

аспекты межионных взаимодействий и природы ионов, что подтверждается правильным «трендом» (верными направлением и экстремумами) этой зависимости. Однако введённые поправочные коэффициенты нуждаются в обосновании и жёстком ограничении значений в зависимости от внешних и внутренних условий использования растворов. Это позволит применять методику 3 для всех растворов независимо от числа компонентов и условий эксплуатации.

Л и т е р а т у р а

1. Кривобоков Д. Е., Первухин Б. С., Соловьёв В. А. Анализ методик построения функций преобразования на основе экспериментальных данных в приборах контроля //

Ползуновский альманах. 2014. № 1. С. 56–59.

2. **Курс физической химии в 2-х т.** / Под ред. Я. И. Герасимова. М.: Химия, 1973.

3. **Ю. Я. Фиалков.** Необычные свойства обычных растворов. М.: Педагогика, 1978.

4. **А. П. Крешков.** Основы аналитической химии. Физико-химические (инструментальные) методы анализа. М.: Химия, 1970.

5. **Р. Робинсон, Р. Стокс.** Растворы электролитов. М.: Иностранная литература, 1963.

6. **В. В. Ерёмин, С. И. Каргов, И. А. Успенская, Н. Е. Кузьменко, В. В. Лунин.** Основы физической химии. Теория и задачи: учеб. пособие для вузов. М.: Экзамен, 2005.

Дата принятия: 13.06.2017.

МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО

621.372.8

Международные сличения эталонов в области волоконно-оптических систем связи и передачи информации

**А. И. ГЛАЗОВ, В. В. ГРИГОРЬЕВ, В. Е. КРАВЦОВ, А. К. МИТЮРЕВ,
А. Б. СВЕТЛИЧНЫЙ, К. Б. САВКИН, С. В. ТИХОМИРОВ**

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений,
Москва, Россия, e-mail: kravtsov-f3@vniiofi.ru

Рассмотрены результаты международных сличений в области волоконно-оптических систем связи и передачи информации, в том числе в части средней мощности оптического излучения (проекты COOMET PR-S6, APMP PR-S2) и хроматической дисперсии в оптическом волокне (проект EURAMET PR-S3). Приведены данные по сличениям в части длины оптического волокна (проект APMP PR-S8), поляризационной модовой дисперсии (проект COOMET PR-S9) и длины волны для волоконной оптики (проект COOMET PR-S8), выполняемым в настоящее время.

Ключевые слова: волоконно-оптические системы, эталоны, международные сличения, оптическое волокно.

The intercomparisons results in the field of optical waveguide communication systems are considered including projects on optical radiation power (projects COOMETPR-S6, APMP PR-S2) and on chromatic dispersion in optical fiber (project EURAMET PR-S3). Information about today intercomparisons on polarisation mode dispersion (project COOMET PR-S9), wavelength for fiber optics (project COOMET PR-S8) and length for optical fiber (project APMP PR-S9) is presented.

Key words: fiber optical communication systems, standards, intercomparisons, optical fiber.

Волоконно-оптические системы связи и передачи информации (ВОСП) являются одной из самых динамично развивающихся областей науки и техники не только в Российской Федерации, но и во всём мире. Повсеместно на практике реализуется принцип «волокно в каждый дом». Для поддержания работоспособности и развития каналов связи операторы связи и обслуживающие организации постоянно наращивают парк современных многофункциональных средств измерений параметров ВОСП. Обеспечение единства измерений в области ВОСП регулируется на законодательном уровне, поэтому в Российской Федерации созданы уникаль-

ные эталонная и методическая базы в части измерений таких параметров, как средняя мощность оптического излучения, ослабление, длина волны, время распространения, а также длина и дисперсионные характеристики оптического волокна [1]. Во ВНИИОФИ разработаны, изготовлены и эксплуатируются государственные первичные специальные эталоны (ГПСЭ) единиц указанных величин.

ВНИИОФИ участвует в международных сличениях эталонов ведущих национальных метрологических институтов (НМИ) для обеспечения достоверности результатов воспроизведения единиц параметров ВОСП и под-

тверждения калибровочных измерительных возможностей (СМС) Российской Федерации [2]. В настоящей статье представлены результаты международных сличений эталонов в области ВОСП.

