

Фуксов Виктор Маркович¹,
заместитель руководителя, канд. техн. наук;
Березенко Илья Иванович²,
магистрант;
Мешалкина Марина Николаевна³,
доцент, канд. техн. наук, доцент;
Сушников Виктор Александрович⁴,
директор высшей школы, канд. техн. наук, доцент

СИСТЕМА СПЕКТРАЛЬНЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ РАДИАЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

¹ Россия, Санкт-Петербург, Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева, Лаборатория государственных эталонов и научных исследований в области термометрии, V.M.Fuksov@vniim.ru;
^{2,3,4} Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
² berezenko.ii@edu.spbstu.ru, ³ meshalkina_mn@spbstu.ru,
⁴ sushnikov_va@spbstu.ru

Аннотация. В статье приведены результаты исследования на оборудовании из состава Государственного первичного эталона единицы температуры в диапазоне от 0 до 3200 °С ГЭТ 34-2020 и оборудовании Государственного вторичного эталона (эталон-копия) единицы температуры в диапазоне значений от 961,78 °С до 3200 °С 2.1.ZZB.0430.2022. На установку, реализующую прямой метод измерения термодинамической температуры, была добавлена система из спектральных фильтров и произведены измерения тока приемными устройствами от источника излучения. Анализ расчетов при обработке результатов измерений показал, что такое включение дополнительных спектральных фильтров позволяет улучшить точность измерения термодинамической температуры.

Ключевые слова: термодинамическая температура, интерференционные фильтры, энергетическая яркость, интегрирующая сфера.

*Viktor M. Fuksov*¹,
Deputy Head, Candidate of Technical Sciences;
*Ilya I. Berezenko*²,
Master's Student;
*Marina N. Meshalkina*³,
Associate Professor, Candidate of Technical Sciences;
*Viktor A. Sushnikov*⁴,
Head of the High School, Candidate of Technical Sciences

SPECTRAL FILTERS SYSTEM FOR IMPROVING THE ACCURACY OF THE THERMODYNAMIC TEMPERATURE MEASUREMENT BY RADIATION METHODS

¹ Laboratory of State Standards in the Field of Thermometry, D.I. Mendeleyev Institute for Metrology, St. Petersburg, Russia, V.M.Fuksov@vniim.ru;
^{2,3,4} Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia,
² berezenko.ii@edu.spbstu.ru, ³ meshalkina_mn@spbstu.ru,
⁴ sushnikov_va@spbstu.ru

Abstract. The article presents the results of a study using equipment from the State Primary Standard for a unit of temperature in the range from 0 to 3200 °C GET 34-2020 and equipment of the State Secondary Standard (standard copy) for a unit of temperature in the range from 961.78 °C to 3200 °C 2.1.ZZB.0430.2022. A system of spectral filters was added to the setting, which implements the direct method of measuring thermodynamic temperature, and the current was measured by receiving devices from the radiation source. The analysis of calculations when processing measurement results showed that such inclusion of additional spectral filters makes it possible to improve the accuracy of thermodynamic temperature measurements.

Keywords: thermodynamic temperature, interference filters, energetic brightness, integrating sphere.

Введение

Температура является одним из наиболее широко измеряемых параметров в различных отраслях промышленности и экономики. При проведении испытаний в целях утверждения типа средств измерений, поверки и калибровки обязательно измеряют температуру окружающей среды. Современные технологические процессы требуют точного измерения температуры. Точность измерения температуры за последние годы связана в большей степени не со средствами измерений, а с методической неопределённостью. Поэтому совершенствование методики процесса измерения температуры является актуальной задачей. В данной работе предложена система из двух интерференционных фильтров, позволяющая увеличить точность измерения термодинамической температуры радиационным методом. Радиационный метод применяется при измерении температуры

бесконтактным способом и основан на измерении интенсивности энергетического излучения от источника излучения в определенном спектральном диапазоне.

