

УДК 535.24
EDN: MINBWS

PACS: 42.62.Eh

Метод экспресс-контроля интегрального коэффициента пропускания оптических элементов

© А. В. Полесский*, Н. А. Семенченко, Ш. И. Зарипов, Д. А. Машошин

АО «НПО «Орион», Москва, 111538 Россия

* E-mail: poleskiyav@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 16.06.2025; после доработки 4.07.2025; принята к публикации 11.08.2025
Шифр научной специальности: 2.2.6

Представлены результаты технической реализации метода экспресс-контроля интегрального коэффициента пропускания оптических элементов по образцу-спутнику с помощью матричного фотоприемного устройства. Измерение коэффициента пропускания основано на измерении дифференциального потока излучения. Небольшие модификации метода позволяют использовать его для измерения интегрального коэффициента внутреннего пропускания (или поглощения) материала и измерения интегрального коэффициента пропускания объектива.

Ключевые слова: интегральный коэффициент пропускания; измерение; погрешность измерения; оптический элемент; матричный фотоприемник; дифференциальный поток излучения.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-4-16-23

Введение

При организации и в ходе серийного производства оптических элементов необходимо контролировать ряд параметров, среди которых одним из важных является коэффициент пропускания. Наиболее популярным методом контроля в настоящее время является метод спектрального анализа [1], при котором измеряется зависимость коэффициента пропускания от длины волны, и его последующее интегрирование в заданном диапазоне длин волн. Данный метод пользуется популярностью и хорошо зарекомендовал себя, но для реализации требует дорогостоящего спектрофотометра. К недостаткам метода можно отнести, что для полноценного анализа работы измеряемых оптических элементов в составе оптико-электронного прибора (ОЭП) надо учитывать спектральные характеристики фоно-целевой обстановки, в которой работает ОЭП и спектральную чувствительность приемника излучения ОЭП.

В связи с необходимостью проведения измерений оптических элементов в ходе их производства с учетом спектральной чувствительности приемника излучения целевого ОЭП, а также фоно-целевой обстановки, был разработан и предложен метод экспресс-контроля интегрального коэффициента пропускания оптических элементов, лишенный указанных недостатков. При разработке метода решались следующие задачи:

- метод должен позволять имитировать фоно-целевую обстановку, которая наблюдается при работе ОЭП;
- метод должен учитывать спектральную характеристику приемника излучения ОЭП;
- метод должен обеспечивать высокую повторяемость измерений;
- метод должен быть устойчив к бликам и переотражениям, которые могут появиться при проведении измерений;
- метод должен иметь высокую производительность для быстрого проведения измерений.

Исходные данные для разработки метода экспресс-контроля

Отправной точкой для разработки метода являлся метод фотоэлектрического фотометра, который устанавливает порядок определения коэффициента пропускания объектива в видимой и ближней инфракрасной областях спектра. Метод основан на сравнении направленного потока излучения, падающего на объектив, и потока, прошедшего через объектив, с помощью одноэлементного приемника излучения. Метод обладает высокой точностью и обеспечивает определение коэффициента пропускания с абсолютной погрешностью $\pm 0,02$ при $\tau > 0,1$ [2]. Принципиальная схема установки приведена на рис. 1.

Измерения в данном методе происходят в два этапа: с контролируемым изделием и без него – для определения величины падающего потока. Техническая реализация метода представлена системой, состоящей из осветителя 1 и объектива коллиматора 2, которая формирует параллельный пучок потока излучения,

далее диафрагма 3 формирует идентичный по величине поток излучения в ходе проведения измерений как с контролируемым образцом, так и без него. Поток излучения фиксируется одноэлементным фотоприемником 4. При этом размер фоточувствительного элемента больше размера диафрагмы, что позволяет фиксировать полную величину потока. Далее за диафрагмой 4 устанавливается контролируемый объектив, при прохождении через который теряется часть потока излучения, и фотоприемник, который регистрирует поток излучения, прошедший через объектив. При этом на фотоприемнике допускается расфокусированное изображение, но его размер не должен выходить за пределы фоточувствительного элемента фотоприемника. На втором этапе проведения измерений контролируемый объектив убирают из хода лучей и фиксируют величину излучения, соответствующую потоку излучения, падающего на контролируемый объектив. Отношение значений сигналов на измерительном приборе и будет интегральным коэффициентом пропускания.

