

ОПТОВОЛОКОННЫЙ СПЕКТРОФОТОМЕТР ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ СПЕКТРОВ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НАГРЕВАЕМЫХ ТЕЛ

Белорусский государственный университет. Минск, Республика Беларусь. firago@bsu.by

Описан созданный оптоволоконный спектрофотометр на базе спектрометра AvaSpec 2048 и приведены основные расчетные выражения, необходимые для его градуировки по эталонным излучателям

При создании новых технологий модификации конструкционных материалов, например с использованием мощного лазерного излучения, нужны бесконтактные методы контроля, в частности, определения температуры поверхности обрабатываемых материалов с неизвестным спектральным коэффициентом теплового излучения $\varepsilon(\lambda)$, где λ – длина волны. С появлением компактных оптоволоконных спектрометров возникла возможность регистрации спектра излучения нагретых поверхностей от 400 до 1050 нм.

При использовании формулы Вина можно связать между собой светимость поверхности нагретого тела и его температуру с помощью следующих выражений

$$\ln \frac{\lambda^5}{c_1} M(\lambda, T) - \ln \varepsilon(\lambda) = -\frac{1}{T} \frac{c_2}{\lambda} \quad \text{или} \quad \ln \varepsilon(\lambda) - \ln \frac{\lambda^5}{c_1} M(\lambda, T) = \frac{1}{T} \frac{c_2}{\lambda}, \quad \text{т. е.} \quad y = bx - \ln \varepsilon(\lambda), \quad (1)$$

где $M(\lambda, T)$ – поверхностная спектральная светимость абсолютно черного тела (АЧТ), c_1 и c_2 – первая и вторая постоянные излучения, $y = -\ln[(\lambda^5/c_1)M(\lambda, T)]$. Находя наклон b зависимости левой части уравнений от переменной $x = c_2/\lambda$, можно найти для «серых» тел ($\varepsilon(\lambda) = \text{const}$) значение искомой температуры $T = 1/b$. Обычно авторы соответствующих публикаций [1] считают, что коэффициент теплового излучения контролируемых процессов слабо зависит от λ , и ограничиваются определением температуры с помощью выражения $T = 1/b$, где b находят с помощью метода наименьших квадратов в участке спектра, где есть основания полагать тепловое излучение равновесным. При расчете искомой температуры они обычно выбирают наиболее линейный участок получаемой зависимости (1), что дает им повод утверждать о высокой точности такого способа определения температуры, не требующего проведения абсолютных измерений яркости теплового излучения.

Проведенное нами моделирование процессов определения температуры металлов методами спектральной пирометрии, описанными в [1], показывает, что для тел с $\varepsilon(\lambda) \neq \text{const}$ возникают существенные погрешности измерения T . Для их устранения требуется более сложный метод, основанный на абсолютных измерениях поверхностной спектральной светимости $M_b(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \cdot M(\lambda, T)$ тел или их спектральной яркости $L_b(\lambda, T)$.

Абсолютная спектральная чувствительность спектрофотометров $S(\lambda)$ определяется с помощью эталонных излучателей. Наибольшую точность воспроизведения спектральной светимости при заданной температуре обеспечивают модели абсолютно черных тел (АЧТ). Можно использовать и другие излучатели, например вольфрамовую ленту эталонной лампы накаливания. Спектральный коэффициент теплового излучения вольфрама $\varepsilon_w(\lambda, T)$ известен, что позволяет достаточно точно рассчитывать его поверхностную спектральную светимость $M_w(\lambda, T)$, которая градуируется по току при сличении ее светимости со светимостью АЧТ. Проецируя на торец оптоволоконного спектрофотометра изображение участка ленты лампы, который имеет максимальную температуру, можно гарантированно воспроизводить спектральную светимость вольфрама при выбранном значении тока через лампу.

Результатом измерения спектральной светимости вольфрама в выбранном участке спектра при использовании линеек кремниевых фотоприемников на ПЗС структурах, является определение зависимости среднего значения скорости нарастания \bar{V}_i цифровых сигналов \bar{D}_i , получаемых от i -ых фоточувствительных элементов линейки, от температуры T :

$$\bar{V}_i(T) = \frac{\bar{D}_i(T, \tau)}{\tau} = K g k_{QD} \frac{e s_{эл}}{hc} \beta(\lambda_i) \eta(\lambda_i) \varepsilon_W(\lambda_i, T) M_{АЧТ}(\lambda_i, T) \lambda_i d\lambda_i, \quad (1)$$

