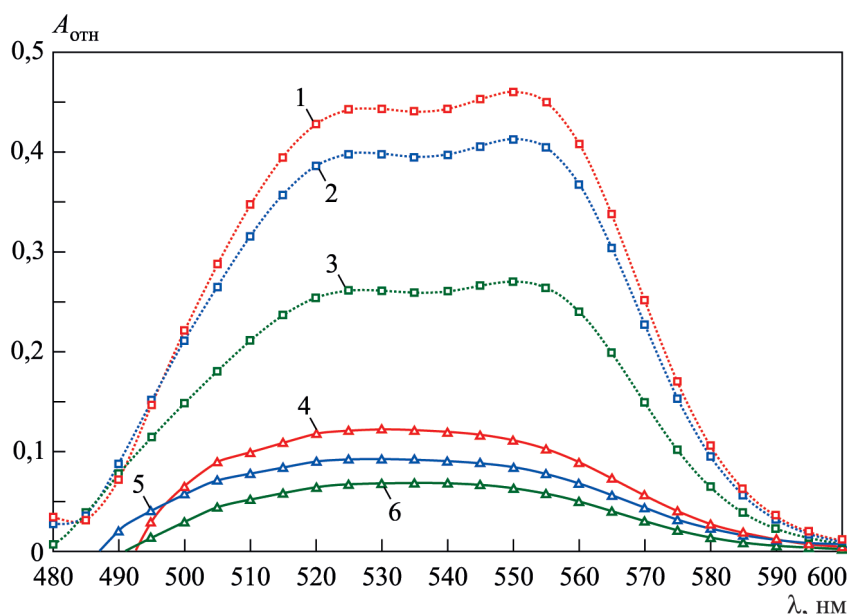


Рис. 3. Спектральное распределение относительной оптической плотности плёнок ПОР-2 и ПОР-3 с радиационно-чувствительными слоями разной толщины, облучённых близкими дозами:

1–3 – ПОР-2 соответственно при толщинах РЧК-слоя примерно 90, 75, 50 мкм и поглощённых дозах около 884, 914, 904 Гр; 4–6 – ПОР-3 соответственно при поглощённой дозе около 800 Гр и толщине РЧК-слоя 80, 50, 35 мкм

Fig. 3. The POR-2 and POR-3 films relative optical density spectral distribution for different thicknesses radiation-sensitive layers (RS-layer) at equal irradiated doses:

1–3 – POR-2 with RS-layer thicknesses $\sim 90, 75, 50 \mu\text{m}$ at absorbed dose $\sim 884, 914, 904 \text{ Gy}$; 4–6 – POR-3 at the absorbed dose of $\sim 800 \text{ Gy}$ for RS-layer thickness $80, 50, 35 \mu\text{m}$

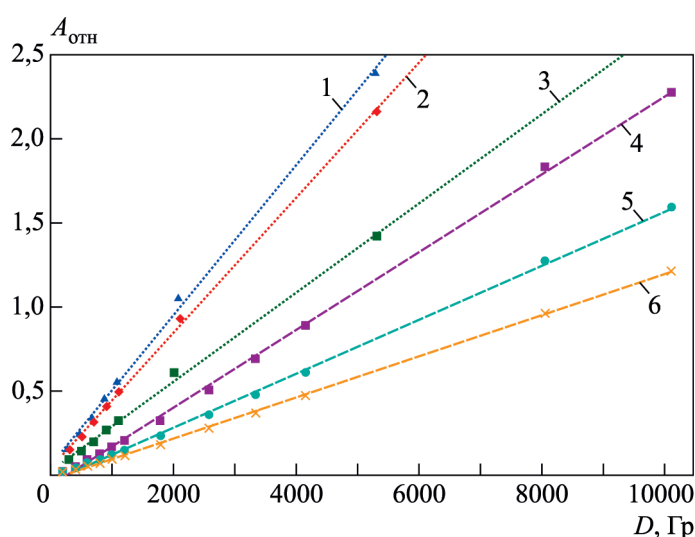


Рис. 4. Функциональная зависимость относительных оптических плотностей плёнок от поглощённой дозы:
1–3 – ПОР-2, $\lambda = 550$ нм, толщина РЧК-слоя соответственно 90, 75, 50 мкм; 4–6 – ПОР-3, $\lambda = 530$ нм, толщина РЧК-слоя соответственно 80, 50, 35 мкм

Fig. 4. The relative optical densities functional dependence on the absorbed dose:

POR-2, $\lambda = 550$ nm, the thickness of the RS-layer ~90, 75, 50 μm – curves 1–3, respectively; POR-3, $\lambda = 530$ nm, the thickness of the RS-layer ~80, 50, 35 μm – curves 4–6, respectively

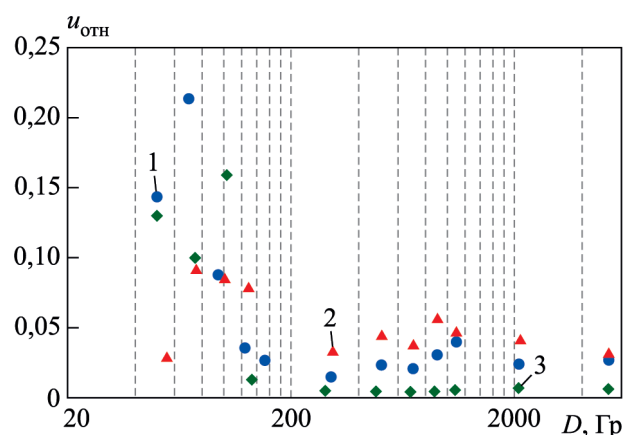


Рис. 5. Зависимость относительной стандартной неопределённости измерения $u_{\text{отн}} = u_c / \bar{A}$ оптической плотности от поглощённой дозы D для плёнок ПОР-2 с радиационно-чувствительными слоями толщиной 50 (1), 75 (2), 90 мкм (3)

Fig. 5. The dependence of the optical density relative standard measurement uncertainty $u_{\text{rel}} = u_c / \bar{A}$ on the absorbed dose D for POR-2 films with RS-layers thicknesses of 50 (1), 75 (2), 90 μm (3)

На рис. 3 представлены спектральные распределения оптической плотности плёнок ПОР-2 ($D = 0,03 \dots 5$ кГр) и ПОР-3 ($D = 0,2 \dots 10$ кГр), облучённых дозами примерно 900 и 800 Гр

соответственно. Спектры этих РЧК близки по форме, но значительно отличаются по чувствительности к поглощённой дозе. На рис. 4 показаны экспериментальные линейные зависимости $A_{\text{отн}}(D)$ для плёнок с разной толщиной РЧК-слоя.

