

Государственный рабочий эталон 1-го разряда единиц длины волны в диапазоне от 1,25 до 20,00 мкм и волнового числа в диапазоне от 500 до 8000 см⁻¹

А. Ю. Дунаев, В. С. Бормашов, С. П. Морозова, В. Р. Гаврилов

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Российская Федерация, e-mail: dunaev@vniiofi.ru, bormashov@vniiofi.ru, morozova-m4@vniiofi.ru, gavrilov@vniiofi.ru

Представлен Государственный рабочий эталон 1-го разряда единиц длины волны в диапазоне от 1,25 до 20,00 мкм и волнового числа в диапазоне от 500 до 8000 см⁻¹, разработанный во ВНИИОФИ на основе инфракрасного фурье-спектрометра. Единицы длины волны и волнового числа рабочему эталону передаются при измерении с помощью инфракрасного фурье-спектрометра положений пиков излучения от двух лазерных источников, входящих в состав Государственного первичного специального эталона единиц длины и времени распространения сигнала в световоде, средней мощности, ослабления и длины волны для волоконно-оптических систем связи и передачи информации ГЭТ 170-2011. Рабочий эталон воспроизводит спектральную шкалу с использованием интерферограммы от встроенного He–Ne-лазера в процессе измерений спектрального распределения интенсивности внутреннего источника. Распространение шкалы длин волн 1,25–20,00 мкм и шкалы волнового числа 500–8000 см⁻¹ достигается введением соответствующих поправочных множителей к результатам измерений. Разработана и представлена поверочная схема, устанавливающая прослеживаемость средств измерений длины волны и волнового числа к ГЭТ 170-2011.

Ключевые слова: длина волны, волновое число, рабочий эталон 1-го разряда, инфракрасный фурье-спектрометр.

Введение. Инфракрасная спектроскопия широко применяется как один из наиболее эффективных и универсальных методов для количественного и качественного анализов состава веществ. Особый интерес представляют измерения спектральной излучательной способности покрытий и материалов в инфракрасной области электромагнитного спектра [1–3]. Определение спектральных характеристик оптических материалов (спектров отражения, пропускания, поглощения и др.) включает в себя измерения как по фотометрической шкале, так и по шкале длин волн. По сложившейся в настоящее время практике для аттестации шкалы длин волн в спектральной аппаратуре применяют спектральные лампы и стандартные образцы спектров поглощения.

Данная работа посвящена подходу к реализации шкалы длин волн с прослеживаемостью к Государственному первичному специальному эталону единиц длины и времени распространения сигнала в световоде, средней мощности, ослабления и длины волны для волоконно-оптических систем связи и передачи информации ГЭТ 170-2011. В рамках данного подхода во ВНИИОФИ на основе инфракрасного фурье-спектрометра PerkinElmer Spectrum GX Optica (далее – фурье-спектрометра) создан Государственный рабочий эталон 1-го разряда единиц длины волны в диапазоне от 1,25 до 20,00 мкм и волнового числа в диапазоне

от 500 до 8000 см⁻¹ (далее – РЭ), предназначенный для воспроизведения и передачи единиц длины волны и волнового числа рабочим средствам измерений.

Описание РЭ и обеспечение прослеживаемости к ГЭТ 170-2011. Основной элемент фурье-спектрометра – интерферометр Майкельсона [4, 5], в котором одно из зеркал движется с постоянной скоростью вдоль оптической оси прибора, изменяя оптическую разность хода Δx между интерферирующими лучами. При изменении разности хода лучей в результате интерференции изменяется интенсивность излучения $I(\Delta x)$, регистрируемая встроенным приёмником. При этом зависимость выходного электрического сигнала приёмника от Δx , называемая интерферограммой, является образом косинус-преобразования Фурье спектрального распределения излучения исследуемого внешнего источника в зависимости от волнового числа. При выполнении обратного косинус-преобразования Фурье полученного электрического сигнала приёмника восстанавливается измеряемый спектр излучения внешнего источника. Точность восстановления этого спектра по шкале длин волн или волновых чисел (спектральной шкале) зависит от точности измерения разности хода Δx .