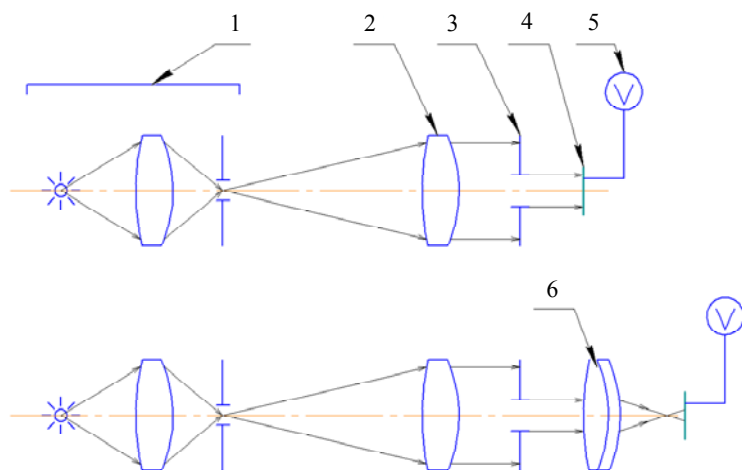


Рис. 1. Принципиальная схема установки для измерения интегрального коэффициента пропускания объективов методом фотоэлектрического фотометра: 1 – осветитель; 2 – объектив коллиматора; 3 – диафрагма; 4 – фотоприемник; 5 – измерительный прибор; 6 – испытуемый объектив

Техническая реализация данного метода на самом деле несколько сложнее. Она включает в себя дополнительно оптические фильтры для формирования заданной фоноцелевой обстановки, непрозрачный экран между диафрагмой и фотоприемником для устранения постоянной составляющей сигнала при отсутствии падающего потока излучения, и проверку линейности передаточной характеристик фотоприемника.

Разработка метода экспресс-контроля

Метод претерпел несколько итераций и прошел путь от начальной концепции до финальной версии через несколько этапов разработки. Метод разрабатывался для двух спектральных диапазонов 0,4–1,7 мкм и 8–14 мкм, однако для данных спектральных диапазонов не существуют фотоприемников с большим размером фоточувствительной площадки.

Решением данной проблемы стало применение матричного фотоприемника с заданным диапазоном спектральной чувствительности. Такая замена позволила проводить измерения в требуемом спектральном диапазоне длин волн и облегчило процесс сборки и юстировки, однако с другой стороны вызвало ряд проблем. Первой проблемой было то, что динамический диапазон матричных фотоприемников ограничен динамическим диапазоном емкости накопления БИС, и он существенно ниже, чем у одноэлементных. Динамический диапазон большинства фотоприемников с БИС-считывания составляет около 5×10^3 раз, в то время как у одноэлементных он достигает 10^6 раз [3, 4]. Поэтому в процессе проведения измерений в диапазоне 0,4–1,7 мкм часто наблюдалась «пересветка» матрицы, которую нужно было компенсировать либо расфокусировкой контролируемого объектива, либо изменением времени накопления (с учетом этого в последующих расчетах). Второй проблемой стало то, что в диапазоне 8–14 мкм проблематично создать сильный энергетический поток, что приводило к тому, что при проведении измерений падающий на каждый пиксель поток был соизмерим с пороговым, что, в свою очередь, приводило к необходимости дополнительной калибровки системы. При этом временной дрейф сигнала на микроболометрической матрице за время измерения, включая установку объектива и фокусировку, а также различные переменные фоновые засветки и переотражения приводили к большим ошибкам измерения (до 500 %) в диапазоне 8–14 мкм.

Таким образом, было необходимо дальше совершенствовать метод для нахождения решений указанных выше задач, в частности уменьшения влияния временного дрейфа сигналов матрицы, устранения переполнения ячеек накопления матрицы и обеспечения устойчивости к переменным фоновым засветкам. Указанные проблемы удалось устранить за счет модификации метода, в частности, усовершенствованный метод обеспечивает проведение измерения коэффициента пропускания по одному кадру, не использует промежуточную фокусировку изображения и работает на основе измерения изменения дифференциального потока излучения при прохождении через контролируемый образец.