где λ_i – длина волн регистрируемого излучения, соответствующая i -ому элементу линейки фотоприемников спектрофотометра, τ – время экспозиции или накопления сигналов; g – коэффициент усиления предусилителя, встроенного в линейку фотоприемников; k_{QD} – коэффициент преобразования зарядов, накапливаемых в светочувствительных элементах линейки, в цифровые отсчеты; e , h и c – заряд электрона, постоянная Планка и скорость света, соответственно; $s_{эл}$ – площадь каждого фоточувствительного элемента линейки; $\beta(\lambda_i)$ – спектральная зависимость угла блеска дифракционной решетки, используемой в спектрофотометре; $\eta(\lambda_i)$ – спектральная зависимость квантовой эффективности элементов линейки; $\Delta\lambda_i$ – ширина элементарного участка спектра, приходящегося на один элемент линейки, под которой может подразумеваться ее спектральное разрешение; $K = \tau_{об} \left(D_{об}^2 / 4f^2 \right) (1 - f/Z)^2$ – коэффициент связи между освещенностью элементов линейки и светимостью вольфрамовой ленты; $\tau_{об}$, $D_{об}$ и f – пропускание, диаметр и фокусное расстояние объектива; Z – расстояние от объектива спектрофотометра до градуировочного источника.

Тогда выражение для вычисления цифровых сигналов на выходе линейки фотоприемников будет иметь вид:

$$D_W(\lambda_i, T, \tau) = k_i K g k_{QD} \tau \cdot e s_{эл} \left[\beta(\lambda_i) \eta(\lambda_i) \varepsilon_W(\lambda_i, T) \frac{1}{hc} \frac{c_1}{\lambda_i^4} \left(e^{c_2/\lambda_i T} - 1 \right)^{-1} \Delta\lambda_i + i_T \right], \quad (2)$$

где i_T – темновой ток матрицы. При использовании операции определения среднего значения i_T с его последующим вычитанием им можно пренебречь. Сопоставление расчетных зависимостей $D_W(\lambda_i, T, \tau)$, которые вычислены с использованием $\eta(\lambda_i)$ и $\beta(\lambda_i)$, приведенных в документации AvaSpec 2048, с зависимостями полученными при градуировке, показало их существенное несовпадение. Поэтому абсолютная спектральная чувствительность $S(\lambda)$ должна определяться путем обязательной градуировки по эталонному излучателю.

Размерность абсолютной спектральной чувствительности спектрофотометра, которая определяется при градуировке по эталонному излучателю, будет определяться величиной, измеряемой спектрофотометром. Для сопоставления и дальнейшей интерпретации результатов измерений спектральных зависимостей удобнее всего определять зависимость яркости свечения контролируемого тела $L(\lambda_i, T) = L_\lambda(\lambda_i, T) \cdot \Delta\lambda_i$ от длины волны

$$L(\lambda) = \frac{d\Phi(\lambda)}{d\Omega \cdot dS \cdot \cos \Theta}, \quad (3)$$

где $d\Phi(\lambda)$ – спектральный поток излучения, распространяющийся в телесном угле $d\Omega$ с единичной площадки тела, имеющей площадь dS , в направлении, составляющем угол Θ с нормалью к этой площадке. Яркость излучения L в системе СИ измеряется в Вт/(м²·ср). Для ламбертовских излучателей, которые имеют одинаковую яркость излучения во всех направлениях, можно пользоваться связью между их светимостью M и яркостью L в виде $M = \pi L$. Тогда выражение для вычисления зависимости яркости излучения от λ_i будет иметь вид

$$L(\lambda_i) = S_L(\lambda_i) D_W(\lambda_i, \tau) / \tau, \quad (4)$$

а абсолютная спектральная чувствительность спектрофотометра при проведении градуировки по вольфрамовой лампе и выполнении условия $Z \gg f$ определяется выражением

$$S_L(\lambda_i) = \frac{L(\lambda_i, T)}{D(\lambda_i, T, \tau) / \tau} = \frac{M_W(\lambda_i, T)}{\pi D_W^*(\lambda_i, T, \tau) / \tau} = \frac{\varepsilon_W(\lambda_i, T) \left(c_1 / \lambda_i^5 \right) \left(e^{c_2 / \lambda_i T} - 1 \right)^{-1} \Delta\lambda_i}{\pi D_W^*(\lambda_i, T, \tau) / \tau}, \quad (5)$$

где $D_W^*(\lambda_i, T, \tau)$ – цифровые сигналы, регистрируемые в процессе проведения градуировки.