Спектральное поглощение исследуемого образца определяется как отношение спектрального распределения,

Таблица 1

Технические характеристики лазеров из состава ГЭТ 170-2011

Параметр	Лазер 1	Лазер 2
Длина волны λ , мкм	1,3125912	1,54238371
Частота, ТГц	228,39743	194,36957
Волновое число k , см ⁻¹	7618,518	6483,471
Выходная мощность, мВт	8	2

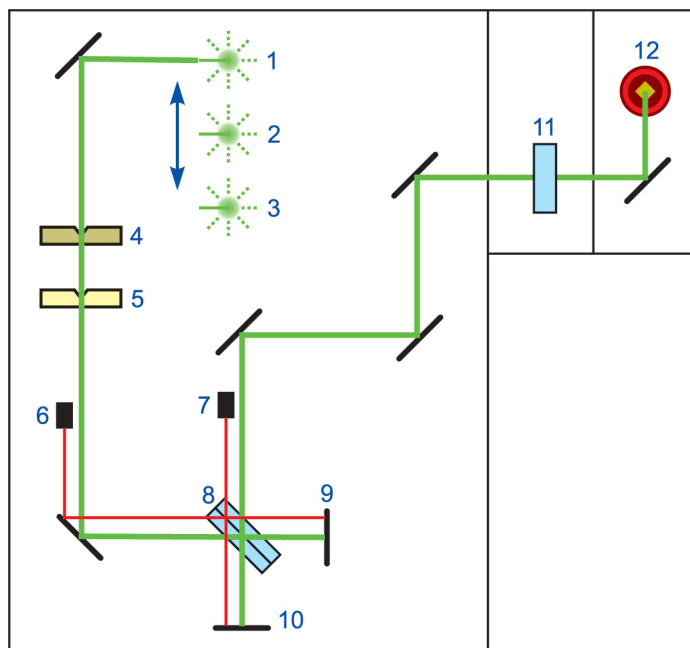


Рис. 1. Структурная схема установки на основе инфракрасного фурье-спектрометра при передаче единиц длины волны и волнового числа:

1 – источник излучения (глобар); 2, 3 – лазеры из состава ГЭТ 170-2011; 4, 5 – ирисовые апертурная диафрагма B-stop и полевая диафрагма J-stop соответственно; 6 – внутренний He–Ne-лазер; 7 – приёмник для He–Ne-лазера; 8 – светоделитель; 9, 10 – подвижное и неподвижное зеркала соответственно; 11 – мера длины волны и волнового числа; 12 – приёмник инфракрасного излучения

Fig. 1. Structural scheme of facility based on Fourier-Transform Spectrometer used for wavelength and wavenumber units dissemination 1 – radiant source (Glow bar); 2, 3 – GET 170-2011 lasers; 4, 5 – iris B-stop aperture and iris J-stop field aperture respectively; 6 – internal helium-neon laser; 7 – He-Ne laser detector; 8 – beamsplitter; 9, 10 – moving and fixed mirrors respectively; 11 – wavelength and wavenumber measure; 12 – infrared detector

полученного при размещении образца в кюветном отделении фурье-спектрометра, к спектральному распределению, полученному без образца.

Для воспроизведения спектральной шкалы требуется точное значение разности хода Δx интерферирующих лучей,

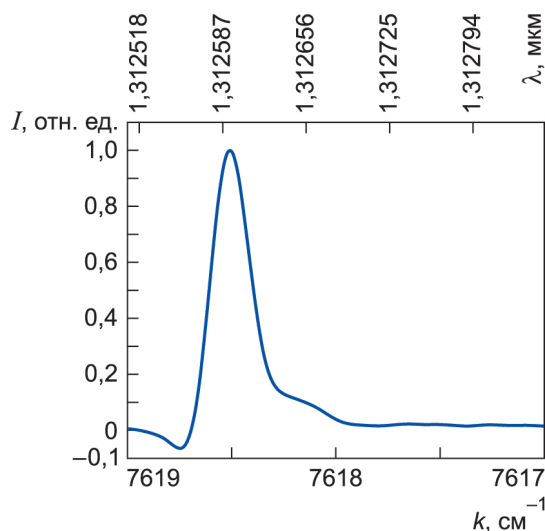


Рис. 2. Относительное спектральное распределение интенсивности I излучения лазера из состава ГЭТ 170-2011 с длиной волны 1,3125912 мкм, полученное в результате измерений с использованием инфракрасного фурье-спектрометра

Fig. 2. Relative spectral radiant intensity of laser from GET 170-2011 at wavelength of 1.3125912 μm obtained by Fourier-Transform Spectrometer

которое определяется с помощью референсного канала на основе He–Ne-лазера. Точность измерения разности хода Δx определяется точностью определения и стабильностью длины волны He–Ne-лазера референсного канала, а также постоянным во всём спектральном диапазоне фурье-спектрометра шагом дискретизации интерферограммы по волновому числу [6].

