

Государственный первичный эталон единиц величин абсолютной и относительной спектральных чувствительностей в диапазоне длин волн от 0,25 до 14,00 мкм ГЭТ 213—2014

В. Р. ГАВРИЛОВ, А. Ю. ДУНАЕВ, Б. Е. ЛИСЯНСКИЙ, С. П. МОРОЗОВА,
Д. А. ОТРЯСКИН, В. И. САПРИЦКИЙ, Б. Б. ХЛЕВНОЙ

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

Представлены характеристики криогенного радиометра и монохроматического источника излучения, входящих в состав Государственного первичного эталона единиц величин абсолютной и относительной спектральных чувствительностей в диапазоне длин волн от 0,25 до 14,00 мкм ГЭТ 213—2014 и предназначенных для калибровки приемников излучения по спектральной чувствительности к потоку излучения.

Ключевые слова: радиометрия, приемники излучения, спектральная чувствительность, абсолютный криогенный радиометр.

Characteristics of the cryogenic radiometer and a monochromatic radiation source, comprising the State primary standard of units of absolute and relative spectral sensitivities in the wavelength range from 0,25 microns to 14,00 GET 213—2014 and intending for the calibration of radiation detectors in the spectral sensitivity to the radiation flux are presented.

Key words: radiometry, photodetector, spectral responsivity, absolute cryogenic radiometer.

Государственный первичный эталон единиц величин абсолютной и относительной спектральных чувствительностей в диапазоне длин волн от 0,25 до 14,00 мкм ГЭТ 213—2014 предназначен для метрологического обеспечения радиометрических калибровок фотоприемников широкого применения в ближнем ультрафиолетовом (УФ), видимом и ближнем инфракрасном (ИК) диапазонах спектра. Калибровка аппаратуры по спектральной чувствительности к потоку излучения или освещенности востребована во многих областях науки, техники и технологии. Спектральная чувствительность — основа большинства видов фотометрических и радиометрических измерений [1, 2].

Эталон включает две прецизионные установки для воспроизведения и передачи единиц величин абсолютной и относительной спектральных чувствительностей: ГПЭ-1 — к потоку излучения в диапазоне длин волн 0,25—14,00 мкм и ГПЭ-2 — к освещенности в диапазоне длин волн 0,35—2,5 мкм.

Функциональная схема ГПЭ-1 представлена на рис. 1. Основными элементами установки являются: блок источников излучения с фороптикой, фокусирующей излучение на вход монохроматора; двойной монохроматор; блок асферической оптики в термостатированном корпусе, фокусирующей излучение с выходной щели монохроматора на вход криогенного радиометра и калибруемых приемников излучения; абсолютный криогенный радиометр L-1 Standards and Technology, Inc. (США) с двумя вакуумными камерами — для калибруемых приемников излучения и общей.

В качестве источников излучения в ГПЭ-1 используют осветитель на основе галогенной лампы, работающий в диа-

пазоне длин волн 0,25—2,50 мкм, и модель черного тела (МЧТ) при температуре 3400 К, у которой диапазон длин волн 2,50—14,00 мкм. В осветителе расположены также спектральная лампа для калибровки монохроматора модели 2035D фирмы «McPherson» по длинам волн и лазер, используемый при настройке и юстировке элементов оптической схемы. Излучение от источника направляется с помощью зеркал на входную щель двойного монохроматора, перед которым расположены узел управляемой компьютером заслонки и колеса с фильтрами.

Технические характеристики монохроматора McPherson 2035D

Спектральный диапазон	0,25—14,00 мкм
Конфигурация	Черни-Тернер
Число решеток	2×1
Фокусное расстояние	350 мм
Относительное отверстие	f/4,8
Разрешение (для решетки 1200 мм ⁻¹)	0,05 нм
Дисперсия (для решетки 1200 мм ⁻¹)	2 нм/мм
Погрешность установки длины волны для диапазона	
видимого	± 0,07 нм
ИК	± 0,25 нм
Воспроизводимость установки длины волны для диапазона	
видимого	± 0,005 нм
ИК	± 0,020 нм

После выходной щели монохроматора установлены узел сменных выходных апертур и модулятор. Излучение из выходной апертуры монохроматора с помощью оптической системы, состоящей из двух внеосевых параболических зер-