Таким образом, увеличение толщины радиационно-чувствительного слоя расширяет нижнюю границу измеряемых значений D и открывает путь к решению задачи измерения поглощённых доз в области малых доз $D = 1 \dots 1000$ Гр плёночными дозиметрами.

Важным свойством РЧК является изменение со временем (постэффект) наведённой ионизирующим излучением оптической плотности после облучения. Это свойство РЧК требует тщательного исследования и будет рассмотрено в отдельной работе.

Анализ метрологических характеристик РЧК. Относительную оптическую плотность указанных выше образцов плёнок измеряли до и после облучения выбранной дозой (по 6 образцов). Примерно через 1 ч после облучения измеряли наведённую оптическую плотность каждого из выбранных образцов плёнок и оценивали относительную стандартную неопределённость u_A типа A согласно JCGM 100:2008 "Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement":

$$u_A = \frac{1}{A} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2}{(n-1)}}, \quad (2)$$

где A_i – относительная оптическая плотность i -го образца, вычисленная по формуле (1); $\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i$ – среднее арифметическое значение для $n=6$ независимых измерений.

На рис. 5 представлены результаты анализа относительной стандартной неопределённости u_A плёночных РЧК по экспериментальным зависимостям оптической плотности от поглощённой дозы (см. рис. 2–4). Из рис. 5 следует, что более стабильной относительной неопределённостью обладают радиационно-чувствительные слои большей толщины.

Практический интерес представляет функциональная зависимость (калибровочная кривая) поглощённой дозы РЧК от наведённой ионизирующим излучением оптической плотности. Зависимости поглощённой дозы от оптической плотности РЧК с высокой достоверностью ($R^2 \geq 0,999$) представляют собой линейные функции вида

$$D = BA_{\text{отн}} + C, \quad (3)$$

где B , C – константы, определяемые в процессе калибровки; $A_{\text{отн}}$ в данном случае представляет собой измеренное значение наведённой относительной оптической плотности плёночного дозиметра.

На рис. 6 приведены рассчитанные по формуле (3) дозиметрические градуировочные функции $D(A_{\text{отн}})$ для РЧК различной толщины. Расчётные формулы кривых 1–6 имеют вид соответственно:

$$D_1 = 8152A_{\text{отн}} + 225,92; R^2 = 0,9994;$$

$$D_2 = 6207,8A_{\text{отн}} + 246,47; R^2 = 0,9991;$$

$$D_3 = 3731A_{\text{отн}} - 57,741; R^2 = 0,9988;$$

$$D_4 = 4310,3A_{\text{отн}} + 269,95; R^2 = 0,9992;$$

$$D_5 = 2445,4A_{\text{отн}} - 55,736; R^2 = 0,9987;$$

$$D_6 = 2214,1A_{\text{отн}} - 64,355; R^2 = 0,9990.$$

Бюджет неопределённостей. Бюджет неопределённостей измерений относительной оптической плотности $A_{\text{отн}}$ может быть определен из анализа математической модели выражения (3).

Оптическая плотность среды при измерении спектрофотометром выражается логарифмической функцией

$$A = \log(I_0/I) A = \log_{10}(I_0/I), \quad (4)$$

где I_0 – интенсивность падающего на РЧК оптического излучения; I – интенсивность света в спектрофотометре, прошедшего через слой РЧК.

В практических приложениях принято использовать простейшую формулу Бургера и определять интенсивность I пройденного через пленку света как

$$I = I_0 \cdot 10^{-\varepsilon nd},$$

где ε – показатель поглощения; n и d – соответственно плотность и толщина поглощающей среды [13].

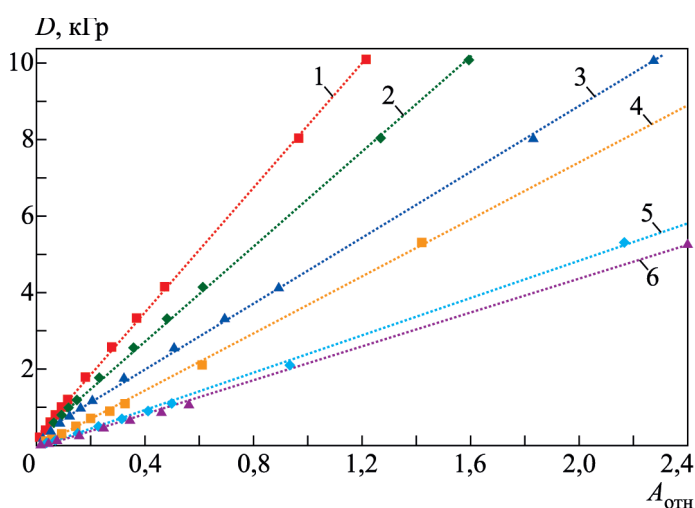


Рис. 6. Зависимость поглощённой дозы от наведённой оптической плотности плёнок ПОР-3 и ПОР-2 (градуировочные характеристики): 1–3 – ПОР-3, толщина РЧК-слоя 35, 50, 80 мкм; 4–6 – ПОР-2, толщина РЧК-слоя 50, 75, 90 мкм

Fig. 6. The radiation-sensitive films POR-3 and POR-2 absorbed dose D dependence on the induced optical density A_{rel} (calibration characteristics):

1–3 – POR-3 with the RS-layer thicknesses 35, 50, 80 μm ; 4–6 – POR-2 with the RS-layer thicknesses 50, 75, 90 μm