В 1990-х гг. на базе утверждённых ранее установок высшей точности ВНИИОФИ начал работы по проведению международных сличений эталонов НМИ.

Результаты двусторонних предварительных сличений. В 1999–2001 гг. были проведены двусторонние сличения (неофициальный статус сличений) ГПСЭ и эталонов NIST (США) и PTB (Германия) по средней мощности оптического излучения для ВОСП. В качестве эталона сравнения использовали эталонный калориметрический приёмник оптического излучения с электрическим замещением. Данный приёмник был разработан во ВНИИОФИ. Прибор представлял компактный лабораторный калориметр с системой регистрации и калибровки на основе электрического замещения, работающий в нормальных условиях. Он объединял два полостных приёмных элемента – рабочий и компенсационный – с нагревателем для электрической калибровки. Калибровку производили прямым замещением электрической мощностью с использованием технологий снижения дрейфа и влияния окружающей среды. Оптическая мощность поглощалась в полости рабочего приёмного элемента с малой спектральной зависимостью. Эквивалентность электрического и оптического воздействий была практически равна единице. Ввод излучения осуществлялся через волоконно-оптический адаптер. Чувствительность данного детектора составляла примерно 0,27 В/Вт.

В табл. 1 представлены результаты двусторонних предварительных сличений эталонов единицы средней мощности оптического излучения для ВОСП NIST и ВНИИОФИ.

Сличения показали хорошую сходимость результатов измерений средней мощности (различие значений между ВНИИОФИ и NIST – в пределах 0,4 %) [3], что позволило в дальнейшем продолжить работу и произвести сравнение с результатами других НМИ. Результаты проведённого специалистами NIST сравнения по состоянию на 2007 г. представлены на рис. 1. Сравнение показывает хорошую (менее 0,3 % от значений NIST) сходимость результатов ВНИИОФИ и других НМИ.

Результаты дополнительных сличений эталонов единицы средней мощности по проекту APMP PR-S2. В 2006 г. во ВНИИОФИ для решения первоочередных задач метро-

Таблица 1

Результаты двусторонних сличений эталонов единицы средней мощности оптического излучения для ВОСП NIST и ВНИИОФИ

Длина волны источника, нм	Количество измерений	Соотношение результатов NIST/VNIIOFI	Среднее квадратическое отклонение, %	Расширенная неопределённость (NIST), %
1308	9	0,9958	0,10	±0,65
1543	5	0,9977	0,15	±0,65

логического обеспечения измерений в данной области был разработан и утверждён Государственный первичный специальный эталон единиц длины и времени распространения сигнала в световоде, средней мощности, ослабления и длины волны оптического излучения для волоконно-оптических систем передачи информации ГЭТ 170–2006 (далее усовершенствованный и утверждённый как ГЭТ 170–2011) [1].

В первую очередь были начаты сличения ГПСЭ по средней мощности оптического излучения для ВОСП как одной из наиболее значимых единиц величин. В 2009 г. ВНИИОФИ присоединился к дополнительным сличениям ГПСЭ по средней мощности (fiber optic power responsivity supplementary comparisons) в рамках Азиатско-Тихоокеанского регионального комитета APMP по проекту APMP PR-S2 (пилот KRISS, Республика Корея). В проекте принимали участие девять НМИ: NMISA (ЮАР), CMS/ITRI (Китайский Тайбэй), NMC-A*STAR, (Сингапур), NMIJ/AIST (Япония), NIMA (Австралия), NML-SIRIM (Малайзия), NIM, CMS/ITRI (Китай) и ВНИИОФИ (Россия). В качестве переносного эталона сравнения (артефакта) использовали артефакт KRISS по средней мощности, содержащий фотоприёмную головку и регистрирующий прибор.