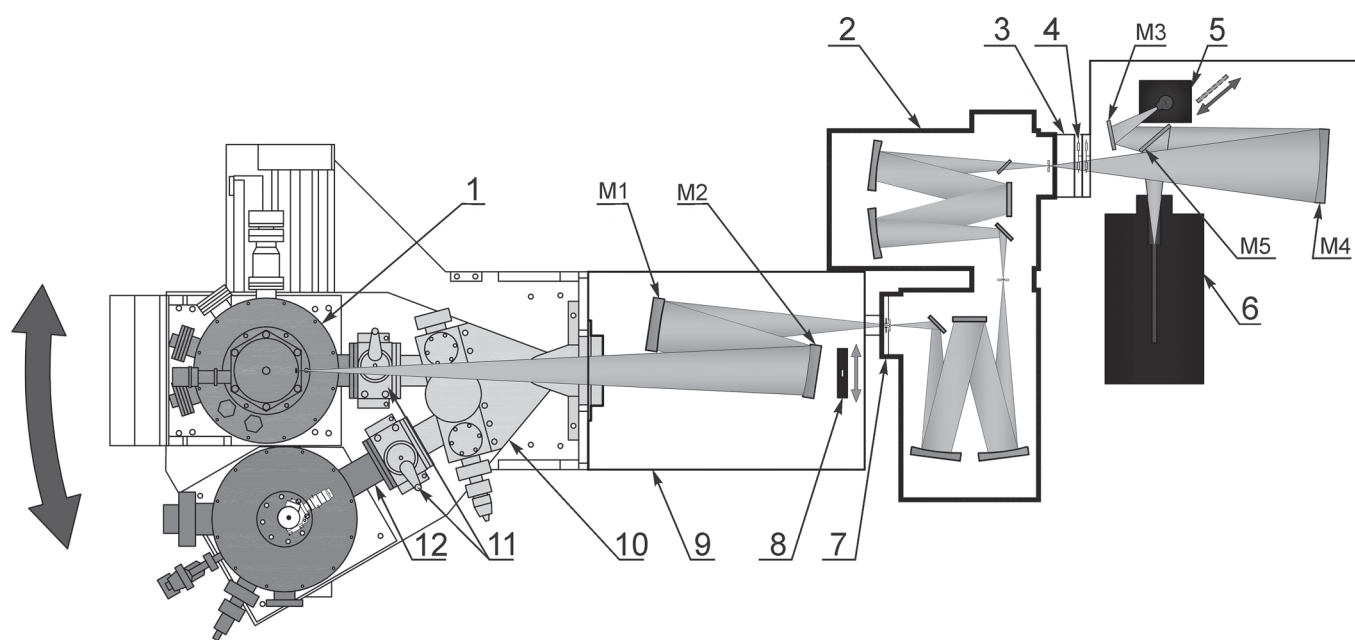


Рис. 1. Функциональная схема установки ГПЭ-1:

1 — криогенный радиометр; 2 — двойной монохроматор; 3 — заслонка; 4 — блок фильтров; 5 — галогенная лампа; 6 — модель черного тела МЧТ 3400 К; 7 — узел сменных апертур; 8 — модулятор; 9 — блок фокусирующей оптики в термостатированном корпусе; 10 — общая вакуумная камера; 11 — вакуумные затворы; 12 — вакуумная камера приемников излучения; M1, M2 — внеосевые параболические зеркала; M3, M4, M5 — зеркала соответственно плоское для галогенной лампы; сферическое, плоское для МЧТ

кал, направляется на входное окно вакуумной камеры. Она оснащена двумя вакуумными затворами на входах криогенного радиометра и камеры приемников излучения. Спектральная полоса пропускания монохроматического источника для различных спектральных диапазонов представлена в табл. 1.

Таблица 1

Спектральная полоса пропускания монохроматического источника установки ГПЭ-1

Спектральный диапазон, мкм	Спектральная полоса, нм
0,25—2,49	5
2,50—5,09	10
5,10—10,39	20
10,40—14,00	40

Основой ГПЭ-1 является абсолютный криогенный радиометр.