В работе проведено исследование влияния фильтров на значение получаемой термодинамической температуры на установке, входящей в состав Государственном первичном эталоне единицы температуры от 0 до 3200 °С ГЭТ 34-2020 [1] (см. рис. 1) и Государственном вторичном эталоне (эталоне-копия) единицы температуры от 961,78 °С до 3200 °С 2.1.ZZB.0430.2022 [2]. В работе [3] описан комплекс проведенных исследований и работ по улучшению метрологических характеристик Государственного первичного эталона единицы температуры от 0 до 3200 °С ГЭТ 34-2020 для практической реализации нового определения Кельвина в соответствии с [4].



Рис. 1. Комплекс для воспроизведения, хранения и передачи размера единицы температуры в диапазоне от 961,78 °С до 3200 °С

1. Совершенствование методики измерения термодинамической температуры на современном этапе

В работе [5] показаны результаты измерений температуры с помощью радиометров с фильтрами при температуре выше точки плавления серебра (1235,1 К). Неопределенность измерения температуры составила от 0,56 К до 2,64 К (при коэффициенте охвата $k = 2$) в диапазоне 1000–2500 °С.

На рис. 2 показано поле термодинамической температуры от источника радиационного излучения. Как видно, применение спектральных фильтров позволяет ограничить область изменения температурного поля в пространстве и снизить неопределённость измерения температуры.

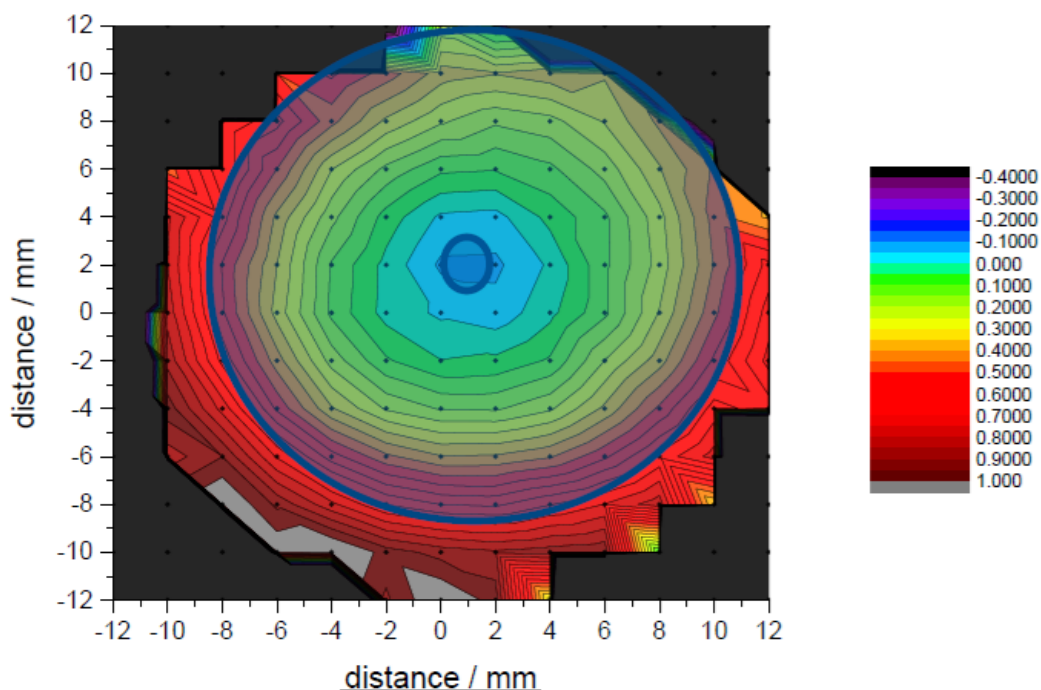


Рис. 2. Поле измерения термодинамической температуры в пространстве излучения радиационного источника [5]

Применение интерференционного фильтра при максимальной полосе пропускания в диапазоне 800 нм диаметром 20 мм (большой синий круг) позволило скорректировать точность измерения температуры на 0,38 %, что соответствует +1,66 К. Применение интерференционного фильтра при той же максимальной полосе пропускания в диапазоне 800 нм диаметром 7 мм (малый синий круг) позволило скорректировать точность измерения температуры на 0,04 %, что соответствует +0,17 К.

В настоящей работе был выбран путь улучшения спектрального разрешения от источника излучения с помощью системы двух спектральных фильтров, установленных последовательно друг за другом.