В рассматриваемом случае поглощающей средой является РЧК. В результате формула для оптической плотности РЧК принимает вид

$$A = \varepsilon nd. \quad (5)$$

Очевидно, что параметры ε , n , d зависят от температуры и влажности окружающей среды, мощности излучения,

Таблица 2

Бюджет неопределённостей измерения поглощённой дозы РЧК

Неопределённость		Обозначение стандартной неопределённости
Источник	Тип	
Калибровка поглощённой дозы и мощности дозы эталона ¹⁾	B	u_k
Облучательная установка ²⁾	B	$u_{\text{уст}}$
Вариации чувствительности спектрофотометра ³⁾	A	$u_{\text{ч. спф}}$
Воспроизводимость спектрофотометра ⁴⁾	A (B)	$u_{\text{кв. спф}}$
Однородность плёночных дозиметров одной партии	A	$u_{\text{пл}}$
Измерение оптической плотности при калибровке (градуировке)	A	$u_{\text{опк}}$
Неопределённость аппроксимации калибровочной функцией	A	$u_{\text{аппрокс}}$
Температура окружающей среды при облучении	B	$u_{t \text{ окр}}$
Влияние температуры облучения	A (B)	$u_{t \text{ обл}}$
Влияние влажности при облучении	A (B)	$u_{\text{влж}}$
Степень стабильности оптической плотности радиоохромных дозиметров	A (B)	$u_{\text{л эфф}}$
Комбинированная неопределённость (1σ) ⁵⁾ $u_c(D) = \sqrt{\sum (\partial D / \partial x_i)^2 u_A^2(x_i) + \sum u_B^2(x_j) / 3}$		
Расширенная неопределённость (2σ) $U = 2u_c$		

Примечания.

1) Из сертификата калибровки (аттестации) эталонного дозиметра.

2) Геометрическая неоднородность поля ионизирующего излучения, коррекция распада гамма-источников, неопределённость установки таймера, скорость конвейера.

3) Оценивается из ряда измерений оптической плотности плёнки при фиксированной неизменной позиции в держателе спектрофотометра.

4) Оценивается из показаний спектрофотометра после каждого съёма-установки облучённой плёнки в держатель спектрофотометра.

5) Индексы A, B в формуле для вычисления стандартной неопределённости u_c относятся только к табл. 2. Неопределённости типа B оцениваются в предположении нормального распределения.

характеристик спектрофотометра, РЧК и т. д. Коэффициенты B , C из выражения (3) определяются в процессе калибровки и характеризуют эталон и его свойства. Неопределённости параметров ε , n , d и коэффициентов B , C обуславливают весь спектр бюджета неопределённостей измерений поглощённой дозы РЧК. Бюджет неопределённостей измерения поглощённой дозы ионизирующего излучения представлен в табл. 2.

Заключение. В ходе исследования спектральных, дозиметрических характеристик и относительной стандартной неопределённости плёнок с РЧК трёх типов установлено, что их чувствительность к поглощённой дозе пропорциональна толщине слоя РЧК.

Плёнку с РЧК на основе сополимера с феназиновым красителем (ПОР-1) толщиной около 15 мкм можно применять для измерения поглощённой дозы в диапазоне 5–200 кГр путём измерения на спектрофотометре наведённой оптической плотности на нескольких длинах волн.

Слой РЧК на основе сополимера с красителем 4-диэтиламиноазобензол (плёнка ПОР-2) толщиной 50–90 мкм наиболее чувствителен к поглощённой дозе в диапазоне 0,03–5 кГр. Слой того же РЧК толщиной 30–80 мкм с добавкой гексахлорэтана C_2Cl_6 (плёнка ПОР-3) может обеспечить диапазон измерений поглощённой дозы (0,2–10) кГр.

Таким образом, на основе исследованных РЧК могут быть разработаны СИ поглощённой дозы для применения в радиационных технологиях с применением интенсивных источников фотонного и электронного излучений в диапазоне поглощённой дозы 0,03–200 кГр и выше.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность сотруднице ООО «Полигма» Мещеряковой Н. К. за изготовление образцов РЧК, а также сотрудников лаборатории технологической дозиметрии ФГУП «ВНИИФТРИ» за помощь при экспериментальных исследованиях, обработке результатов измерений и ценные замечания по существу при прочтении рукописи.

Список литературы

- McLaughlin W. L., Humphreys J. C., Hocken D., and Chappas W. J., *Radiat. Phys. Chem.*, 1988, vol. 31, pp. 505–514. [https://doi.org/10.1016/1359-0197\(88\)90218-4](https://doi.org/10.1016/1359-0197(88)90218-4)
- Обеспечение единства измерений в радиационных технологиях / Под общей редакцией П. А. Красовского. Мendeleevo: Изд-во ВНИИФТРИ, 2007. 255 с.
- Алейкин В. В., Генералова В. В., Громов А. А., Гурский М. Н., Жанжора А. П., Емельяненко И. А., Коваленко О. И., Тенишев В. П. Государственный первичный специальный эталон единицы мощности поглощённой дозы интенсивного фотонного, электронного и бета-излучений для радиационных технологий ГЭТ 209-2014 // Альманах современной метрологии. 2015. № 5. С. 54–74.
- Алейкин В. В., Генералова В. В., Громов А. А., Коваленко О. И. Государственный первичный специальный эталон единицы мощности поглощённой дозы интенсивного фотонного, электронного и бета-излучений для радиационных

технологий ГЭТ 209-2014 // Измерительная техника. 2019. № 7. С. 10–13.

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-7-10-13>

5. Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности / Под общ. ред. Г. В. Козьмина, С. А. Гераськина, Н. И. Санжаровой. Обнинск: издательство ВНИИАРЭ, 2005. 400 с.

6. Сборник докладов Международной научно-практической конференции «Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности: состояние и перспективы», Обнинск: издательство ВНИИАРЭ, 2018. 356 с.

7. Тенишев В. П., Емельяненко И. А. Радиационно-чувствительные плёночные композиции для измерения поглощённых доз в диапазоне 100–1000 Гр // Стандартные образцы. 2019. Т. 15. № 3. С. 33–40.