Технические характеристики радиометра

Коэффициент поглощения приемной полости
на длине волны 632,8 нм 0,9999
Спектральный диапазон 0,2—25,0 мкм
Угловое поле зрения 7°
Диаметр апертуры 7 мм
Постоянная времени теплового отклика
приемника не более 10 с
Чувствительность приемника не менее 2 К/мВт
Динамический диапазон 1—500 мкВт
Уровень шума при времени
интегрирования 30 с не более 5 нВт

Криогенный радиометр — полостной неселективный приемник с электрическим замещением. Радиометр имеет конструкцию, включающую системы вакуумирования внутреннего объема криостата, охлаждения и стабилизации температуры приемной полости и теплостока, а также измерения и обработки информации. Внутренний объем криостата радиометра вакуумирован до $1 \cdot 10^{-5}$ Па с помощью системы на основе турбомолекулярного и пластинчато-роторного насосов фирмы «Leuybold» (Германия). Для измерения давления от атмосферного до $1 \cdot 10^{-6}$ Па на входе этой системы использован универсальный датчик. Охлаждение приемной полости радиометра до температуры 3 К обеспечивается механической системой, подключенной к гелиевому компрессору.

Система радиометра содержит вакуумную камеру, в которую можно установить до пяти приемников излучения. Радиометр и камера подсоединены гибким Y-образным сильфоном к общей камере с оптическим окном, что исключает необходимость измерений коэффициента пропускания входного окна. Вакуумные объемы криостата криогенного радиометра и камеры калибруемых приемников излучения могут быть отделены от общей камеры с помощью вакуумных затворов. Подвижная платформа, на которой установлен криостат радиометра и вакуумная камера калибруемых приемников излучения, в соответствии с программой измерений устанавливается под излучение радиометра или калибруемый приемник излучения. Поток излучения, мощность которого измеряется радиометром, падает на калибруемый приемник излучения.

Принцип работы радиометра основан на замещении оптической мощности, поглощенной приемной полостью, электрической мощностью. Сравнение этих мощностей проводится при нагреве приемной полости до одной и той же температуры в оптической фазе и фазе электрического замещения.

В оптической фазе для температуры приемной полости T_o справедлива формула

$$T_o = S(P_{э.о} + P_o(\lambda) + P_{\phi}),$$

где S — коэффициент преобразования приемной полости; $P_{э.о}$ — электрическая мощность, подаваемая на обмотку замещения приемной полости в оптической фазе; $P_o(\lambda)$, P_{ϕ} — мощности соответственно измеряемого оптического потока и фонового излучения.

В фазе электрического замещения температуру приемной полости представим в виде

$$T_3 = S(P_{э.з} + P_{\phi}),$$

где $P_{э.з}$ — электрическая мощность, подаваемая на обмотку замещения приемной полости в электрической фазе. Из условия равенства температур $T_o = T_3$ искомая оптическая мощность $P_o(\lambda) = P_{э.з} - P_{э.о}$.

Воспроизведение единицы абсолютной спектральной чувствительности к потоку излучения в спектральном диапазоне 0,25—14,00 мкм состоит в измерении мощности излучения, поглощенного приемной полостью радиометра, с последующим облучением этим потоком фотоприемника, измерением его сигнала и расчетом его спектральной чувствительности по формулам

$$S_I(\lambda) = I(\lambda)/P_o(\lambda); \quad S_U(\lambda) = U(\lambda)/P_o(\lambda),$$

где $S_I(\lambda)$, $S_U(\lambda)$ — спектральные чувствительности приемника излучения, калибруемые соответственно по току и напряжению; $I(\lambda)$, $U(\lambda)$ — ток и напряжение калибруемого приемника излучения.

Метрологические характеристики установки ГПЭ-1 приведены в табл. 2, где S_0 — относительное среднее квадратическое отклонение среднего арифметического результатов измерений; $\Theta_{0,99}$ — граница относительной неисключенной