Схема измерения дифференциального потока излучения показана на рисунке 2.

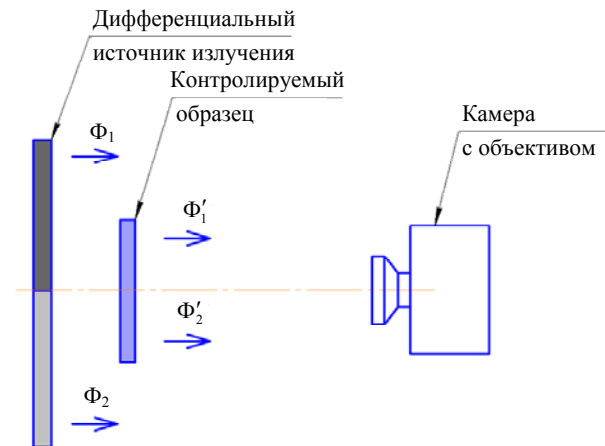


Рис. 2. Схема измерения дифференциального потока излучения при проведении измерений

Дифференциальный источник излучения образуют два потока Φ_1 и Φ_2 , которые проходя через контролируемый образец и уменьшаются на величину интегрального коэффициента пропускания образца в соответствии с зависимостями:

$$\Phi'_1 = \Phi_1 \cdot \tau_{\text{инт}}, \quad (1)$$

$$\Phi'_2 = \Phi_2 \cdot \tau_{\text{инт}}, \quad (2)$$

где Φ_1 – поток излучения от светлой (горячей) части источника излучения;

Φ_2 – поток излучения от темной (холодной) части источника излучения;

$\tau_{\text{инт}}$ – интегральный коэффициент пропускания контролируемого образца;

Φ'_1 и Φ'_2 – потоки излучения, соответствующие потокам Φ_1 и Φ_2 , прошедшим через контролируемый образец.

По определению интегральный коэффициент пропускания является отношением прошедшего потока излучения к величине падающего потока излучения в заданном спектральном диапазоне. В случае разрабатываемого метода необходимо доказать правомерность применения дифференциального потока излучения и идентичность получаемого результата определению:

$$\frac{\Phi'_2 - \Phi'_1}{\Phi_2 - \Phi_1} = \frac{\Phi_2 \cdot \tau_{\text{инт}} - \Phi_1 \cdot \tau_{\text{инт}}}{\Phi_2 - \Phi_1} = \tau_{\text{инт}}. \quad (3)$$

Таким образом измерение интегрального коэффициента пропускания с помощью дифференциального потока возможно. Дополнительным преимуществом использования дифференциального потока излучения является устойчивость метода к фоновым засветкам и переотражениям. Схемы появления фоновых засветок и переотражений для двух характерных случаев показаны на рисунке 3. В первом случае (рис. 3а) имеется внешний источник, создающий фоновый поток, который попадает на контролируемый образец и отражается от него, при этом образец защищает область дифференциального источника излучения от попадания на него потока излучения от внешнего источника. При этом от области дифференциального источника, не защищенного об-

разцом, происходит отражение падающего фонового потока. Данный случай описывает случай, когда источник фонового излучения находится за матричным фотоприемником. Второй случай характерен при боковой засветке, когда поток фонового излучения отражается от всего дифференциального источника и контролируемого образца.

Выражения (4) и (5) подтверждают, что метод устойчив к наличию равномерной фоновой засветки и переотражениям в случаях, соответствующих рисункам 3а и 3б. Равномерность фоновой засветки можно обеспечить за счет максимального сближения областей измерения всех четырех потоков излучения или введением светорассеивающих экранов

$$\frac{(\Phi'_2 + \Phi_{отр.2}) - (\Phi'_1 + \Phi_{отр.2})}{(\Phi_2 + \Phi_{отр.1}) - (\Phi_1 + \Phi_{отр.1})} = \frac{(\Phi_2 \cdot \tau_{инт} + \Phi_{отр.2}) - (\Phi_1 \cdot \tau_{инт} + \Phi_{отр.2})}{\Phi_2 - \Phi_1} = \tau_{инт} \quad (4)$$

$$\frac{(\Phi'_2 + \Phi_{отр.2}) - (\Phi'_1 + \Phi_{отр.2})}{(\Phi_2 + \Phi_{отр.1}) - (\Phi_1 + \Phi_{отр.1})} = \frac{((\Phi_2 + \Phi_{отр.1}) \cdot \tau_{инт} + \Phi_{отр.2}) - ((\Phi_1 + \Phi_{отр.1}) \cdot \tau_{инт} + \Phi_{отр.2})}{\Phi_2 - \Phi_1} = \tau_{инт} \quad (5)$$