2. Проверка спектральных характеристик фильтров

Проведение исследований спектральных характеристик фильтров проводилось на установке, входящей в состав Государственного вторичного эталона (эталона-копии) единицы температуры 2.1.ZZB.0430.2022.

Для практической части исследования были выбраны интерференционные фильтры с регистрационными номерами T0731612 и T0727338, с длиной волны пропускания 532 нм, указанной в техническом паспорте. Был выбран диапазон измерений от 521 до 541 нм, так как при значениях за пределами этого диапазона пропускание фильтров стремится к нулю. Проверка спектральных характеристик фильтров выполнялась с использованием лампы для поддержания одинаковой освещенности при длительных измерениях.

На рис. 3 показан график пропускания излучения от источника, измеренный для фильтра T0727338.

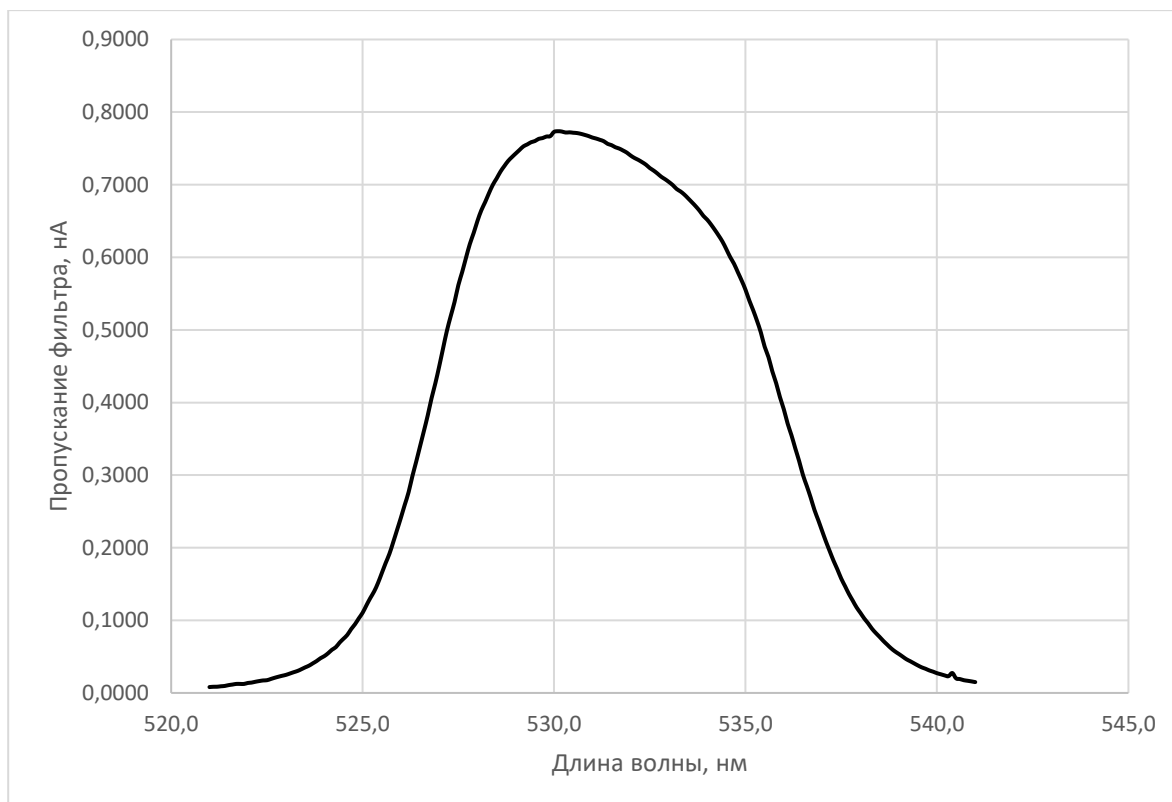


Рис. 3. График пропускания фильтра T0727338

Как видно из рис. 3, верхняя точка находится на отметке в 530,7 нм, в то время как заявленная полоса пропускания фильтров по техническому паспорту 532 нм. Несмотря на небольшое отклонение, форма графика почти симметрична и близка к нормальному распределению. Это указывает на то, что фильтр имеет достаточно правильную характеристику пропускания и может быть использован в дальнейшем, несмотря на небольшое расхождение с номинальным значением. Аналогичные измерения были проведены для фильтра T0731612.