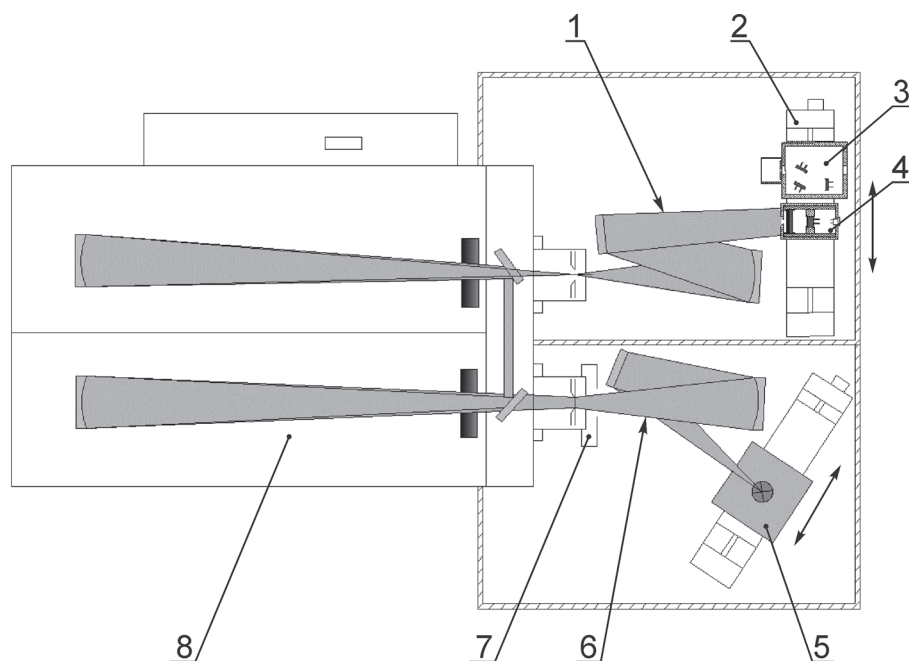


Рис. 2. Функциональная схема установки ГПЭ-2:

1 — блок фокусировки излучения; 2 — блок приемников; 3 — трэп-детектор; 4 — фильтровый радиометр; 5 — блок осветителей; 6 — блок фокусировки излучения; 7 — заслонка (фильтровое колесо); 8 — монохроматор

систематической погрешности результата измерения при доверительной вероятности 0,99; u_A , u_B — относительные стандартные неопределенности, оцениваемые по типу A и B; u_c — относительная суммарная стандартная неопределенность; $U_{0,99}$ — относительная расширенная неопределенность для уровня доверия 0,99 ($k = 2,576$).

На установке ГПЭ-1 были проведены сличения шкалы спектральной чувствительности трэп-детекторов ВНИИОФИ и РТВ (Германия) при использовании лазерного излучения на длине волны 0,633 мкм в качестве источника. В результате шкалы спектральной чувствительности совпали в пределах 0,01 %.

Функциональная схема установки ГПЭ-2 представлена на рис. 2. Установка предназначена для измерений спектральной чувствительности к освещенности эталонных приемников (фотодиодов, фотометров, фильтровых радиометров) путем их сличения с трэп-детекторами с помощью спектрального компаратора на основе двойного монохроматора в спектральном диапазоне 0,35—2,50 мкм. Установка состоит из трех основных частей: блоков осветителей и приемников излучения, монохроматора.

Блок осветителей содержит три лампы, расположенные на подвижной платформе, и оптические элементы (плоское и сферическое зеркала), позволяющие фокусировать источник света на входную щель монохроматора. Для основной видимой области в спектральном диапазоне 0,35—1,00 мкм используется вольфрамовая галогенная лампа OSRAM типа HLX с высокостабильным источником постоянного тока PS120-PU. Для УФ-области спектра применяется источник света на базе ксеноновой лампы OSRAM XBO 150W, позволяющий получать больше света, чем от галогенной лампы. Для прецизионной калибровки монохроматора по длине волны используется ртутно-гелиевая спектральная лампа ДРГС-12, излучающая линейчатый спектр.

Таблица 2

Метрологические характеристики установок ГПЭ-1, ГПЭ-2

Характеристика	ГПЭ-1	ГПЭ-2
Спектральный диапазон	0,25—14,00 мкм	0,35—1,00
Динамический диапазон	$1 \cdot 10^{-6}$ — 10 А/Вт; 1 — $1 \cdot 10^{16}$ В/Вт; 0,01—1,00 отн. ед.	$4 \cdot 10^{-16}$ — $4 \cdot 10^{-6}$ А·м ² /Вт; 0,01—1,00 отн. ед.
S_0	$8,2 \cdot 10^{-4}$ — $1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,01 \cdot 10^{-3}$
$\Theta_{0,99}$	$7,7 \cdot 10^{-4}$ — $4,5 \cdot 10^{-2}$	$1,16 \cdot 10^{-3}$
u_A	$8,2 \cdot 10^{-4}$ — $1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,01 \cdot 10^{-3}$
u_B	$3,2 \cdot 10^{-4}$ — $1,9 \cdot 10^{-2}$	$4,76 \cdot 10^{-4}$
u_c	$8,8 \cdot 10^{-4}$ — $1,9 \cdot 10^{-2}$	$1,12 \cdot 10^{-3}$
$U_{0,99}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$ — $4,9 \cdot 10^{-2}$	$2,88 \cdot 10^{-3}$

В ГПЭ-2 использован двойной дифракционный монохроматор U-1000 французской фирмы «Jobin-Yvon», имеющий крайне низкий уровень рассеянного света (10^{-14}) и высокую воспроизводимость заданной длины волны (не более 0,01 нм).