Полученные ВНИИОФИ отклонения результатов измерений уровня мощности –10 дБм на длинах волн 1310 и 1550 нм от опорного значения не превысили 0,3 % [4]. Во время сличений прослеживаемость к ГЭТ 170–2006

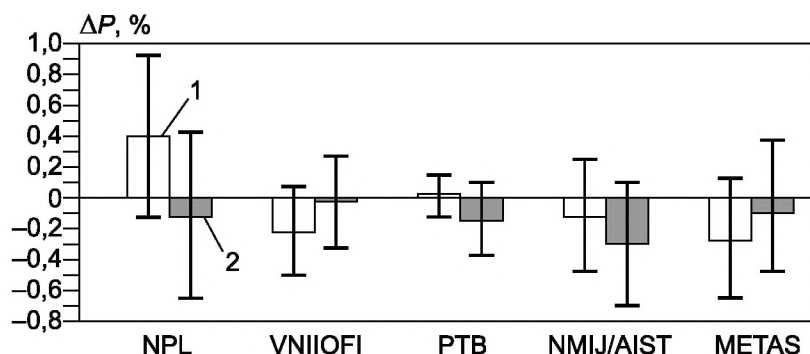


Рис. 1. Результаты сличений эталонов единицы средней мощности ΔP оптического излучения (отклонения относительно результатов NIST) с ведущими НМИ на длинах волн 1300 нм (1) и 1550 нм (2)

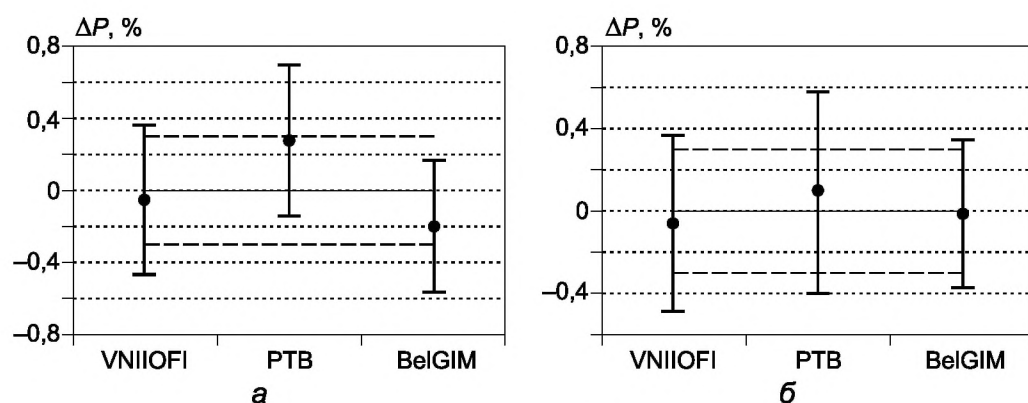


Рис. 2. Результаты сличений эталонов единицы средней мощности ΔP оптического излучения на длинах волн 1308,9 нм (а) и 1548,8 нм (б); пунктирные линии – границы суммарной неопределённости результатов сличений

осуществлялась путём передачи единицы средней мощности с помощью теплового приёмника, работающего в нормальных условиях и имеющего возможность проведения электрической калибровки.

Результаты дополнительных сличений эталонов по средней мощности по проекту COOMET PR-S6. Одновременно с 2012 г. по проекту COOMET PR-S6 проводили дополнительные сличения в области измерений средней мощности для ВОСП (ГЭТ 170–2011). В проекте участвовали БелГИМ (Беларусь), РТВ (Германия) и ВНИИОФИ (Россия). Пилотом проекта являлся ВНИИОФИ. Сличения проводили по схеме «звезда» – пилот – участник 1 – пилот – участник 2 – пилот.

В качестве артефакта использовали фотоприёмное устройство разработки ВНИИОФИ на основе шарового фотометра и прецизионного регистратора. Артефакт – измеритель мощности, включающий регистрирующее устройство и оптическую головку, предназначенную для приёма оптического излучения с торца волоконно-оптического разъёма типа FC. В качестве регистрирующего устройства применяли пикоамперметр Keithley 2502, позволяющий измерять и отображать на жидкокристаллическом дисплее соответствующее значение фототока. Оптическая головка представляла собой интегрирующую сферу с InGaAs-фотодиодом. Сфера была размещена в металлическом цилиндрическом корпусе, находящемся на съёмном основании. Выбор интегрирующей сферы в качестве артефакта обусловлен необходимостью устранения влияния поляризации излучения и многократных отражений. Термостатирование фотодиода обеспечивал блок управления, расположенный на корпусе сферы. В комплект артефакта были включены волоконно-оптические соединители и электрические кабели.