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2018-15-3-33-40>

8. Tenishev V. P., Emelyanenko I. A., *Reference Materials in Measurement and Technology*, 2019, vol. 15 (3), pp. 33–40. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2018-15-3-33-40>

9. Devic S. et al., *Med. Phys.*, 2005, vol. 32, pp. 2245–2253. <https://doi.org/10.1118/1.1929253>

10. Devic S., *Physica Medica*, 2011, vol. 27, pp. 122–134. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2010.10.001>

11. Martins M. N., Silva T. F., *Radiation Physics and Chemistry*, 2014, vol. 95, pp. 78–85. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2013.04.030>

12. Aldelaijan S., Devic S., *Physica Medica*, 2018, vol. 49, pp. 112–118. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2018.05.014>

13. Путилов К. А., Фабрикант В. А. Курс физики. В 3-х т. Т. 3. Оптика, атомная физика, ядерная физика. М.: ГИ ФМЛ, 1963, 634 с.

References

- McLaughlin W. L., Humphreys J. C., Hocken D., and Chappas W. J., *Radiat. Phys. Chem.*, 1988, vol. 31, pp. 505–514. [https://doi.org/10.1016/1359-0197\(88\)90218-4](https://doi.org/10.1016/1359-0197(88)90218-4)
- Obespechenie edinstva izmerenij v radiacionnyh tekhnologiyah, ed. P. A. Krasovskii, Mendeleevo, VNIIFTRI Publ., 2007, 255 p. (in Russian).
- Aleykin V. V., Generalova V. V., Gromov A. A., Gursky M. N., Zhanzhora A. P., Emelianenko I. A., Kovalenko O. I., Tenishev V. P., *Al'manah sovremennoj metrologii*, 2015, no. 5, pp. 54–74 (in Russian).
- Aleykin V. V., Generalova V. V., Gromov A. A., Kovalenko O. I., *Measurement Techniques*, 2019, vol. 62, no. 7, pp. 587–591. <https://doi.org/10.1007/s11018-019-01664-4>
- Radiacionnye tekhnologii v sel'skom hozyajstve i pishchevoj promyshlennosti, ed. G. V. Kozmin, S. A. Geraskin, N. I. Sanzharova, Obninsk, RIRAE Publ., 2005, 400 p. (in Russian).
- Radiacionnye tekhnologii v sel'skom hozyajstve i pishchevoj promyshlennosti: sostoyanie i perspektivy, Collection of reports of the International scientific and practical conference “Radiation processing technology for agriculture”, Obninsk, RIRAE Publ., 2018, 356 p. (in Russian).
- Tenishev V. P., Emelianenko I. A., *Reference Materials*, 2019, vol. 15, no. 3, pp. 33–40 (in Russian).

8. Tenishev V. P., Emelyanenko I. A., *Reference Materials in Measurement and Technology*, 2019, vol. 15 (3), pp. 33–40. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2018-15-3-33-40>
9. Devic S. et al., *Med. Phys.*, 2005, vol. 32, pp. 2245–2253. <https://doi.org/10.1118/1.1929253>
10. Devic S., *Physica Medica*, 2011, vol. 27, pp. 122–134. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2010.10.001>
11. Martins M. N., Silva T. F., *Radiation Physics and Chemistry*, 2014, vol. 95, pp. 78–85. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2013.04.030>
12. Aldelaijan S., Devic S., *Physica Medica*, 2018, vol. 49, pp. 112–118. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2018.05.014>
13. Putilov K. A., Fabrikant V. A., *Kurs fiziki in 3 vol., vol. 3: Optika, atomnaya fizika, yadernaya fizika*, Moscow, FIZMATLIT Publ., 1963, 634 p. (in Russian).

Дата поступления: 27.12.2019.

Дата принятия: 04.03.2020.

Spectral, dosimetric and metrological characteristics of radiation sensitive radiochromic compositions

Vladimir P. Tenishev

Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering (VNIIFTRI), Mendeleevo, Moscow Region, Russian Federation, e-mail: tenishev@vniiftri.ru

Spectral, dosimetric properties and metrological characteristics of different radiation sensitive compositions have been investigated for the radiation absorbed dose measurement instrumentation development purpose. It is shown possibility for absorbed dose measurements dynamical range expansion and uncertainty reduction for those compositions. These results can be used for routine dosimetric process control and metrological support in food stuff, agricultural commodities radiation processing technologies.

Key words: absorbed dose, ionizing radiation, radiation sensitive composition, radiation colored film, optical density.

Оценка влияния метрологии на экономику: новая методология

А. П. Чирков

*Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний
в Ярославской области (Ярославский ЦСМ), г. Ярославль, Российская Федерация,
e-mail: chirkovap@yandex.ru*

Рассмотрена проблема разработки методов оценки влияния метрологии на экономику и общество. Представлен обзор отечественных и зарубежных публикаций и статистики по рассматриваемому вопросу. Приведены результаты разработки и апробации метода оценки влияния метрологии на экономику. Представленный метод основан на оценке доли в добавленной стоимости затрат на метрологию как на уровне страны, так и на уровне отдельных видов экономической деятельности. Показана сопоставимость результатов апробации методики с показателями, полученными ранее отечественными и зарубежными специалистами.

Ключевые слова: метрология, экономика, добавленная стоимость.

В последнее время всё острее встаёт вопрос об оценке влияния метрологии на экономику. В частности, в Стратегии обеспечения единства измерений в Российской Федерации до 2025 года (далее – Стратегия) важной системной проблемой названо отсутствие механизмов прогнозирования потребностей общества в измерениях и методов оценки влияния метрологии на качество жизни и экономику страны в целом. В апреле 2020 г. исполнилось три года с момента утверждения Стратегии. Однако до настоящего времени нет официальных документов, содержащих такие методы, и проблема прогнозирования также не решена.

Опыт рассмотрения разработок в области прогнозирования развития экономики с применением закономерностей технологических укладов даёт основание считать, что и прогнозирование развития метрологии целесообразно проводить с использованием этих закономерностей [1].