где $\Phi_{отр.1}$ – фоновый поток излучения, отраженный от дифференциального источника излучения; $\Phi_{отр.2}$ – фоновый поток излучения, отраженный от контролируемого образца.

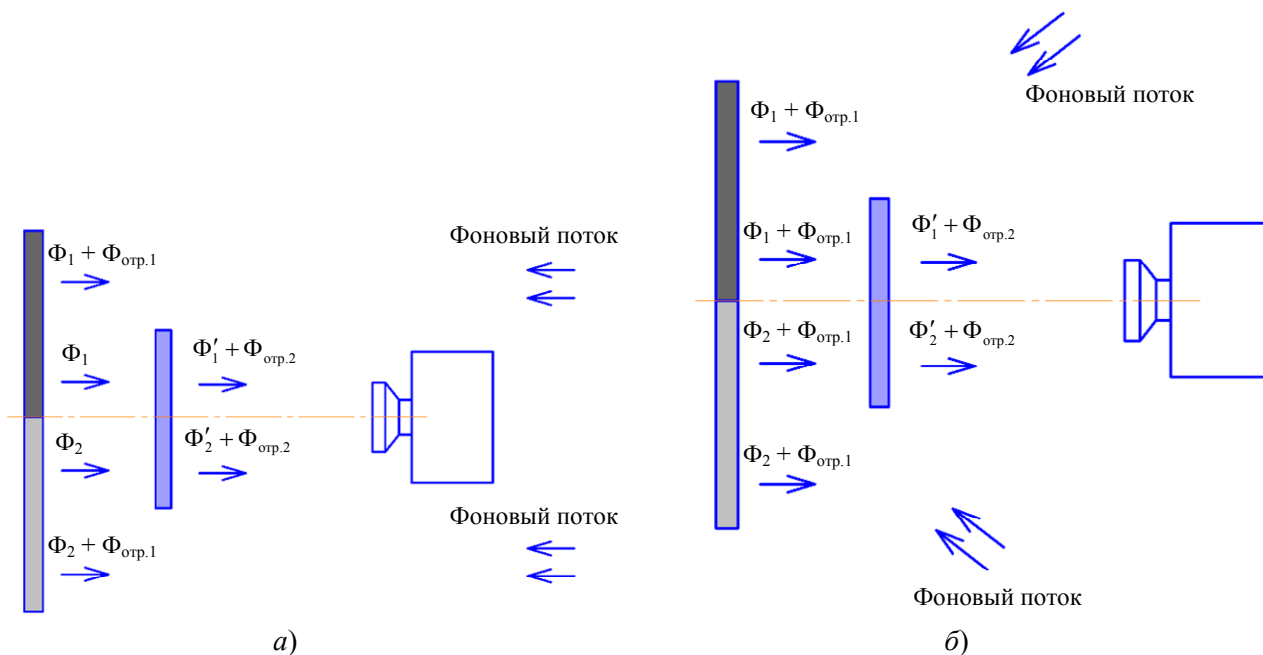


Рис. 3. Схемы образования переотражений и фоновых засветок при проведении измерений

Ограничением разработанного метода является то, что он позволяет проводить экспресс-контроль только плоскопараллельных пластин. Вместе с тем данный метод может быть использован в качестве основы измерения интегрального коэффициента внутреннего пропускания (или поглощения) материала: для этого необходимо провести в соответствии с ним измерение интегрального коэффициента пропускания, провести расчет составляющей Френелевского отражения [5] при известном коэффициенте преломления материала и вычислить требуемую величину. Также возможно измерение интегрального коэффициента пропускания объектива, путем измерения интегрального коэффициента пропускания сложенных вместе образцов-спутников всех линз, входящий в объектив.