Сличения эталонов проводили для значений мощности оптического излучения 0,5 мВт на длинах волн 1308,9 и 1548,8 нм. Прослеживаемость к ГЭТ 170–2011 обеспечивали методом передачи единицы средней мощности непосредственно от калориметрического приёмника из

состава этого эталона.

При исследованиях артефакта и составляющих неопределённости выявлены и учтены такие влияющие факторы, как спектральная зависимость, температурная стабильность, влияние оптического коннектора, стабильность и длина волны источника излучения.

В процессе сличений были обнаружены и учтены скачкообразные изменения в отклике артефакта после возвращения прибора к пилоту из РТВ и БелГИМ. Эти

изменения могли быть связаны с несовершенством характеристик прибора, например механической нестабильностью небольшого участка поверхности интегрирующей сферы; для двух длин волн они не коррелировались друг с другом, но были примерно одинаковые. Поскольку изменения были сравнимы с заявленными участниками значениями неопределённостей, была произведена оценка результатов при полученных отклонениях.

С учётом указанных особенностей в результате сличений была получена достаточно хорошая сходимость результатов измерений, отличия значений чувствительности, полученных тремя участниками (Reference Values), не превысили расширенной неопределённости результатов сличений ΔP , которая составила 0,28 и 0,3 % для длин волн 1308,9 и 1548,8 нм, соответственно [5]. Результаты сличений приведены на рис. 2.

Результаты международных сличений в области измерений средней мощности для ВОСП явились основанием для включения в таблицу СМС двух строк по калибровочным возможностям ВНИИОФИ по средней мощности оптического излучения для ВОСП.

Результаты предварительных двусторонних сличений эталонов с METAS по спектральному ослаблению и времени распространения оптического излучения. В число параметров, воспроизводимых и передаваемых с помощью ГЭТ 170–2006, входят ослабление и время распространения оптического излучения в оптическом волокне.

В 2010 г. с целью подтверждения достоверности результатов воспроизведения указанных единиц были проведены предварительные двусторонние сличения эталонов METAS (Швейцария) и ВНИИОФИ. Сличения проводили на артефактах ВНИИОФИ, представляющих подготовленные образцы оптического волокна типов G.655 (спектральное ослабление) и G.652, G.653 (время распространения излу-

чения) с определёнными на ГЭТ 170–2006 значениями времени распространения порядка 62 500 нс для длин волн 1309,7 и 1549,8 нм, спектрального ослабления в диапазонах 0,385–0,296 дБ/км и –0,203... 0,189 дБ/км для длин волн 1260–1360 нм и 1500–1575 нм, соответственно [6].

Результаты сличений приведены в табл. 2, 3.

В результате сличений эталонов отличия значений, полученных участниками, не превысили 0,0014 дБ/км для спектрального ослабления при расширенной неопределённости результатов сличений не более 0,071 дБ/км и 0,32 нс для времени распространения излучения при расширенной неопределённости результатов сличений не более 0,8 нс [6]. Полученные результаты подтвердили заявленные для ГЭТ 170–2006 характеристики и позволили при возможности перейти к официальным дополнительным сличениям.

В процессе взаимодействия с METAS в тот же период на базе артефакта ВНИИОФИ проводились предварительные двусторонние сличения ГПСЭ по хроматической дисперсии. В результате анализа результатов сличений была выявлена необходимость разработки усовершенствованного алгоритма обработки кривой хроматической дисперсии; данная работа была проведена после окончания сличений. Полученные результаты позволили перейти к официальным дополнительным сличениям, описываемым ниже.