Процедура передачи единиц длины волны и волнового числа от ГЭТ 170-2011 РЭ включает в себя: измерение положения двух пиков излучения от лазерных источников из состава ГЭТ 170-2011 по шкале длин волн фурье-спектрометра; расчёт расширенной неопределённости результатов измерений положений этих пиков в единицах волнового числа и длины волны. Воспроизведение собственной спектральной шкалы РЭ достигается умножением показаний длины волны или волнового числа фурье-спектрометра на соответствующий поправочный коэффициент, который определяется методом наименьших квадратов по результатам измерений двух лазерных пиков и используется во всём рабочем спектральном диапазоне.

В качестве источников использовали два прецизионных частотно-стабилизированных полупроводниковых лазера производства Wavelength References (США) [7, 8] из состава ГЭТ 170-2011. Их технические характеристики приведены в табл. 1.

В состав фурье-спектрометра входят две ирисовые программно управляемые диафрагмы переменного диаметра – апертурная B-stop и полевая J-stop. В процессе передачи размер полевой диафрагмы J-stop выбирается так,

Таблица 2

Результаты измерений длины волны и волнового числа лазерных пиков

Параметр	Лазер 1		Лазер 2	
	k , см ⁻¹	λ , мкм	k , см ⁻¹	λ , мкм
Эталонное значение k_3/λ_3	7618,5182	1,3125912	6483,471	1,5423837
Среднее измеренное значение	7618,5190	1,3125911	6483,467	1,5423846
Полуширина	0,24	$4,3 \cdot 10^{-7}$	0,24	$5,4 \cdot 10^{-7}$
u_A, u_B	0,06	$1,0 \cdot 10^{-6}$	0,006	$1,4 \cdot 10^{-6}$
u_c	0,008	$1,4 \cdot 10^{-6}$	0,008	$1,9 \cdot 10^{-6}$

чтобы достичь наилучшего разрешения прибора, а диафрагма В-stop выбирается равной диафрагме J-stop. Таким образом, лучи лазера внутри фурье-спектрометра занимают параксиальную область. Кроме того, в кюветное отделение после интерферометра устанавливали круглую диафрагму диаметром 5 мм, предназначенную для сокращения переотражений в оптической системе. Значительный вклад переотражений обусловлен высокой пространственной когерентностью лазерного излучения.

В процессе передачи единиц длины волны и волнового числа от ГЭТ 170-2011 к РЭ лазеры из состава ГЭТ 170-2011 последовательно устанавливали на место внутреннего инфракрасного источника излучения – глобара. При измерениях спектрального поглощения использовали только внутренний инфракрасный источник излучения, при этом исследуемую меру устанавливали в кюветное отделение фурье-спектрометра (рис. 1).

Обработка массива данных измеренной интерферограммы при регистрации излучения каждого из лазеров проводилась с помощью программного обеспечения фурье-спектрометра путём обратного дискретного косинус-преобразования Фурье при сильной аподизации, максимально высоком спектральном разрешении 0,2 см⁻¹ и с минимально возможным шагом дискретизации 0,01 см⁻¹. Результирующее относительное спектральное распределение интенсивности излучения лазера с длиной волны 1,3125912 мкм представлено на рис. 2.

Результаты измерений при передаче единиц длины волны и волнового числа от ГЭТ 170-2011 к РЭ. В результате многократных измерений относительного спектрального распределения интенсивности излучения для каждого из лазерных пиков были найдены средние арифметические значения длины волны $\bar{\lambda}$ и волнового числа $\bar{k}$ в максимуме, стандартные неопределённости, оценённые по типам А и В u_A и u_B , а также суммарная стандартная неопределённость u_c в соответствии с ГОСТ Р 54500.3-2011/Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008 «Неопределённость измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределённости измерения». Эта составляющая учитывает случайные эффекты, в том числе нестабильность частоты He–Ne-лазера.