В данной статье рассмотрена разработанная в Ярославском ЦСМ методология оценки влияния метрологии на качество жизни и экономику. По мнению автора, оценку влияния метрологии следует рассматривать с двух сторон:

как функцию, без которой невозможно выполнять практически любые другие виды деятельности;

оценивать вклад результатов метрологической деятельности в показатели экономики страны.

В этом случае можно показать роль работ, связанных с выполнением и обеспечением измерений, а можно в стоимостных показателях оценить хозяйственную деятельность и определить часть этих показателей в общих результатах хозяйственной деятельности.

Обзор публикаций по оценке влияния метрологии на качество жизни и экономику. Рассмотрение проблем оценки вклада измерений и метрологии в экономику началось в 1970-е гг. Первые публикации по этой тематике

появились в 1977 г. за рубежом [2] и в нашей стране [3]. Обзор большого числа зарубежных публикаций о влиянии метрологии на экономику и общество для Международного комитета законодательной метрологии выполнен Д. Бёрчем (Австралия) [4].

О влиянии метрологии на качество жизни и экономику. В [3] приведены следующие сведения: «В нашей стране ежедневно производится свыше 20 млрд. измерений. ... По ориентировочным расчётам измерения являются основной функцией работы около 4 млн. человек (работники ОТК, лаборанты, операторы, испытатели и др.). Периодически измерения выполняются около 30–40 млн. человек (пилоты, шоферы, штурманы, врачи, рабочие и др.)».

В [4] отмечено, что годовой экономический эффект за счёт совершенствования метрологического обеспечения в 1980-е гг. оценивался на уровне 2,5–3 млрд. руб.

В [5] сказано, что метрология обеспечивает значительные выгоды для экономики и общества, в числе которых: помощь гражданскому обществу, технологическое воспитание, уменьшение смертей и несчастных случаев, улучшение окружающей среды, улучшение здоровья через стандартизацию измерений и испытаний, т. е. повышение качества жизни. В частности, приведён пример экономического эффекта в Австралии при уменьшения числа аварий в результате внедрения средств измерений для контроля соблюдения правил дорожного движения: экономия в размере приблизительно 1,6 млрд австралийских долларов получена при сокращении на 380 числа смертельных случаев на дорогах в результате аварий.

Вклад метрологии в экономику. В [3] приведены данные о доле затрат на измерения в экономике страны в целом и в отдельных её отраслях. В частности, затраты на измерения в себестоимости промышленной продукции составляли 5 %;

затраты на измерения в затратах на производство автобусов – 10 %; затраты на измерения в затратах на производство радиоэлектроники – 25 %; затраты на измерения в затратах на производство микроэлектроники 25–50 %; затраты на измерения в затратах на производство кондитерской и обувной промышленности – 2–3 %; доля средств измерений (СИ) в основных производственных фондах – 4 %. В [3] также отмечено, что удельный вес измерений в научных исследованиях составлял (на примере космической программы «Аполлон» (США)) свыше 40 %.

В [6] приведены данные о доле затрат на измерения в себестоимости строительства, которые оценены в размере около 1 %. Эти данные получены коллективом учёных Госстандарта СССР в период 1972–1973 гг. при подготовке прогноза развития метрологического обеспечения народного хозяйства на дальнейшую перспективу в рамках очередного пятилетнего плана [3]. Можно предположить, что в тот период были получены соотношения и по другим отраслям. По крайней мере, административно-командные методы управления позволяли запрашивать и получать такие данные.

Аналогичные соотношения были получены в тот период и за рубежом. Так, в анализе для Международного комитета законодательной метрологии «Польза законодательной метрологии для экономики и общества» [5] приведены данные, полученные сотрудниками National Institute of Standards and Technology (NIST, США). В [5] отмечено: «цифры добавочной стоимости, определённой как величина товаров и услуг, проданных по цене менее нетрудовых издержек плюс другие пункты, такие как, например, доход и косвенные деловые налоги, были определены Бюро экономического анализа министерства торговли США для каждой отрасли промышленности. Стоимость труда является одним из наибольших компонентов добавочной стоимости. Дон Вито использовал компонент труда в добавочной стоимости как заменитель общей величины добавочной стоимости, чтобы получать величину, добавленную от измерений, связанных с деятельностью для каждой отрасли и, суммируя по всем отраслям, получил, что величина, добавленная от связанных с деятельностью в области измерений, составила 3,5 % валового национального продукта».

В более поздних публикациях можно найти соотношения и по другим отраслям. В выступлении Г. Семерджян и Р. Уоттера [7] на международной конференции «Роль метрологии в экономике и социальной жизни» в г. Брауншвейг в 1998 г. сказано, что затраты на измерения в медицине составляют более 20 %.

В [8], ссылаясь на вышеприведенные данные и без комментариев о каких либо проведённых дополнительно исследованиях, написано, что «по оценкам экспертов доля затрат на измерения составляет 5–10 % общественного труда, а в отраслях промышленности, в которых производят сложную технику, она достигает 20–30 %. Стоимость таких работ в России составляет около 2 %, а в развитых странах 4–6 % валового внутреннего продукта (ВВП)».

Разработка методологии оценки влияния метрологии на экономику. Все выше приведённые оценки влияния метрологии на экономику строились на данных, полученных в 1970-е гг. Необходимо получить такие оценки на основании актуальных современных данных. Для этого требуется сформулировать основные принципы решения этой задачи, т. е. концепцию.

Концепция. Сегодня одним из главных оценочных показателей экономики страны являются валовой национальный продукт (ВВП) и валовая добавленная стоимость (ВДС). Поэтому и главным показателем оценки вклада метрологии в экономику следует признать добавленную от измерений стоимость и её долю в НДС на уровне страны, а также добавленную от измерений стоимость для соответствующей отрасли или вида экономической деятельности.