Результаты дополнительных сличений эталонов по хроматической дисперсии по проекту EURAMET PR-S3. В связи с развитием высокоскоростных ВОСП в России особое значение стали приобретать такие параметры оптического волокна, как хроматическая дисперсия (ХД) и поляризационная модовая дисперсия (ПМД). В целях обеспечения единства измерений данных параметров в 2010 г. были утверждены разработанные и изготовленные во ВНИИОФИ Государственные первичные специальные эталоны единицы хроматической дисперсии в оптическом волокне ГЭТ 184–2010 и единицы поляризационной модовой дисперсии в оптическом волокне ГЭТ 185–2010 [7, 8]. Для подтверждения их характеристик были начаты работы по международным дополнительным сличениям эталонов, имеющим официальный статус.

На основе результатов пред-

Таблица 2

Результаты сличений эталонов по спектральному ослаблению для оптического волокна типа G.655

Длина волны, нм	Ослабление, дБ/км	Отличие результатов сличений, дБ/км	Расширенная неопределённость результатов сличений, дБ/км ($k = 2$)
1260–1360	0,385–0,296	0,00065–0,0014	0,0066–0,0067
1500–1575	0,203–0,189	0,00095–0,00175	0,0071

Таблица 3

Результаты сличений эталонов по времени распространения излучения для оптического волокна типов G.652, G.653

Тип волокна	Длина волны, нм	Время распространения, нс	Отклонение ΔT , нс	Неопределённость результатов сличений $U_{\Delta T}$, нс ($k = 2$)
G.652	1309,665	62685,17	0,28	0,80
G.652	1549,834	62712,36	0,32	0,80
G.653	1309,665	61342,21	0,25	0,80
G.653	1549,834	61315,36	0,04	0,80

варительных сличений были организованы и проведены дополнительные двусторонние сличения ГЭТ 184–2010 по проекту EURAMET PR-S3 (пилот – METAS) на основе артефакта ВНИИОФИ. Работы по проекту проводили с целью привязки полученных в ходе сличений результатов измерений хроматической дисперсии, длины волны нулевой дисперсии и наклона дисперсионной кривой к результатам проведённых ранее сличений среди семи участников, в том числе, NIST и METAS, в продолжение работ EURAMET.

В проекте участвовали METAS и ВНИИОФИ. Пилотом проекта являлся METAS. В качестве артефактов исполь-

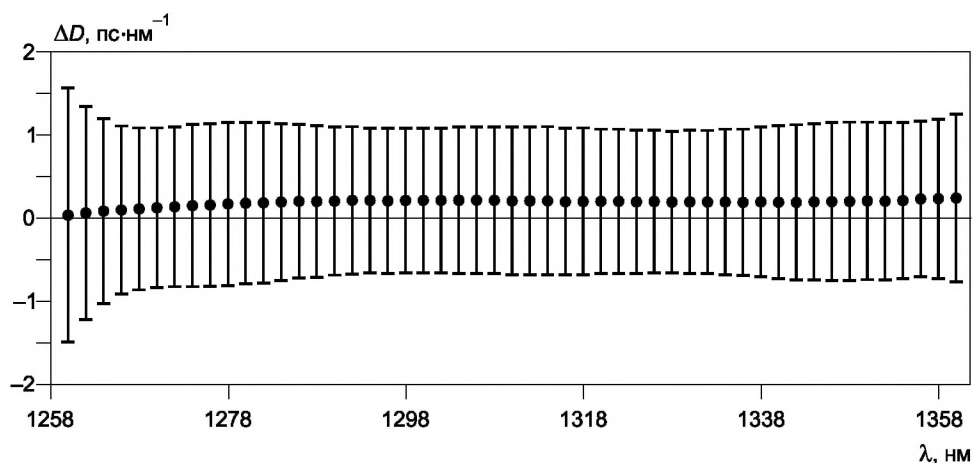


Рис. 3. Результаты сличений эталонов единицы хроматической дисперсии ΔD по проекту EURAMET PR-S3

Таблица 4

Результаты сличений эталонов единицы хроматической дисперсии по длине волны нулевой дисперсии и наклону дисперсионной кривой

Параметр	G.652		G.653	
	METAS	ВНИИОФИ	METAS	ВНИИОФИ
λ_0 , нм	1312,296±0,080	1312,31±0,15	1552,806±0,080	1552,58±0,20
S_0 , пс·нм ⁻²	1,107±0,005	1,106±0,008	0,873±0,007	0,877±0,009
$\Delta\lambda_0$, нм	0,01 ± 0,17		-0,23±0,22	
ΔS_0 , пс·нм ⁻²	-0,001±0,009		0,004±0,011	

зовали отобранные образцы оптического волокна типа G.652 и G.653 длиной 12,5 км, размещённые в пассивном термостате.