Соответствующее среднее значение длины волны для каждого пика излучения лазеров рассчитывали по формуле

$$\bar{\lambda}_i = 10^4 / \bar{k}_i. \quad (1)$$

Множитель 10⁴ в формуле (1) и последующих формулах возникает в результате того, что длина волны измеряется в микрометрах, а волновое число в обратных сантиметрах.

Проведённая оценка неопределённости результата измерений при передаче единиц длины волны и волнового

числа учитывает также систематические эффекты, оценённые по типу В. Составляющая $u_{B1}(k_i)$ учитывает точность воспроизведения длины волны каждого из эталонных лазеров из состава ГЭТ 170-2011 и выражена формулой

$$u_{B1}(k_i) = \bar{k}_i^2 u_c(\lambda) / 10^4,$$

где $u_c(\lambda) = 4,84 \cdot 10^{-8}$ мкм – суммарная стандартная неопределённость при воспроизведении единицы длины волны ГЭТ 170-2011 для обоих лазеров.

Составляющая $u_{B2}(k_i)$ обусловлена шагом дискретизации шкалы волновых чисел фурье-спектрометра и определена как

$$u_{B2}(k_i) = \delta(k_i) / \sqrt{3},$$

где $\delta(k) = 0,01 \text{ см}^{-1}$ – шаг дискретизации шкалы волновых чисел.

Соответствующие составляющие неопределённости измерений, выраженные в терминах длин волн, определяются из приведённых выше умножением на $(\bar{\lambda}_i)^2 / 10^4$.

Результаты измерений длины волны и волнового числа используемых лазеров из состава ГЭТ 170-2011 с соответствующими неопределённостями приведены в табл. 2.

Неопределённости при воспроизведении единиц длины волны и волнового числа РЭ. Реализация шкал длины волны и волнового числа РЭ осуществляется по результатам измерений разности хода интерферометра с использованием встроенного лазера в процессе измерений спектра внешнего источника. Распространение шкалы длин в диапазоне 1,25–20,00 мкм и волнового числа 500–8000 см⁻¹ достигается введением поправочных коэффициентов соответственно Π_λ , Π_k . Для нахождения воспроизводимой длины волны или волнового числа показания фурье-спектрометра необходимо умножить на соответствующий поправочный коэффициент, т. е.

$$\lambda \rightarrow \Pi_\lambda \lambda; \quad k \rightarrow \Pi_k k.$$

Для определения поправочного коэффициента Π_λ использовали метод наименьших квадратов по результатам

измерений длин волн пиков излучений первого и второго лазеров $\bar{\lambda}_1, \bar{\lambda}_2$, а также их эталонных значений $\lambda_{э1}, \lambda_{э2}$, (см. табл. 2). Минимизация суммы квадратов отклонений

$$S = (\Pi_{\lambda} \bar{\lambda}_1 - \lambda_{э1})^2 + (\Pi_{\lambda} \bar{\lambda}_2 - \lambda_{э2})^2$$

приводит к следующей формуле для поправочного коэффициента:

Суммарная стандартная неопределённость поправочного коэффициента длины волны определяется выражением

$$u_c(\Pi_{\lambda}) = \frac{1}{\bar{\lambda}_1^2 + \bar{\lambda}_2^2} \left\{ [(\lambda_{э1} - 2\Pi_{\lambda} \bar{\lambda}_1) u_c(\lambda_1)]^2 + [(\lambda_{э2} - 2\Pi_{\lambda} \bar{\lambda}_2) u_c(\lambda_2)]^2 \right\}^{1/2}$$

Поправочный коэффициент к результату измерений волнового числа рассчитывается по формуле

$$\Pi_k = \Pi_{\lambda}^{-1}$$

Суммарная стандартная неопределённость поправочного коэффициента к результату измерений волнового числа определяется как

$$u_c(\Pi_k) = u_c(\Pi_{\lambda}) / (\Pi_{\lambda})^2$$

Если нижняя и верхняя границы воспроизведения значения длины волны рабочего эталона соответствуют $\lambda_{\min} = 1,25\Pi_{\lambda}$, $\lambda_{\max} = 20,00\Pi_{\lambda}$, то нижняя и верхняя границы воспроизведения действительного значения волнового числа РЭ составляют $k_{\min} = 500\Pi_k$, $k_{\max} = 8000\Pi_k$.