Рис. 1. Амортизационные отчисления в основных видах экономической деятельности

Fig. 1. Structure of depreciation charges for the main types of economic activity



Рис. 2. Структура кадров страны и основных видов экономической деятельности

Fig. 2. Personnel structure of the country and the main types of economic activities

В соответствии с Методологическими положениями по статистике (Федеральная служба государственной статистики: [сайт]. Выпуск 2, 1998 г. 5.4.2. Добавленная стоимость. URL: https://rosstat.gov.ru/bgd/free/b99_10/isswww.exe/stg/d010/i010810r.htm) «в составе валовой добавленной стоимости выделяются следующие элементы: фонд оплаты труда наёмных работников (включая оплату труда и отчисления на социальное страхование), чистая прибыль, чистый смешанный доход, налоги на производство, субсидии на производство, потребление основного капитала, косвенно измеряемые услуги финансового посредничества. ... Потребление основного капитала представляет собой уменьшение стоимости основного капитала в результате его физического и морального износа».

Таким образом, в состав добавленной стоимости в качестве основных элементов входит заработная плата, отчисления

на социальное страхование, чистая прибыль, амортизация основных средств, налоги и субсидии.

Соответственно, с точки зрения метрологии в добавленную стоимость входят:

заработная плата, выплаченная за выполнение работ по измерению;

отчисления на социальное страхование от фонда заработной платы, выплаченной за выполнение работ по измерению; амортизационные отчисления по СИ.

Анализ сведений, имеющихся в Росстате (Федеральная служба государственной статистики: [сайт]. URL: <https://gks.ru>), показал, что данные о ВДС и добавленной стоимости по отдельным отраслям публикуются ежегодно.

Данные о зарплате, выплаченной за работы по измерению, и информацию о сумме амортизационных отчислений по СИ необходимо получить. Учитывая, что сегодня получить

данные от всех хозяйствующих субъектов можно лишь теоретически, предлагается использовать официальную статистику и, принимая некоторые условия, на её основе получить необходимые данные.

Для этого потребуются не только данные о ВДС, но и данные об амортизационных отчислениях и фонде заработной платы. Эти данные можно получить в базе данных Росстата (Федеральная служба государственной статистики: [сайт]. URL: <https://gks.ru>): (среднемесячная номинальная начисленная заработная плата работников по полному кругу организаций по видам экономической деятельности (в соответствии с ОКВЭД2) в Российской Федерации за 2017–2018 гг.; среднегодовая численность занятых в России по видам экономической деятельности; амортизация основных фондов, начисленная за отчётный год в коммерческих организациях (без субъектов малого предпринимательства) по видам экономической деятельности).

Для выделения из общих данных сведений, относящихся к затратам на измерения, предлагается вычислить долю амортизационных отчислений по СИ с использованием Классификатора основных средств, включаемых в амортизационные группы (утверждён Постановлением Правительства РФ от 01.01.2002 № 1), а долю фонда оплаты труда за работы по выполнению измерений – с использованием Реестра профстандартов (Реестр профстандартов: [сайт]. URL: <https://www.profstandart-rosmintrud.ru/reestr-profstandartov>).

Формирование коэффициентов доли затрат, связанных с измерениями.

Коэффициент доли СИ в амортизационных отчислениях основных фондов. Для получения информации о доле амортизационных отчислений от стоимости использованных в экономике СИ в общей стоимости основных средств можно использовать данные о размерах амортизационных отчислений в разрезе разделов отраслей экономики по Классификатору ОК 029-2014 (Общероссийский классификатор видов экономической деятельности (утв. Приказом Росстандарта от 31.01.2014 № 14-ст, ред. от 14.11.2019 с изм. и доп. вступ. в силу с 01.01.2020)). Задача заключается в получении данных по СИ. Для этой цели предлагается использовать информацию

о СИ в Классификаторе основных средств, включаемых в амортизационные группы. Классификатор имеет 571 позицию. Для решения этой задачи на первом этапе проанализированы все позиции Классификатора основных средств, включаемых в амортизационные группы, и выделены те из них, которые относятся к СИ. Результат: 26 позиций Классификатора можно отнести к СИ. Используя полученные данные, вычислим долю таких позиций в Классификаторе: $26/571=0,046$ или 4,6 %, т. е. можно принять, что доля СИ в амортизационных отчислениях в целом по стране составляет 4,6 %. Аналогично выполнен анализ и по отдельным видам экономической деятельности.

Доли СИ в амортизационных отчислениях основных фондов приведены на рис. 1. Используя эти коэффициенты и сведения из официальной статистики можно определить вклад затрат на СИ в добавленную стоимость как по отдельным видам экономической деятельности, так и на уровне страны.

Коэффициент доли заработной платы специалистов по метрологии. Значение коэффициентов доли заработной



Рис. 3. Объём добавленной от измерений стоимости по видам экономической деятельности (млрд руб.) (а) и её доля в добавленной стоимости видов экономической деятельности (б)

Fig. 3. The amount of value added from measurements of economic activities (billion rubles) (а) and share of value added from measurements in the added value of economic activities (б)

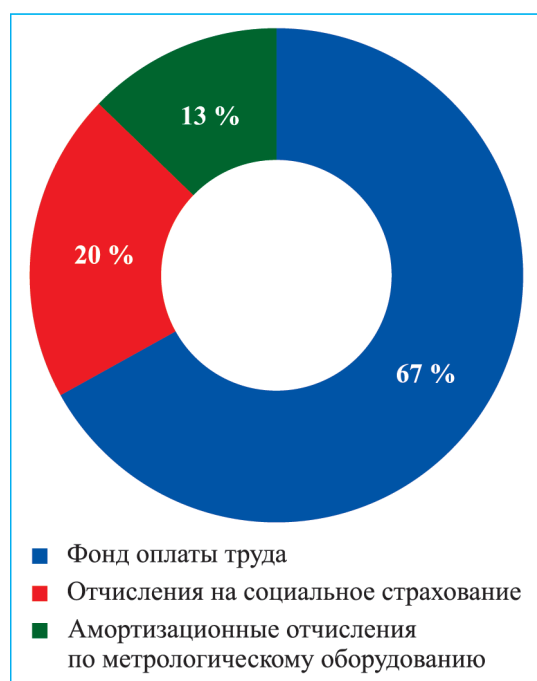


Рис. 4. Структура добавленной от измерений стоимости в ВВП России

Fig. 4. Structure of value added from measurements in Russia's GDP

платы за выполненную метрологическую деятельность в общем объёме заработной платы по экономике в целом и по каждому разделу основных видов экономической деятельности можно вычислить, используя имеющиеся официальные статистические и нормативные материалы. Как и в предыдущем случае придётся прибегать к некоторым допущениям.