На рисунке 4 схематично приведено изображение на матричном фотоприемнике при проведении измерения интегрального коэффициента пропускания разработанным методом в спектральном диапазоне в 8–14 мкм.

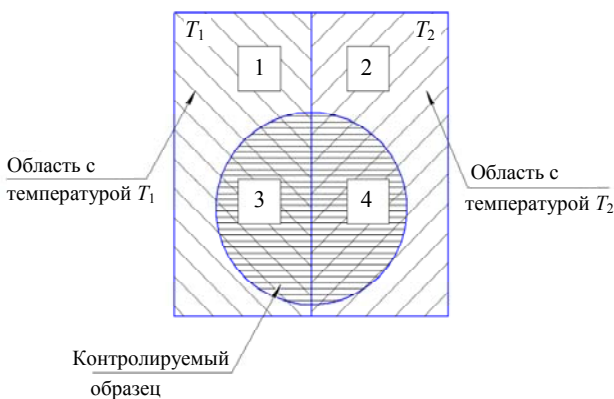


Рис. 4. Схематический вид изображения при проведении измерений с использованием дифференциального источника излучения

Одним из важных этапов разработки метода является оценка погрешности измерения [6]. При расчете погрешности необходимо учитывать, что матричный фотоприемник не измеряет поток излучения, он преобразует поток в каждом пикселе в электрический сигнал, который для идеального фотоприемника прямо пропорционален падающему потоку. Далее идет ряд преобразований, которые тоже должны быть линейными, и на выходе для каждого пикселя получают отчеты АЦП, которые регистрируются [7]. Поскольку ввиду ряда оптических ограничений размер изме-

ряемой зоны должен быть не менее 15×15 пикселей, то за величину сигнала необходимо принимать среднее значение сигнала по пикселям в зоне измерения потока излучения, при этом краевые эффекты должны быть исключены. Измерение величин сигнала производится в областях 1–4 (рис. 4). Погрешность измерения интегрального коэффициента пропускания вычисляется по следующей формуле

$$\Delta\tau_{\text{образца}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta U_3}{U_1 - U_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U_4}{U_1 - U_2}\right)^2 + \left(\frac{U_3 - U_4}{(U_1 - U_2)^2} \Delta U_1\right)^2 + \left(\frac{U_3 - U_4}{(U_1 - U_2)^2} \Delta U_2\right)^2}, \quad (6)$$

где $\Delta U_1, \Delta U_2, \Delta U_3, \Delta U_4$ – погрешность измерения сигнала;

U_1, U_2, U_3, U_4 – значение сигнала или температуры в областях 1–4.

Поскольку для тепловизоров в большинстве случаев погрешности измерения сигнала равны между собой, то формула (6), с учетом введения доверительной вероятности 0,95, может быть записана следующим образом

$$\Delta\tau_{\text{образца}} = 1,96 \cdot \frac{\Delta U}{U_1 - U_2} \sqrt{2 \cdot \left(1 + \left(\frac{U_3 - U_4}{U_1 - U_2}\right)^2\right)}, \quad (7)$$

где ΔU – погрешность измерения сигнала (температуры), равная порогу температурной чувствительности ИК камеры с матричным фотоприемником.

Из формулы (7) видно, что метод будет тем точнее, чем будет больше отношение между дифференциальным потоком и пороговым потоком прибора, с помощью которого производятся измерения. Моделирование процессов измерения показало, что в большинстве случаев погрешность измерения интегрального коэффициента пропускания, включая методическую не должна превышать $\pm 2,5\%$ при доверительной вероятности 0,95.

Подтверждение метрологических характеристик метода экспресс-контроля

Пример практической реализации метода экспресс-контроля интегрального коэффициента пропускания контролируемого образца

для спектрального диапазона 8–14 мкм приведен на рисунке 5.