Суммарная стандартная неопределённость воспроизведения значения волнового числа для любой точки воспроизводимого диапазона определяется выражением

$$u_c(k) = \left[(\Pi_k \delta(k) / \sqrt{3})^2 + (k u_c(\Pi_k))^2 \right]^{1/2}$$

где $\delta(k) = 0,2 \text{ см}^{-1}$ – предел спектрального разрешения фурье-спектрометра.

Суммарные стандартные неопределённости воспроизведения значения длины волны для любой точки воспроизводимого диапазона рассчитываются по формуле

$$u_c(\lambda) = \left[(\Pi_{\lambda} \delta(\lambda) / \sqrt{3})^2 + (\lambda u_c(\Pi_{\lambda}))^2 \right]^{1/2}$$

где $\delta(\lambda)$ – предел спектрального разрешения фурье-спектрометра, определяемый выражением

$$\delta(\lambda) = \delta(k) (\bar{\lambda}_i)^2 / 10^4$$

Первичный эталон	Государственный первичный специальный эталон единиц длины и времени распространения сигнала в световоде, средней мощности, ослабления и длины волны для волоконно-оптических систем связи и передачи информации ГЭТ 170-2011 $\lambda = 0,6 \dots 1,7 \text{ мкм}$ $S_{\lambda} = 5,31 \cdot 10^{-9} \text{ мкм}$ $u_{A\lambda} = 5,31 \cdot 10^{-9} \text{ мкм}$ $u_{c\lambda} = 4,84 \cdot 10^{-8} \text{ мкм}$ $\theta_{\lambda} = 1,17 \cdot 10^{-7} \text{ мкм}$ $u_{B\lambda} = 4,81 \cdot 10^{-8} \text{ мкм}$ $U_{P\lambda} = 1,44 \cdot 10^{-7} \text{ мкм}$
	Метод прямых измерений
Рабочие эталоны 1-го разряда	РЭ 1-го разряда единиц длины волны и волнового числа $1,25 \text{--} 20,00 \text{ мкм}$ $500 \text{--} 8000 \text{ см}^{-1}$ $\Delta_{\lambda} = 3 \cdot 10^{-6} \dots 5 \cdot 10^{-4} \text{ мкм}$ $\Delta_k = 0,01 \dots 0,02 \text{ см}^{-1}$
	Метод прямых измерений
Рабочие эталоны 2-го разряда	Меры длины волны и волнового числа $1,25 \text{--} 20,00 \text{ мкм}$ $500 \text{--} 8000 \text{ см}^{-1}$ $\Delta_{\lambda} = 8 \cdot 10^{-5} \dots 2 \cdot 10^{-3} \text{ мкм}$ $\Delta_k = 0,05 \dots 0,50 \text{ см}^{-1}$
	Метод прямых измерений
Средства измерений	Инфракрасные фурье-спектрометры, спектрометры и спектрофотометры $1,25 \text{--} 20,00 \text{ мкм}$ $500 \text{--} 8000 \text{ см}^{-1}$ $\Delta_{\lambda} = 1,6 \cdot 10^{-4} \dots 4,0 \cdot 10^{-3} \text{ мкм}$ $\Delta_k = 0,1 \dots 1,0 \text{ см}^{-1}$

Рис. 3. Локальная поверочная схема для средств измерений длины волны и волнового числа

Fig. 3. Local accuracy chart for measurement instruments of wavelength and wavenumber

Таблица 3

Поправочные коэффициенты $\Pi_{\lambda, k}$ РЭ и расширенные неопределённости $U_p(\Pi_{\lambda, k})$ воспроизведения и передачи единиц длины волны в диапазоне 1,25–20,00 мкм и волнового числа в диапазоне 500–8000 см⁻¹

Характеристика	λ	k
$\Pi_{\lambda, k}$	0,9999998	1,0000002
$U_p(\Pi_{\lambda, k})$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$2,1 \cdot 10^{-6}$
Нижняя граница диапазона	1,25 мкм	8000 см ⁻¹
Верхняя граница диапазона	20,00 мкм	500 см ⁻¹
$U_{p \min}$	$2,8 \cdot 10^{-6}$ мкм	0,02 см ⁻¹
$U_{p \max}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$ мкм	0,01 см ⁻¹

Расширенные неопределённости воспроизведения значений волновых чисел и длин волн, а также поправочных коэффициентов к результатам измерений волновых чисел и длин волн рассчитываются для коэффициента охвата, равного 2, и соответствующего уровню доверия приблизительно 95 %.