Был проведен расчет полученной зависимости на соответствие нормальному распределению с помощью программы MATLAB и критерия согласия Колмогорова-Смирнова. Использовался метод $kstest(x)$, где x – выборка значений. Во всех случаях функция вернула «1», что подтверждает, что спектральное пропускание для обоих фильтров соответствует нормальному распределению. Эти измерения необходимы были для того, чтобы понять нет ли дефектов у фильтров. Оба фильтра оказались подходящими для проведения дальнейших исследований.

3. Проведение измерений системы из двух фильтров

Для системы сдвоенных фильтров был выбран диапазон длин волн от 524 до 538 нм, поскольку ниже и выше этих значений измеренные данные близки к нулю. Результаты измерений показаны на рис. 4.

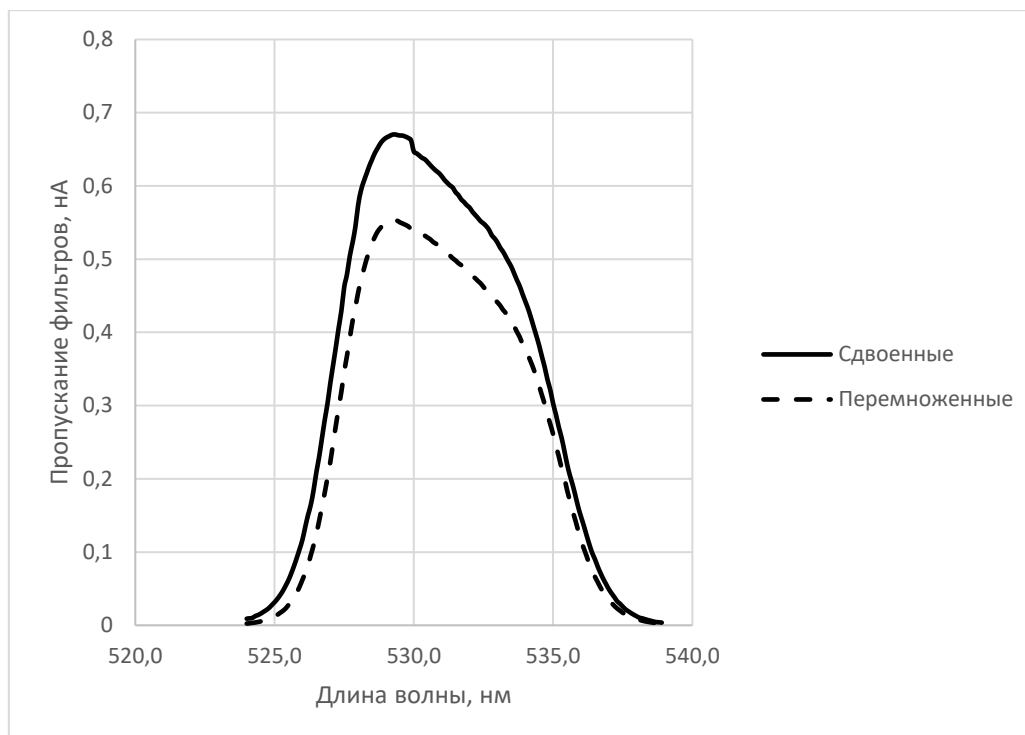


Рис. 4. График пропускания сдвоенных фильтров T0727338 и T0731612, и перемноженных значений этих фильтров

Результат полосы пропускания сдвоенных фильтров не что иное, как математическое перемножение значений коэффициентов пропускания фильтров на одних и тех же длин волн. Видно небольшое расхождение между перемноженными значениями и полученным, но это может быть из-за некоторых разных факторов, таких как освещенность помещения и т. д., так как измерение пропускания фильтров проводились в разные дни.

4. Проведение измерений термодинамической температуры с системой из двух фильтров

Измерение термодинамической температуры с системой из двух фильтров проводилось на установках, входящих в состав входящей в состав Государственном первичном эталоне единицы температуры от 0 до 3200 °С ГЭТ 34-2020.