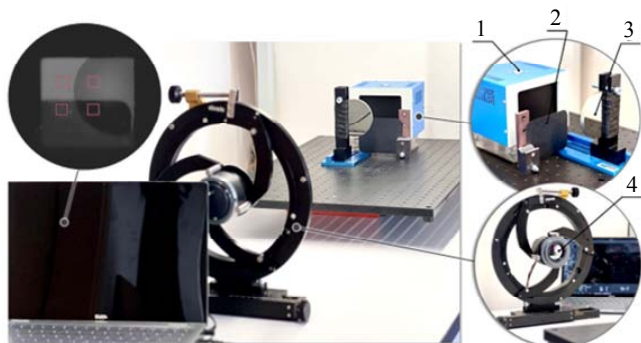


Рис. 5. Внешний вид установки для измерения интегрального коэффициента пропускания контролируемого образца

В качестве «горячей» части дифференциального источника излучения выступает излучающая полость АЧТ (поз. 1 на рис. 5), в качестве «холодной» – любое тело с высоким коэффициентом излучения в спектральном диапазоне 8–14 мкм (например, плотный матовый картон), имеющее комнатную температуру (поз. 2 на рис. 5). На держателе перед АЧТ и «фоном» закреплен контролируемый образец (поз. 3 на рис. 5). Взаимное расположение дифференциального источника излучения и контролируемого образца в поле зрения тепловизионной камеры (поз. 5 на рис. 5) должно обеспечить получение изображения,

соответствующего рисунку 4. Специальное программное обеспечение позволяет получать изображения с камер на основе матричных фотоприемников, работающих в спектральных диапазонах 0,4–1,7 мкм и 8–14 мкм, выбирать области измерения потоков излучения как напрямую от дифференциального излучателя, так и проходящее через и контролируемый образец.

Для реализации исследований метрологических характеристик метода были проведены многократные измерения одного и того же объекта, при разных значениях дифференциального потока, который обеспечивался за счет разницы температур между АЧТ и «фоном» (объектом с комнатной температурой). Также было проведено сличение метода экспресс-контроля интегрального коэффициента пропускания с методом спектрального анализа, при этом дополнительно учитывались спектральные характеристики приемника излучения и спектральные характеристики дифференциального источника. Сличение было проведено качественно, поскольку для метода спектрального анализа погрешность ряда параметров не была достоверно известна.

На рисунке 6 показана случайная погрешность измерения интегрального коэффициента пропускания контролируемого образца разработанным методом, в зависимости от температуры АЧТ и разности температур между АЧТ и «фоном».

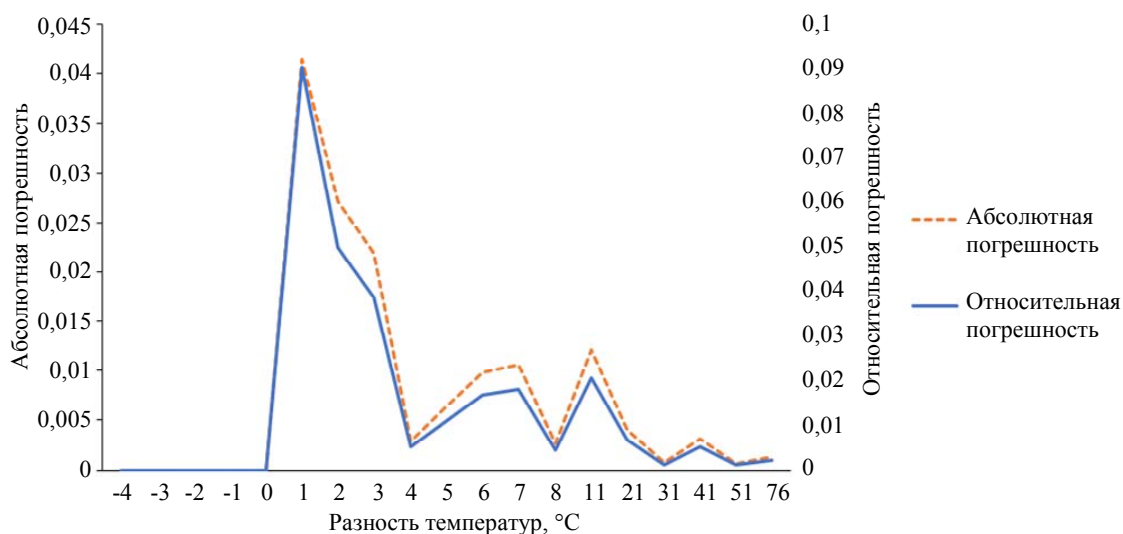


Рис. 6. Графики случайной составляющей абсолютной и относительной погрешностей измерений

Как видно из рисунка при разности температур более 10 °С случайная составляющая погрешности измерения при доверительной вероятности 0,95 не выходит за величину 2 %. При меньшей разности температур погрешность увеличивается вплоть до 10 %, что соответствует зависимости (7) и объясняется тем, что погрешность измерений зависит от соотношения погрешности измерения сигнала (температуры) и величины измеряемого сигнала (т. е. от величины отношения сигнал/шум).