Блок приемников включает фильтровые радиометры и трэп-детектор, которые монтируют в специально разработанных водоохлаждаемых радиаторах. Радиаторы устанавливают на юстировочные столики, обеспечивающие тонкую установку по трем линейным и угловым координатам. Все приемники располагают на подвижной платформе, что позволяет автоматически подводить каждый приемник под пучок излучения, выходящий из щели монохроматора.

Метрологические характеристики ГПЭ-2 при воспроизведении единицы величины спектральной чувствительности к освещенности излучения в спектральном диапазоне 0,35 — 1,00 мкм приведены в табл. 2.

Работа выполнена на уникальной установке для прецизионных измерений радиометрических и спектрометрических характеристик источников и приемников излучения в спектральном диапазоне 1 нм — 20 мкм при поддержке Минобрнауки России (соглашение № 14.592.21.0001 от 22.08.2014 г., уникальный идентификатор работ RFMEFI59214X0001).

Л и т е р а т у р а

1. Eppeldauer G. P. Spectral responsivity-based calibration of photometer and colorimeter standards // J. Modern Opt. 2013. V. 60. N. 14. P. 1124—1135.

2. Theocharous E. The establishment of the NPL infrared relative spectral responsivity scale using cavity pyroelectric detectors // Metrologia. 2006. V. 43. N. 2. P. S115—S119.

Дата принятия 03.09.2015 г.

531.76.081

Метрологическое обеспечение измерений частоты излучения в информационных системах оптического диапазона

Ю. М. ЗОЛОТАРЕВСКИЙ, И. С. КОРОЛЕВ, В. Н. КРУТИКОВ,
С. В. ТИХОМИРОВ, Н. П. ХАТЫРЕВ, А. А. ЩЕРБИНА

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

Проанализировано состояние метрологического обеспечения средств измерений частоты оптического излучения, способы снижения неопределенности воспроизведения и передачи единицы частоты оптического диапазона в волоконно-оптических системах передачи информации. Проведены экспериментальные исследования методов метрологического обеспечения средств измерений частоты оптического излучения.

Ключевые слова: волоконно-оптические системы, спектральное уплотнение.

The ways of metrological assurance development for optical frequency measuring instruments, the methods of uncertainty reduction for realization and transfer of optical range frequency unit in optical fiber information transfer systems have been analyzed. Experimental researches of optical frequency measuring instruments methods were implemented.

Key words: fiber-optics systems, frequency, spectral multiplexing.

В качестве одного из способов увеличения пропускной способности волоконно-оптических систем передачи информации (ВОСПИ), изначально рассматривали импульсно-кодировую модуляцию. Таким образом скорость передачи удалось повысить до 40 Гбит/с на одной несущей частоте. Параллельно развивалась технология спектрального уплотнения Wavelength Division Multiplexing (WDM) — передачи сигналов по одному и тому же оптическому волокну на нескольких несущих частотах. Системы WDM подразделяются по ширине частотного интервала между каналами: с грубым (CWDM) и плотным (DWDM) мультиплексированием. Число информационных потоков в волокне на различных несущих частотах нередко достигает нескольких десятков.

Случайные изменения свойств волокна, характеристик оптического сигнала, несущего информацию, и его приемников могут приводить к появлению ошибок, когда приемная аппаратура при поступлении сигнала, соответствующего логической единице, интерпретирует его как логический ноль или наоборот. Существуют эффективные способы коррекции ошибок, но при большом количестве последних заметно снижается скорость передачи. В ВОСПИ среди различных факторов, приводящих к ошибкам, необходимо, прежде всего, обратить внимание на спектрально-временные характеристики оптических сигналов.

В 1998 и 2002 гг. Международный союз электросвязи (МСЭ, ITU) выпустил рекомендации, устанавливающие тре-