Во-первых, предлагается выделить три категории сотрудников: кто использует измерения в основной деятельности; для кого измерения являются одной из должностных функций; для кого измерения являются основным видом деятельности.

В качестве базы данных для анализа кадрового состава по данным критериям принят Реестр профстандартов. Он не только представлен почти строго по структуре данных ВВП в части отраслевой структуры, но и содержание профессиональных стандартов позволяет более объективно отнести профессию к одной из выше приведённых категорий. Паспорта профессиональных стандартов можно использовать при отнесении профессии к конкретной категории.

Для получения данных о категории специалистов, названия которых есть в Реестре профстандартов, сначала необходимо установить соответствие разделов Реестра и наименований разделов видов экономической деятельности в структуре ВВП. Затем по каждому виду экономической деятельности проанализировать структуру кадров на предмет соответствия категории сотрудника критерию. Результаты анализа приведены на рис. 2.

Результаты расчётов показали, что в целом по стране доля специалистов, служащих и рабочих, которые применяют измерения в основной деятельности, составила 33,2 %. Доля специалистов, служащих и рабочих, для которых измерения являются одной из должностных обязанностей – 61,71 %, а если измерения являются основным видом деятельности – 5,09 %. Аналогично выполнен анализ и по отдельным видам экономической деятельности.

Использование разработанной методологии для оценки влияния метрологии на экономику России. Используем официальную статистику о среднемесячной заработной плате и численности сотрудников и получим данные о выплаченной заработной плате в течение года. Для получения более осторожной оценки в расчёте применим коэффициент доли заработной платы специалистов, для которых измерения являются основным видом деятельности (контролеры, специалисты по метрологии и т. п.).

На основе данных о фонде оплаты труда и коэффициентов доли заработной платы специалистов, выполняющих метрологическую деятельность, можно вычислить затраты на зарплату за выполненные измерения. В целом по стране они составили более 1632 млрд рублей.

Для расчёта суммы амортизационных отчислений по метрологическому оборудованию используем полученные значения коэффициента доли амортизационных отчислений и данные официальной статистики об амортизационных отчислениях. В целом по стране они составили более 315 млрд рублей. Затем вычислим сумму добавленной от измерений стоимости и долю добавленной от измерений стоимости в общей добавленной стоимости по видам экономической деятельности и в целом по стране.

По результатам вычисления вклад метрологии в ВДС составляет около 2,4 трлн рублей или 2,7 % ВВП. При этом наибольшая доля затрат на измерения отмечается в добавленной стоимости таких видов экономической деятельности, как обеспечение электрической энергией, газом и паром, кондиционирование воздуха (6,1 %), деятельность в области здравоохранения и социальных услуг (3,5 %), деятельность в области информации и связи (2,5 %).

На рис. 3 представлены диаграммы распределения видов экономической деятельности по величине и доле затрат на измерения в добавленной стоимости. На рис. 4 показана структура добавленной от измерений стоимости в ВВП страны. Основную долю составляют затраты, связанные с трудовым вкладом метрологов и специалистов, занятых измерениями и испытаниями.

Следует обратить внимание на сопоставимость этих показателей с показателями, полученными отечественными и зарубежными специалистами в XX в. Эти данные в целом по стране и по отдельным видам экономической деятельности приведены в таблице.

Использование в качестве исходных данных для расчёта не фактических значений затрат на измерения (трудовых и материальных), а их оценок, полученных косвенным путём, является слабым местом предлагаемой методики. Этот недостаток можно устранить, если получить данные

Сопоставление рассчитанных показателей влияния измерений на экономику Российской Федерации с данными, полученными в XX в.

Макроэкономический показатель	Доля добавленной стоимости от измерений, %			Доля СИ в основных фондах, %		
	XXI в.	XX в.		XXI в.	XX в.	
		Россия	Страны мира		Россия	Страны мира
ВВП	2,69	2,00	3,50	4,55	4,00	–
Вид экономической деятельности:						
Сельское и лесное хозяйства, охота, рыболовство и рыбоводство	1,31	–	–	2,60	–	–
Добыча полезных ископаемых	0,94	–	–	2,20	–	–
Обрабатывающие производства	2,17	5,00	–	5,38	–	–
Обеспечение электрической энергией, газом и паром, кондиционирование воздуха	6,09	–	9,80	3,19	–	–
Водоснабжение, водоотведение, сбор и утилизации отходов, деятельность по ликвидации загрязнений	0,25	–	20,00	1,82	–	–
Строительство	0,57	1,00	–	4,62	–	–
Торговля оптовая и розничная, ремонт автотранспортных средств и мотоциклов	0,00	–	50,00	–	–	–
Транспортировка и хранение	0,52	–	–	4,00	–	–
Информация и связь	2,46	–	8,90	2,56	–	–
Государственное управление и обеспечение военной безопасности, социальное обеспечение	0,00	–	–	11,11	–	–
Здравоохранение и социальные услуги	3,46	–	20,00	4,76	–	–
Культура, спорт, организация досуга и развлечений	0,25	–	–	23,81	–	–

Примечание. Знак «–» означает, что данных нет.

о заработной плате и затратах на основные фонды, связанные с измерениями. Сегодня практически невозможно получить статистические данные от всех хозяйствующих субъектов о затратах на измерения, а получение сведений от отдельных представителей отраслей по соответствующему запросу вполне реально.

В числе сведений для получения оценок влияния метрологии достаточно двух: доли СИ в основных фондах и доли заработной платы сотрудников, измерения для которых являются основным видом деятельности, в общем фонде оплаты труда.