Сличения проводились по дисперсии $D = -61 \dots 231$ пс·нм⁻¹ для артефакта с оптическим волокном G.652 и $-281 \dots 18$ пс·нм⁻¹ для волокна G.653 в диапазонах длин волн 1260–1360 нм и 1510–1575 нм. Сличения включали также сравнительную оценку производных параметров – длины волны нулевой дисперсии и наклона дисперсионной характеристики.

При исследованиях артефакта и составляющих неопределённости при передаче единицы ХД выявлены и учтены следующие влияющие факторы: ПМД второго порядка; неопределённость измерений длины волны перестраиваемых лазеров, входящих в состав эталона и применяемых в процессе проведения измерений ХД; изменение температуры; неопределённость измерений групповой задержки с помощью фазового детектора; неопределённость, связанная с аппроксимацией групповой задержки методом наименьших квадратов.

Во ВНИИОФИ прослеживаемость результатов обеспечивалась привязкой к ГЭТ 184–2010, при этом единицу ХД передавали к образцам оптического волокна с использованием фазосдвигающего метода. График для артефакта G.653 по результатам описанных сличений с наибольшими значениями неопределённости результатов измерений представлен на рис. 3. В табл. 4 приведены результаты сличений ГПСЭ по длине волны нулевой дисперсии λ_0 и по наклону дисперсионной характеристики S_0 . Указаны полученные значения λ_0 , S_0 и их отличия $\Delta\lambda_0$, ΔS_0 , соответственно.

Анализ результатов показал, что полученные значения ХД лежат в пределах неопределённости результатов сличений (отклонение от опорного значения ΔD не более 0,2 пс·нм⁻¹ при расширенной неопределённости результатов сличений 1,5 пс·нм⁻¹) [9, 10]. При этом по длине волны нулевой дисперсии отклонение составило не более 0,23 нм при расширенной неопределённости результатов сличений 0,22 нм, по наклону дисперсионной кривой – не более 0,004 пс·нм⁻² при расширенной неопределённости результатов сличений 0,011 пс·нм⁻².

По результатам работы по этому виду измерений в таблицы СМС включены шесть позиций, закреплённых за ВНИИОФИ.

Продолжение работ по международным дополни-

тельным сличениям. В 2015 г. начаты работы по дополнительным сличениям с участием ВНИИОФИ в области измерений параметров ВОСП. В рамках проекта APMP PR-S8 (пилот – KRISS) начаты работы по сличениям эталонов по единице длины для оптического волокна (с использованием опыта описанных выше предварительных сличений по

времени распространения излучения в оптическом волокне). Работа направлена на обеспечение единства измерений в области оптической рефлектометрии. Сличения проводятся с участием NMC-A*STAR (Сингапур), NMIJ (Япония), NIM (Китай), LNE (Франция), NMISA (ЮАР), METAS (Швейцария), NIS (Египет) и CENAM (Мексика). В качестве артефакта предложено использовать набор образцов оптического волокна нескольких длин. Предполагаемое время завершения сличений – 2018 г.

В рамках проекта COOMET PR-S8 (пилот – ВНИИОФИ) начаты работы по сличениям по единице длины волны для ВОСП. Работа направлена на обеспечение единства измерений с помощью оптических анализаторов спектра, используемых для диагностики систем связи со спектральным уплотнением. Сличения проводятся с участием NMISA (ЮАР), NIM (Китай), INMETRO (Бразилия), PTB (Германия) и БелГИМ (Беларусь). В качестве артефакта предложено использовать устройство с газонаполненными кюветами, имеющими линии поглощения в спектральном диапазоне в окрестностях длины волны 1,55 мкм. Предполагаемое время завершения сличений – 2018 г.