Результаты выполненных в соответствии с вышеприведённым алгоритмом расчётов расширенной неопределённости воспроизведения и передачи единиц длины волны в диапазоне 1,25–20,00 мкм и волнового числа в диапазоне 8000–500 см⁻¹, а также поправочного коэффициента РЭ приведены в табл. 3.

Разработана локальная поверочная схема для представления прослеживаемости средств измерений длины волны и волнового числа к ГЭТ 170-2011 (рис. 3).

Наиболее распространенными мерами волновых чисел в диапазоне длин волн 2,5–20,0 мкм являются тонкие плёнки полистирола [9, 10] МВЧ-001 производства ВНИИОФИ. Эти меры применяют для передачи единицы длины волны фурье-спектрометрам и спектрофотометрам, а также их можно аттестовать в качестве РЭ 2-го разряда согласно представленной поверочной схеме.

Заключение. Государственный рабочий эталон 1-го разряда единиц длины волны в диапазоне от 1,25 до 20,00 мкм и волнового числа в диапазоне от 500 до 8000 см⁻¹ позволит решить проблемы аттестации аппаратуры для измерений спектрометрических величин и двухпараметровых характеристик оптических материалов по спектральной шкале в инфракрасном диапазоне.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования высокоточных измерительных технологий в области фотоники (скр.vniiofi.ru), созданного на базе ФГУП «ВНИИОФИ» при поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения соглашения № 05.595.21.0005 (уникальный идентификатор RFMEFI59519X0005).

Список литературы

1. Дунаев А. Ю., Золотаревский Ю. М., Морозова С. П., Саприцкий В. И., Фиданян Г. С., Ерикова А. А. Государственный первичный эталон единиц спектральных коэффициентов

направленного пропускания, диффузного и зеркального отражений в диапазоне длин волн от 0,2 до 20,0 мкм ГЭТ 156-2015 // Измерительная техника. 2018. № 8. С. 7–9. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it-2018-8-7-9>

2. Дунаев А. Ю., Золотаревский Ю. М., Морозова С. П., Саприцкий В. И., Фиданян Г. С., Ерикова А. А. Спектрофотометрические установки Государственного первичного эталона единиц спектральных коэффициентов направленного пропускания, диффузного и зеркального отражений в диапазоне длин волн от 0,2 до 20,0 мкм ГЭТ 156-2015 // Измерительная техника. 2018. № 11. С. 6–10.

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2018-11-6-10>

3. Malcolm White, Marek Smid, and Geiland Porrovecchio, *Metrologia*, 2012, vol. 49, pp. 779–784.

<https://doi.org/10.1088/0026-1394/49/6/779>

4. Kaplan S. G., Hanssen L. M., and Datla R. U., *Appl. Opt.*, 1997, vol. 36, no. 34, pp. 8896–8908. <https://doi.org/10.1364/AO.36.008896>

5. Hollberg L., Oates C. W., Wilpers G., Hoyt C. W., Barber Z. W., Diddams S. A., Oskay W. H., and Bergquist J. C., *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 2005, 38, S469.

<https://doi.org/10.1088/0953-4075/38/9/003>

6. Купцов А. Х., Жижин Г. Н. Фурье-спектры комбинационного рассеяния и инфракрасного поглощения полимеров. Справочник. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. 656 с.

7. Глазов А. И., Григорьев В. В., Иванов В. С., Кравцов В. Е., Митюреев А. К., Тихомиров С. В., Крутиков В. Н. Эталонная база ВНИИОФИ в области волоконно-оптических систем передачи информации // Фотон-экспресс. 2015. № 8(128). С. 18–21.