Распространение таких сведений не может причинить вред хозяйствующим субъектам, при этом подготовка сведений позволит руководителям предприятий получить объективную оценку специалистов, выполняющих измерения и обеспечивающих точность и достоверность информации о качестве и количестве выпускаемой продукции.

Как показали расчёты, ввод дополнительных сведений о доле зарплаты специалистов по метрологии и доле амортизационных отчислений влияют на получение более объективной оценки добавленной от измерений стоимости. В частности, использование более одного значения доли заработной платы специалистов, измерения для которых

являются их основной деятельностью, в общем фонде оплаты труда, а также учёт доли амортизационных отчислений по метрологическому оборудованию для указанных выше (см. таблицу) видов экономической деятельности привели к увеличению количественного значения оценки доли добавленной от измерений стоимости в ВВП страны более чем в два раза. Учёт доли заработной платы сотрудников позволил вычислить и погрешность такой оценки. При этом надо иметь в виду, что чем больше данных будет использовано в расчётах, тем более точной будет оценка и меньше погрешность.

Заключение. Апробация предлагаемой методологии на официальных статистических данных и сопоставление результатов оценки влияния метрологии на экономику с ранее полученными данными показала, что её применение позволяет объективно оценить вклад метрологии в экономику страны и отдельных видов экономической деятельности.

Список литературы

1. Исаев Л. К., Чирков А. П. О востребованности эталонной базы: новый подход // Измерительная техника. 2015. № 2. С. 23–26.

2. Poulson Barry W., *Economic Analysis of the National Measurement System*, National Bureau of Standards, September 1977.

3. Курников И. Б. Экономическая эффективность метрологического обеспечения. М.: Знание, 1977. 56 с.

4. Birch J., Benefit of Legal Metrology for the Economy and Society (A study for the International Committee of Legal Metrology, 2003), available at: https://www.oiml.org/en/files/pdf_e/e002-e03.pdf (accessed: 01.08.2020).

5. Окрепилов В. В., Антохина Ю. А., Исаев Л. К., Чирков А. П. Экономика метрологии: монография. СПб.: ГУАП, 2017. 175 с.

6. Бесфамильная Л. В. Экономическая эффективность средств измерений при контроле качества продукции. М.: Издательство стандартов, 1986. 192 с.

7. Hratch G. Semerjian, Robert L. Watters, *Metrology: Impact on National Economy and International Trade*, Role of Metrology in Economic and Social Development, Seminar, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, vol. 9, June 1, 1998, Brunswick, GE.

8. Окрепилов В. В., Крутиков В. Н., Элькин Г. И. Экономическая составляющая в обеспечении единства измерений // Измерительная техника. 2014. № 2. С. 3–8.

References

1. Isaev L. K., Chirkov A. P., *Measurement Techniques*, 2015, vol. 58, no. 2, pp. 143–148.

<https://doi.org/10.1007/s11018-015-0676-4>

2. Poulson Barry W., *Economic Analysis of the National Measurement System*, National Bureau of Standards, September 1977.

3. Kournikov I. B., *Economicheskaya effektivnost' metrologicheskogo obespecheniya*, Moscow, Znanie Publ., 1977, 56 p. (in Russian).

4. Birch J., Benefit of Legal Metrology for the Economy and Society (A study for the International Committee of Legal Metrology, 2003), available at: https://www.oiml.org/en/files/pdf_e/e002-e03.pdf (accessed: 01.08.2020).

5. Okrepilov V. V., Antokhina Yu. A., Isaev L. K., Chirkov A. P., *Economica Metrologii*, Monograph., SPb., GUAP Publ., 2017, 175 p. (in Russian).

6. Besfamil'naya L. V., *Economicheskaya effektivnost' sredstv izmereniy pri kontrole kachestva productsii*, Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1986, 192 p. (in Russian).

7. Hratch G. Semerjian, Robert L. Watters, *Metrology: Impact on National Economy and International Trade*, Role of Metrology in Economic and Social Development, Seminar, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, vol. 9, June 1, 1998, Brunswick, GE.

8. Okrepilov V. V., Krutikov V. N., Elkin G. I., *Measurement Techniques*, 2014, vol. 57, no. 2, pp. 109–116.

<https://doi.org/10.1007/s11018-014-0416-1>

Дата поступления: 29.04.2020.

Дата принятия: 23.06.2020.

Assessment of the impact of metrology on the economy: new methodology

Alexey P. Chirkov

State Regional Center for Standardization, Metrology and Testing in the Yaroslavl region, Yaroslavl, Russian Federation, e-mail: chirkovap@yandex.ru

The problem of methods preparation for assessing the impact of metrology on the economy and society is considered. An overview of domestic and foreign publications and statistics on the issue is presented. The results of the development and testing the method for assessing the impact of metrology on the economy are adduced. The represented method is based on the estimation of the share in the added value of metrology costs both at the country level and at the level of separate economic activities. The comparability of the results of testing the method with the indicators obtained earlier by domestic and foreign specialists is shown.

Key words: metrology, economy, value added.

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Продолжается подписка на журналы
«Измерительная техника» и «Метрология» на 2020 г.

АО «Агентство «Роспечать»

(подписка на полугодие или отдельные номера)

www.rosp.ru +7 (495) 921-25-26

«Измерительная техника» – индекс 70391

«Метрология» – индекс 79377

АО «Агентство подписки и розницы»

(по Объединённому каталогу «Пресса России»)

www.apr.ru +7 (495) 974-11-11

«Измерительная техника» – индекс 38168

«Метрология» – индекс 38169

ООО «Информнаука»

www.informnauka.com +7 (495) 787-38-73

ООО «УП «Урал-Пресс»

www.ural-press.ru +7 (499) 700-05-07

ФГУП «ВНИИМС»

www.vniims.ru +7 (495) 430-28-02

Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU

www.elibrary.ru +7 (495) 544-24-94

Национальный цифровой ресурс «Руконт»

www.rucont.ru +7 (495) 719-09-21

Адрес редакции:

119361 Москва, ул. Озёрная, 46, ФГУП «ВНИИМС»

Тел.: +7 (495) 781-48-70

E-mail: izmt@vniims.ru

www.izmt.ru