На рисунке 7 представлены графики, использованные для проведения качественного сличения результатов разработанного экспресс-метода с методом спектроскопии. Красной линией показан спектральный коэффициент пропускания образца, синей – спектральная характеристика приемника излучения, зеленой – спектральная светимость АЧТ.

Проведенные расчеты показали, что для исследуемого образца интегральный коэффициент пропускания при заданных условиях измерения составляет 60,8 %, а фактически измеренный – 59,5 %.

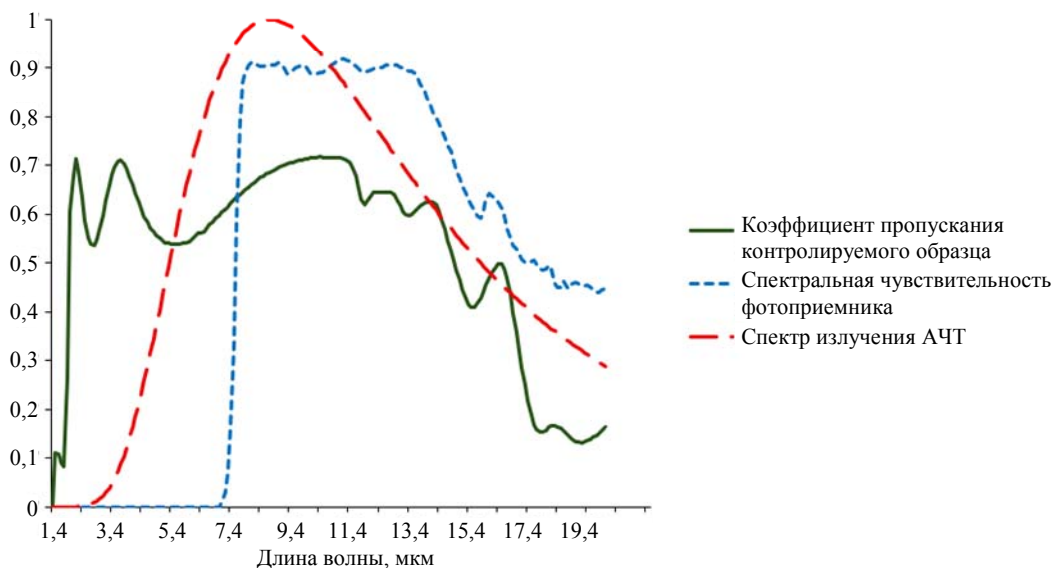


Рис. 7. Графики спектральных характеристик

Заключение

Разработанный метод, основанный на измерении изменения дифференциального потока излучения, позволяет проводить контроль интегрального коэффициента пропускания оптических элементов по образцу-спутнику в условиях приближенных к реальным.

Преимуществами разработанного метода является простота его реализации, высокая устойчивость метода к наличию равномерных фоновых засветок и переотражений. Разработанный метод с внесением небольших модификаций позволяет его использовать для измерения интегрального коэффициента внутреннего пропускания (или поглощения) материала и измерения интегрального коэффициента пропускания объектива, путем из-

мерения интегрального коэффициента пропускания сложных вместе образцов-спутников всех линз, входящий в объектив.

Проведенный анализ метрологических характеристик метода показал, что погрешность измерения интегрального коэффициента пропускания, при установленной разности температур более 10 °С не превышает 3 % при доверительной вероятности 0,95. Проведенное сравнение результатов измерения по разработанному методу и по методу спектрального анализа, показало соответствие результатов измерений, т. е. достоверность разработанного метода доказана.