8. Balling P., Fischer M., Kubina Ph, and Holzwarth R., *Opt. Express*, 2005, vol. 13, no. 23, pp. 9196–9201.

<https://doi.org/10.1364/OPEX.13.009196>

9. Changjiang Zhu and Leonard M. Hanssen, *AIP Conference Proceedings*, 430, 491 (1998). <https://doi.org/10.1063/1.55714>

10. Isaksson T., Yang H., Kemeny G. J., et al., *Applied Spectroscopy*, 2003, vol. 57(2), no. 2, pp. 176–185.

<https://doi.org/10.1366/000370203321535097>

References

1. Dunaev A. Yu., Zolotarevskii Yu. M., Morozova S. P., Sapritskii V. I., Fidanyan G. S., and Erikova A. A., *Measurement Techniques*, 2018, vol. 61, no. 8, pp. 751–754.

<https://doi.org/10.1007/s11018-018-1496-0>

2. Dunaev A. Yu., Zolotarevskii Yu. M., Morozova S. P., Sapritskii V. I., Fidanyan G. S., and Erikova A. A., *Measurement Techniques*, 2019, vol. 61, no. 11, pp. 1045–1051.

<https://doi.org/10.1007/s11018-019-01547-8>

3. Malcolm White, Marek Smid, and Geiland Porrovecchio, *Metrologia*, 2012, vol. 49, pp. 779–784.

<https://doi.org/10.1088/0026-1394/49/6/779>

4. Kaplan S. G., Hanssen L. M., and Datla R. U., *Appl. Opt.*, 1997, vol. 36, no. 34, pp. 8896–8908. <https://doi.org/10.1364/AO.36.008896>

5. Hollberg L., Oates C. W., Wilpers G., Hoyt C. W., Barber Z. W., Diddams S. A., Oskay W. H., and Bergquist J. C., *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 2005, 38, S469.

<https://doi.org/10.1088/0953-4075/38/9/003>

6. Kuptsov A. Kh., Zhizhin G. N., *Handbook of Fourier Transform Raman and Infrared Spectra of Polymers*, Moscow, Fizmatlit Publ., 2001, 656 p. (in Russian).

7. Glasov A. I., Grigorev V. V., Ivanov V. S., Kravtsov V. E., Mityurev A. K., Tikhomirov S. V., Krutikov V. N., *Photon-Express*, 2015, no. 8 (128), pp. 18–21 (in Russian).

8. Balling P., Fischer M., Kubina Ph., and Holzwarth R., *Opt. Express*, 2005, vol. 13, no. 23, pp. 9196–9201.
<https://doi.org/10.1364/OPEX.13.009196>

9. Changjiang Zhu and Leonard M. Hanssen, *AIP Conference Proceedings*, 430, 491 (1998).

<https://doi.org/10.1063/1.55714>

10. Isaksson T., Yang H., Kemeny G.J., et al., *Applied Spectroscopy*, 2003, vol. 57(2), no. 2, pp. 176–185.

<https://doi.org/10.1366/000370203321535097>

Дата поступления: 03.06.2020.

Дата принятия: 10.07.2020.

State 1st class working standard for units of wavelength in the range from 1.25 to 20.00 μm and wavenumber in the range from 500 to 8000 cm^{-1}

Aleksandr Yu. Dunaev, Vitaly S. Bormashov, Svetlana P. Morozova, Valery R. Gavrilov

All-Russia Research Institute for Optical and Physical Measurements, Moscow, Russian Federation,
e-mail: dunaev@vniiofi.ru, bormashov@vniiofi.ru, morozova-m4@vniiofi.ru, gavrilov@vniiofi.ru

The 1st class Working Standard for units of wavelength in the range from 1.25 to 20.0 μm and wavenumber in the range from 500 to 8000 cm^{-1} developed in VNIIOFI based on Fourier-Transform Infrared Spectrometer is presented. Dissemination of wavelength and wavenumber units to the 1st class Working Standard is carrying out from FTIR-spectrometer measurements of two peaks of lasers from the State primary special standard of units of signal propagation length and duration in the optical fiber of the average power, attenuation and wavelength for optical fiber communication systems and information transmission GET 170-2011. Spectral scale realization by the Working Standard is carrying by interferogram of internal He–Ne-laser during spectral intensity measurements of internal source. Dissemination for units of wavelength in the range from 1.25 to 20.00 μm and wavenumber in the range from 500 to 8000 cm^{-1} is provided by corresponding correction factor to measurement results. The developed accuracy chart that set traceability for wavelength and wavenumber measurement instruments to GET 170-2011 is presented.

Key words: wavelength, wavenumber, 1st class working standard, FTIR-spectrometer.