Принцип измерения термодинамической температуры прямым методом (см. рис. 5) от объекта заключается в компарировании спектральных энергетических яркостей измеряемого объекта (АЧТ – абсолютно черного тела) и опорного источника (интегрирующей сферы), регулировке спектральных энергетических яркостей от опорного источника вплоть до достижения равенства яркостей и последующем расчете термодинамической температуры измеряемого объекта по значению спектральной энергетической яркости от опорного источника. В качестве источника излучения используется лазер Super-K. Смена положения трап-детектора осуществляется с помощью плавного движения всей верхней части установки на рельсах. Монохроматор при этом не используется.

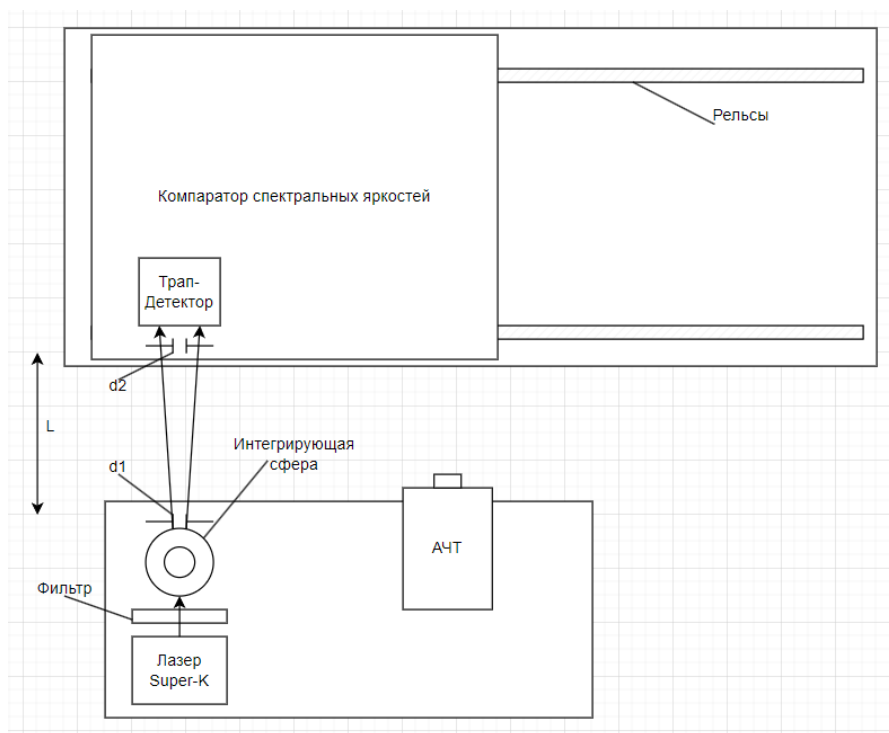


Рис. 5. Схема установки для измерения фототока трап-детектора, вызванного световым потоком в телесном угле, определяемом диафрагмами на выходе интегрирующей сферы и на входе трап-детектора

Измерение тока фотодиода спектрального коэффициента яркости от излучения интегрирующей сферы, сфокусированного на фотодиод оптической фокусирующей системой, осуществляется на установке, изображенной на рис. 6.

Для измерения прямого излучения выполняются следующие действия. Лазерное излучение от перестраиваемого лазера подводится к интегрирующей сфере с помощью оптоволоконного кабеля; с помощью программного обеспечения лазера и оптоакустического фильтра устанавливаются соответствующая рабочая длина волны излучения и полоса пропускания. Между выходной апертурой оптоакустического фильтра и оптоволоконным кабелем устанавливается интерференционный фильтр. До начала измерений лазер должен быть включен на мощность 50 % не менее 60 минут.

Для задания известного телесного угла и дальнейшего определения геометрического фактора применяются прецизионные диафрагмы диаметром 4 и 8 мм, которые устанавливаются на входную апертуру трап-детектора и переднюю плоскость корпуса интегрирующей сферы соответственно. Расстояние между этими диафрагмами измеряется с помощью штангенциркуля или специальной концевой меры (при наличии) с погрешностью не более 0,1 мм. Расстояние выбирается в интервале от 0,45 до 0,6 м, а плоскость диафрагмы на интегрирующей сфере должна совпадать с фокусной плоскостью системы компаратора спектральных яркостей.