Для ослабления потока фотонов, попадающих на линейку фотоприемников спектрометра AvaSpec 2048 через объектив с $D_{об} = 10$ мм и $f = 65$ мм, оптоволокну с диаметром 600 мкм и входную щель, использовался косинусный корректор с установленной перед ним диафрагмой диаметром 0,6 мм. Этот корректор располагается перед торцом оптоволокну на расстоянии от главной плоскости объектива, меньшем $2f$. При этом расстояние от объектива до контролируемой поверхности составляет примерно 20 см, что требует учета ослабления освещенности формируемого изображения с помощью коэффициента K . Результат определения спектральной чувствительности созданного спектрофотометра на базе AvaSpec 2048 при использовании эталонной вольфрамовой лампы накаливания СИ10-300 и расстоянии $Z = 20$ см приведен на рисунке 1.

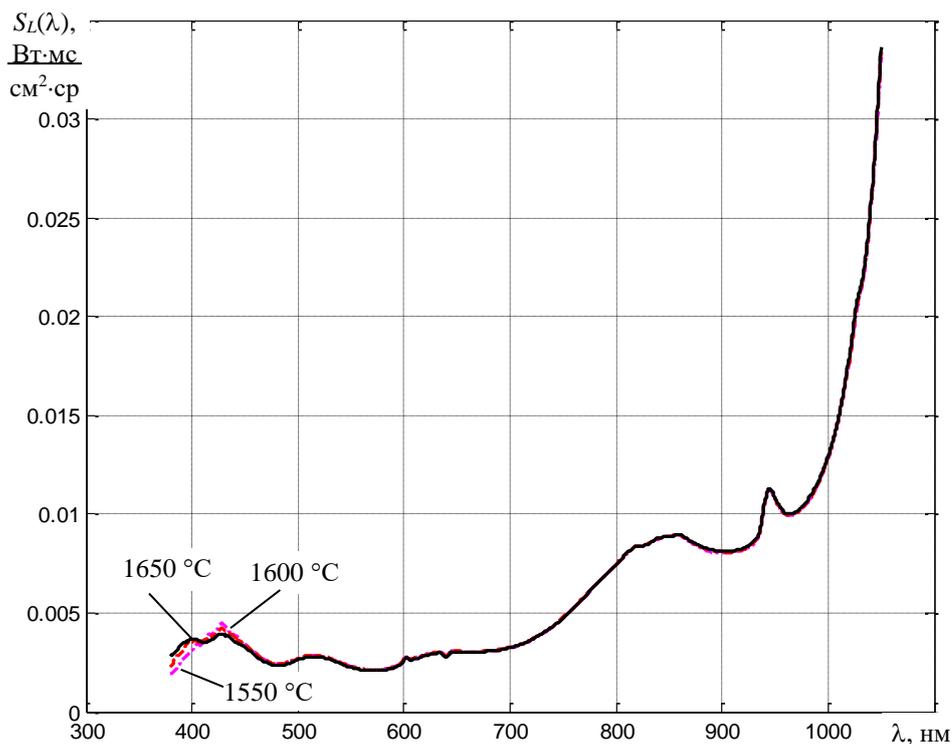


Рисунок 1 – Полученные абсолютные спектральные чувствительности спектрофотометра на базе оптоволоконного спектрометра AvaSpec 2048 при использовании эталонной лампы накаливания СИ10-300 и трех температур вольфрамовой ленты лампы 1550 (штрихпунктирная линия), 1600 (штриховая) и 1650 °C (сплошная линия)

Градуировка велась при использовании пересчета зависимости яркостной температуры вольфрамовой ленты от тока через лампу, полученной при сличении яркости свечения вольфрамовой ленты со свечением модели АЧТ на длине волны 655 нм, в значения температуры истинной температуры T . Правильность установки требуемых значений температуры вольфрамовой ленты контролировалась высокотемпературным тепловизором ИТ-3СМ [2].

Список литературы

1. Магунов, А. Н. Спектральная пирометрия / А. Н. Магунов. – М.: Физматлит, 2012. – 248 с.
2. Фираго, В. А. Высокотемпературный трехзональный тепловизор высокого разрешения ИТ-3СМ / В. А. Фираго, Н. В. Левкович, О. В. Тягунов, И. А. Сакович и др. // Международный конгресс по информатике: информационные системы и технологии: материалы междунар. науч. конгресса. - Минск: БГУ, 2016. С. 824–827.