Разработанный метод реализован в методике измерений, аттестованной ФГБУ «Главный научный метрологический центр» Министерства обороны России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильева В. И., Стоянова О. Ф., Шкутина И. В., Карпов С. И. Спектральные методы анализа. Практическое руководство: учеб. пособие / под ред. Селеменова В. Ф., Семенова В. Н. – Санкт-Петербург: Лань, 2014. ISBN 978-5-8114-1638-7.
2. ГОСТ 24604-81 Объективы. Метод определения коэффициента пропускания – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1981. – 9 с.
3. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды. – М.: Физматкнига, 2011.
4. Дразников Б. Н., Козлов К. В., Кузнецов П. А., Хамидуллин К. А., Деомидов А. Д. / Оптический журнал. 2016. Т. 83. № 9. С. 60–63.
5. Леденев А. Н. Физика. В 5 кн. Кн. 4. Колебания и волны. Оптика. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. ISBN 5-9221-0464-0
6. Окрепилов В. В., Антохина Ю. А., Оводенко А. А. и др. Основы метрологии: учеб. пособие. Изд. 2-е, перераб. и доп. – Санкт-Петербург: ГУАП, 2019. ISBN 978-5-8088-1338-0
7. Гашиников М. В. Методы компьютерной обработки изображений / под ред. Сойфера В. А. Изд. 2-е, испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. ISBN 5-9221-0270-2

PACS: 42.62.Eh

Integral transmittance express control method for optical elements

A. V. Polesskiy*, N. A. Semenchenko, Sh. I. Zaripov and D. A. Mashoshin

RD&P Center ORION, JSC, Moscow, 111538 Russia

*E-mail: polesskiyav@orion-ir.ru

Received 16.06.2025; revised 4.07.2025; accepted 11.08.2025

The article presents development and technical implementation results of express control method of the optical elements integral transmittance using a sample-satellite using FPA. Transmittance measurement is based on the differential radiation flux measurement. Small modifications of the method allow it to be used to measure the optic material integral internal transmittance (or absorption) and measurement the lens integral transmittance coefficient.

Keywords: integral transmittance; measurement; measurement error; optical element; matrix photodetector; differential radiation flux.

REFERENCES

1. Vasilyeva V. I., Stoyanova O. F., Shkutina I. V. and Karpov S. I. Spectral Methods of Analysis. A Practical Guide: a tutorial / Ed. by Selemenev V. F., Semenov V. N. St. Petersburg, Lan, 2014. ISBN 978-5-8114-1638-7.
2. GOST 24604-81 Objectives. Method for Determining the Transmittance Coefficient. Moscow: USSR State Committee for Standards, 1981.
3. Filachev A. M., Taubkin I. I. and Trishenkov M. A. Solid-state photoelectronics. Photodiodes. Moscow, Fizmatkni-ga, 2011.
4. Drazhnikov B. N., Kozlov K. V., Kuznetsov P. A., Khamidullin K. A. and Deomidov A. D., Optical Journal **83** (9), 60–63 (2016).
5. Ledenev A. N. Physics. In 5 books. Book 4. Oscillations and Waves. Optics. Moscow, FIZMATLIT, 2005. ISBN 5-9221-0464-0.
6. Okrepilov V. V., Antokhina Yu. A., Ovodenko A. A. et al. Fundamentals of Metrology: A Textbook. 2nd ed., revised and enlarged. St. Petersburg, GUAP, 2019. ISBN 978-5-8088-1338-0
7. Gashnikov M. V. Methods of computer image processing / Ed by Soyfer V. A. 2nd ed., corrected. Moscow, FIZMATLIT, 2003. ISBN 5-9221-0270-2

Об авторах

Полесский Алексей Викторович, д.т.н., директор по НИОКР, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: polesskiyav@orion-ir.ru SPIN-код РИНЦ 3992-4520, Author ID 571156

Семенченко Наталья Александровна, начальник отдела, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: nafara@mail.ru SPIN-код РИНЦ 8094-5126, Author ID 775858

Зарипов Шамиль Ильнурович, инженер-программист, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9).

Машошин Денис Андреевич, инженер 2-й категории, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: den_m01@mail.ru SPIN-код РИНЦ 7839-7538, Orcid 0009-0001-6339-8082