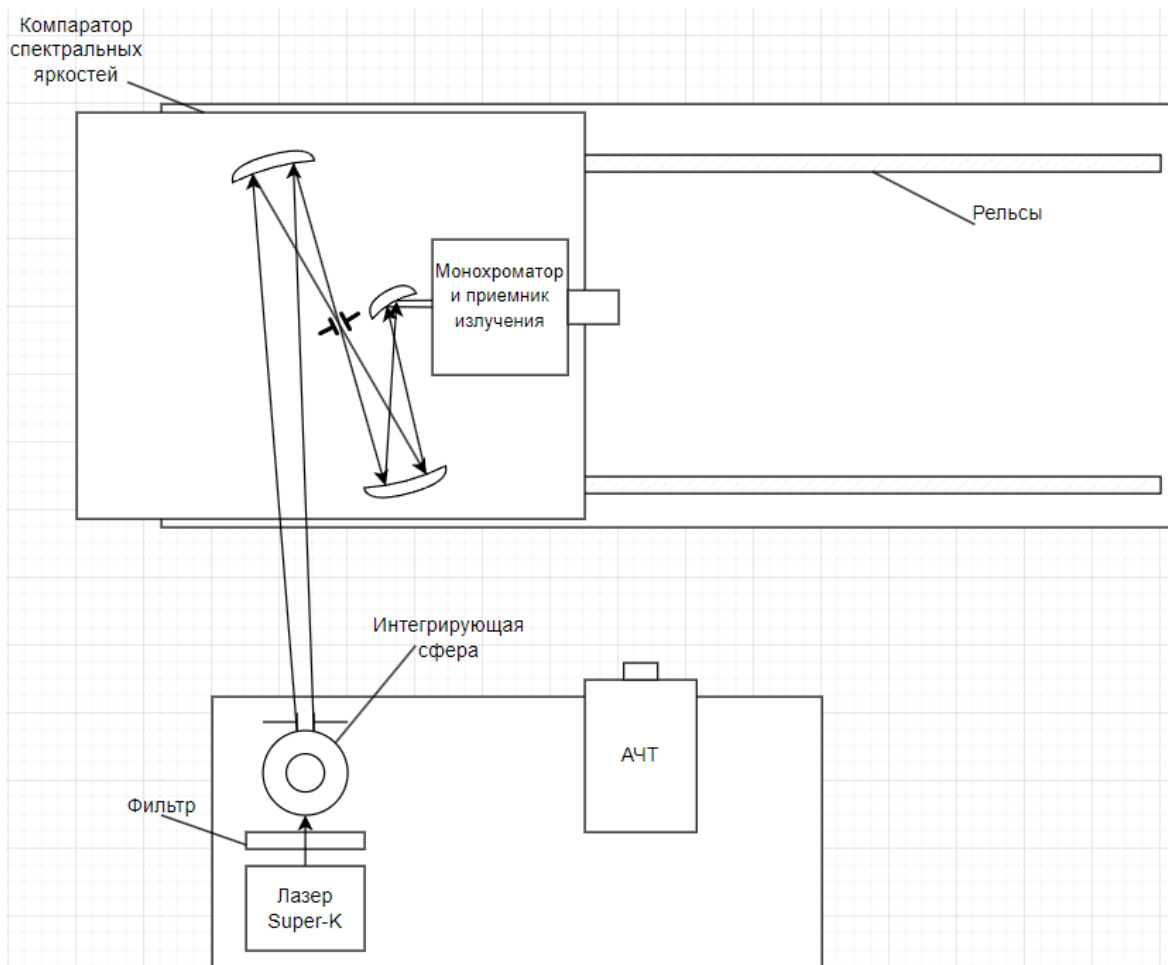


Рис. 6. Измерение тока фотодиода спектрального коэффициента яркости от излучения интегрирующей сферы, сфокусированного на фотодиод оптической фокусирующей системой

Для контроля соосности диафрагм применяется принцип самоустойчивости (самоустановки), при котором используется металлический стержень с конусной формой на торцах. Стержень помещается между диафрагмами таким образом, чтобы конические поверхности максимально соприкасались с краями апертур обеих диафрагм. Для более точной юстировки может применяться дополнительная диафрагма или другое приспособление, которое служит третьей точкой опоры в данной системе. Для минимизации паразитной засветки между интегрирующей сферой и трап-детектором устанавливается специальная бленда, жалюзи на окнах закрываются, и выключается освещение в помещении.