В рамках проекта COOMET PR-S9 (пилот – ВНИИОФИ) начаты работы по сличениям ГПСЭ по единице ПМД для оптического волокна. Работа направлена на обеспечение единства измерений ПМД. Сличения проводятся с участием NMISA (ЮАР), INMETRO (Бразилия), KRISS (Республика Корея) и METAS (Швейцария). В качестве артефакта предложено использовать волоконно-оптические устройства, предназначенные для работы в режиме сильной и слабой связи мод. Предполагаемое время завершения сличений – 2018 г.

Заключение. Полученные результаты завершённых сличений подтвердили измерительные возможности Российской Федерации в части единиц средней мощности оптического излучения в ВОСП и ХД оптического волокна, а также сопоставимость заявленных метрологических характеристик разработанных, изготовленных и эксплуатируемых во ВНИИОФИ ГПСЭ с метрологическими характеристиками первичных эталонов ведущих НМИ мира. Выполнение проводимых в настоящее время работ по международным сличениям в части единиц длины волны оптического излучения в ВОСП, длины и ПМД оптического волокна

должно отразить сопоставимость характеристик мировых первичных эталонов, включая первичные эталоны ВНИИОФИ.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Центр высокоточных измерительных технологий в области фотоники», созданного на базе ВНИИОФИ, и при поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения соглашения № 14.595.21.003. от 28.08.2017 г. (уникальный и идентификатор RFMEF159517X0003).

Л и т е р а т у р а

1. Глазов А. И., Григорьев В. В., Иванов В. С., Кравцов В. Е., Митюрёв А. К., Тихомиров С. В., Крутиков В. Н. Эталонная база ВНИИОФИ в области волоконно-оптических систем передачи информации // Фотон-экспресс. 2015. № 8 (128). С. 18–25.
2. Glazov A., Grigoriev V., Kravtsov V., Svetlichny A., Tikhomirov S. Standards intercomparisons in the field of fibre optics with VNIIOFI participation // Measurement in Research and Industry: XXI IMEKO World Congress. Czech Republic, Prague, 2015.
3. Tikhomirov S. V., Glasov A. I., Kozatchenko M. L., Kravtsov V. E., Svetlichny A. B., Vayshenker I., Scott T. R., Franzen D. I. Comparison of reference standards for measurements of optical-fibre power // Metrologia. 2000. No. 37. P. 347–348.
4. Kim S. K., Lee D. H., Park S.N. On APMP supplementary comparison on fiber optic power responsivity // Me-

trologia. 2015. No. 52. Tech. Suppl. 02002.

5. Svetlichny A., Kravtsov V., Kueck S., Hofer A., Galygo H. Final Report on COOMET Supplementary Comparison on Fiber Optic Power Responsivity COOMET.PR-S6.2012, 2014 // Metrologia. 2014. No. 51. Tech. Suppl. 02003.

6. Report for intercomparison results between METAS and VNIIOFI. 23–27 August 2010, METAS, Bern, Switzerland, 2010.

7. Григорьев В. В., Кравцов В. Е., Митюрёв А. К., Пнев А. Б., Тихомиров С. В. Государственный первичный специальный эталон единицы поляризационной модовой дисперсии в оптическом волокне // Измерительная техника. 2012. № 2. С. 3–6.

8. Григорьев В. В., Кравцов В. Е., Митюрёв А. К., Пнев А. Б., Тихомиров С. В. Государственный первичный специальный эталон единицы хроматической дисперсии в оптическом волокне // Измерительная техника. 2012. № 1. С. 3–6.

9. Morel J., Kravtsov V., Grigoriev V. Final report on EURAMET.PR S3: Bilateral intercomparison of measurements of chromatic dispersion reference fibres between METAS and VNIIOFI // Metrologia. 2013. No. 50. Tech. Suppl. 02001.

10. Григорьев В. В., Кравцов В. Е., Митюрёв А. К., Тихомиров С. В. Итоги двусторонних сличений эталонной аппаратуры для измерений хроматической дисперсии в оптическом волокне // Фотон-экспресс. 2013. № 6 (110). С. 291–292.

Дата принятия: 03.05.2017.