В таблице 1 показаны результаты измерения тока фотодиода для различных вариантов.

Результаты измерения тока фотодиода

Наименование фильтра (фильтров)	Значение силы тока на трап-детекторе, нА	Значение силы тока на фотодиоде в схеме с монохроматором, пА
Фильтр Т0727338	3,551	3,02
Фильтр Т0731612	4,473	4,47
Сдвоенные фильтры	4,422	4,67

5. Проведение расчета термодинамической температуры

По полученным значениям можно вычислить термодинамические температуры для всех 3-х случаев (по отдельности и вместе). Нужные измерения идут следующей очередностью [6]:

После юстировки системы интегрирующая сфера – трап-детектор выполняется расчет геометрического фактора g по формуле (1):

$$g = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_1^2 \cdot r_2^2}{r_1^2 + r_2^2 + d^2 + \sqrt{(r_1^2 + r_2^2 + d^2)^2 - 4 \cdot r_1^2 \cdot r_2^2}}, \quad (1)$$

где r_1 и r_2 – радиусы диафрагм, установленных на интегрирующей сфере и трап-детекторе; d – расстояние между диафрагмами.

При помощи программного обеспечения на лазере устанавливается мощность в пределах от 50 до 80 %. После стабилизации показаний проводят измерение фототока S_r освещенного интегрирующей сферой трап-детектора с помощью пикофемтоамперметра. Затем измерение фототока повторяют при выключенном лазере (допускается перекрыть излучение на выходе из оптоакустического фильтра) для определения силы темнового тока S_d .

За полезный сигнал S принимают разницу измеренных значений, вычисленных по формуле (2):

$$S = S_r - S_d = 3,02 \cdot 10^{-11}. \quad (2)$$

Вычисляют термодинамическую температуру по итерационному алгоритму Ньютона-Рафсона по формуле (3):

$$T_{i+1} = T_i + \frac{T_i^2}{c_2 K} \left(1 - K \int_0^{+\infty} s(\lambda) L(\lambda, T_i) d\lambda \right) \int_0^{+\infty} \frac{s(\lambda) L(\lambda, T_i)}{n\lambda \left(1 - \exp\left(-\frac{c_2}{n\lambda \cdot T_i}\right) \right)} d\lambda, \quad (3)$$

где $s(\lambda) = \pi g s_\phi(\lambda)$ – спектральная чувствительность приёмника; $L(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{n^2 \lambda^5} \left(\exp \frac{h \cdot c}{n \cdot \lambda \cdot k \cdot T} - 1 \right)^{-1}$ – энергетическая яркость излучения; K – коэффициент, включающий в себя все оптические и прочие поправки, возникающие из-за различных влияющих факторов при измерении сигнала от трап-детектора; $s_\phi(\lambda)$ – спектральная чувствительность приёмника к потоку, определяемая с помощью абсолютного криогенного радиометра;

$n = 1,00029$ – показатель преломления воздуха; λ – длина волны излучения, определяемая используемыми фильтрами; $d\lambda$ – ширина полосы пропускания фильтра (интегрирования по длине волны), $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, $c = 299792458$ м/с – скорость света в вакууме, $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ м²·кг/с – постоянная Планка.

Был выполнен анализ результатов для сдвоенных фильтров. При $r_1 = r_2 = 0,002$ м и $d = 0,1285$ м можно найти необходимый для дальнейших вычислений геометрический фактор. Используя формулу (2), было получено следующее значение $g = 3,04266 \cdot 10^{-9}$. Начальная температура равнялась $T_i = 1580$ К.

Сумма значений $s(\lambda)L(\lambda, T_i)$ для каждой длины волны диапазона от 524 нм до 539 нм равнялась $4,40532 \cdot 10^{-9}$. Сумма значений $\frac{s(\lambda) \cdot L(\lambda, T_i)}{n \cdot \lambda \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{c_2}{n \cdot \lambda \cdot T_i}\right)\right)}$ для каждой длины волны из диапазона от 524 нм до 539 нм равнялась $8,29 \cdot 10^{-3}$.

По полученным значениям можно вычислить термодинамическую температуру, используя формулу (3). Значения термодинамической температуры для разных вариантов измерений приведены в табл. 2.

Значение яркостной температуры лампы при ее калибровке равно 1580 К, таким образом, можно сделать вывод, что результаты, полученные с использованием сдвоенных фильтров, обеспечивают более точное совпадение с калибровочным значением по сравнению с применением одиночных фильтров. Минимальное значение неопределённости измерения термодинамической температуры на установке, входящей в состав эталона ГЭТ 34-2020 в этом диапазоне составляет 0,19 К. Выявленное превышение ожидаемой температуры может указывать на наличие неучтённой систематической погрешности в измерениях.

Таблица 2

Рассчитанные значения термодинамической температуры

Наименование фильтра	Значение термодинамической температуры, К
фильтр T0727338	1579,6
фильтр T0731612	1576,5
сдвоенные фильтры	1580,3

Заключение

В ходе проведенного исследования были определены спектральные характеристики двух интерференционных фильтров, использующихся как по отдельности, так и в паре. Полоса пропускания пары фильтров оказалась меньше, чем фильтров по отдельности, что при измерениях позволяет уменьшить составляющую неопределенности, связанную с различием в спектрах излучения интегральной сферы и АЧТ. Экспериментально было подтверждено, что коэффициент пропускания пары фильтров для каждой

длины волны соответствует произведению коэффициентов пропускания каждого фильтра по отдельности, что указывает на корректность проведенных измерений. Были проведены измерения термодинамической температуры при различных установленных фильтрах и сравнены результаты.

Результаты работы открывают перспективы для дальнейшего углубленного исследования. В частности, следует рассмотреть следующие направления:

- проведение измерений при изменении угла разворота фильтра относительно оси излучения: измерения при различных углах разворота фильтров позволит подобрать оптимальную спектральную полосу пропускания пары фильтров для уменьшения неопределенности измерений;

- становится возможной модификация метода измерений: учитывая, что использование сдвоенных фильтров приводит к уменьшению светимости интегральной сферы и, соответственно выходного сигнала приемника излучения, необходимо предусмотреть сокращение расстояния между сферой и приемником.

В целом, проведенные исследования позволят улучшить качество измерений на ГЭТ 34-2020 путем сокращения одной из составляющих неопределенности при воспроизведении и измерении термодинамической температуры.

Список литературы

1. Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений «Утвержденные типы средств измерений, номер по реестру ГЭТ 34-2020» [Электронный ресурс]. – URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/12/items/1385580> (дата обращения: 24.05.2024).

2. Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений «2.1.ZZB.0430.2022» [Электронный ресурс]. – URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/11/items/1404065> (дата обращения: 24.05.2024).

3. Походун А. И., Фуксов В. М., Сильд Ю. А., Мазанов М. А., Матвеев М. С. Государственный первичный эталон единицы температуры в диапазоне 0–3000 °С ГЭ 34-2020: практическая реализация нового определения Кельвина // Измерительная техника. – 2021. – № 7. – С. 13–21. – DOI:10.32446/0368-1025it.2021-7-13-21.

4. Международная система единиц (SI). – 2019. – 9-е издание [Электронный документ]. – URL: vniim.ru/files/SI-2019.pdf (дата обращения: 24.05.2024).

5. Mactim G., Bloembergen P., Hartmann J., Anhlatt K. et al. Realisation and dissemination of thermodynamic temperature above silver point // Metrologia. – 2006. – Vol. 43(2). – Paper S22. – DOI:10.1088/0026-1394/43/2/S05.

6. Lemarchand C., Djerroud K., Darquié B., Lopez O. et al. Determination of the Boltzmann constant by laser spectroscopy as a basis for future measurements of the thermodynamic temperature // International Journal of Thermophysics. – 2010. – Vol. 31(7). – Pp. 1347–1359. – DOI:10.1007/s10765-010-0755-3.