

Ф6-1к. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ИНТЕГРАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ИЗЛУЧЕНИЯ ТЕЛА МЕТОДОМ СПЕКТРАЛЬНЫХ ОТНОШЕНИЙ

Требуемое оборудование

Модульно учебные комплексы:

1. Модульный учебный комплекс МУК-ОК
2. Модульный учебный комплекс МУК-О

Краткое теоретическое введение

Измерение температуры источника излучения

Испускательная способность абсолютно черного тела может быть определена для различных длин волн и температур по формуле Планка

$$r_{T,\lambda}^* = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda \cdot kT}} - 1}, \quad (1)$$

где c – скорость света в вакууме;
 h – постоянная Планка;
 λ - длина волны;
 k – постоянная Больцмана;
 T – температура.

Следовательно, для узкого диапазона длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$, в котором испускательную способность $r^*(\lambda, T)$ можно считать постоянной, энергетическая светимость абсолютно черного тела равна

$$dR^* = r^*(\lambda, T) d\lambda$$

Если тело не является абсолютно черным, то его испускательная способность выражается формулой

$$r(\lambda, T) = A(\lambda, T) r^*(\lambda, T)$$

где $A(\lambda, T) < 1$ - спектральный коэффициент излучения тела.

Следовательно, энергетическую светимость тела для диапазона длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$ найдем по формуле

$$dR = A(\lambda, T) r^*(\lambda, T) d\lambda.$$

Рассмотрим излучение тела с температурой T для двух различных длин волн λ_1 и λ_2 при различных значениях диапазонов $d\lambda_1$ и $d\lambda_2$ соответственно

$$dR_1 = A_1 r_1^* d\lambda_1,$$

$$dR_2 = A_2 r_2^* d\lambda_2,$$

где A_1 и A_2 - спектральные коэффициенты излучения тела при длинах волн λ_1 и λ_2 соответственно.

Излучение, дошедшее до приемника (фотодиод, фотосопротивление), составляет некоторую часть от общего излучения источника. Оно определяется размерами приемника, расстоянием от источника до приемника и наличием на пути излучения поглощающих сред, т.е. определяется такими параметрами измерительной системы, которые не изменяются в процессе опыта. Для двух различных приемников, воспринимающих поток падающего на них излучения в различных узких диапазонах длин волн, величины этих потоков будут равны:

$$J_1 = K_1 A_1 r_1^* \cdot d\lambda_1,$$

$$J_2 = K_2 A_2 r_2^* \cdot d\lambda_2,$$

где K_1 и K_2 - коэффициенты использования потока излучения первым и вторым приемником соответственно, которые не изменяются в процессе опыта.

Следовательно отношение потоков излучения для двух приемников

$$\frac{J_1}{J_2} = Z \cdot \left(\frac{r_1^* d\lambda_1}{r_2^* d\lambda_2} \right),$$

где величину $Z = (K_1 A_1 / K_2 A_2)$ можно считать постоянной при условии, что зависимостью отношения спектральных коэффициентов излучения от температуры можно пренебречь для выбранных λ_1 и λ_2 .

Величины r_1^* и r_2^* определяются с помощью формулы Планка (1). Следовательно,

$$\frac{J_1}{J_2} = Z \cdot \frac{C_1 \lambda_2^5 (\exp(C_2 / \lambda_2 T) - 1) d\lambda_1}{C_1 \lambda_1^5 (\exp(C_2 / \lambda_1 T) - 1) d\lambda_2},$$

где

$$C_1 = 2\pi h c^2 = 3,742 \cdot 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2,$$

$$C_2 = h c / k = 1,439 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}.$$

Оценим величину $\exp(C_2 / \lambda T)$ и сравним ее с единицей.

Пусть $T = 3000\text{К}$, $\lambda = 1\text{мкм}$. Тогда,

$$\exp(C_2 / \lambda T) = \exp(1,439 \cdot 10^{-2} / 1 \cdot 10^{-6} \cdot 3000) \approx 121,$$

причем понижение температуры и уменьшение длины волны изменит эту оценку в большую сторону. Это означает, что для используемых в опытах температур и длин волн единицей в скобках в формуле Планка можно пренебречь (выполняется приближенная формула Вина).

$$\frac{J_1}{J_2} = Z \cdot \frac{\lambda_2^5 d\lambda_1}{\lambda_1^5 d\lambda_2} \cdot \exp\left[\frac{C_2}{T} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right)\right].$$

Прологарифмируем это выражение и найдем из полученной формулы температуру T .

$$T = \frac{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right)}{\ln \frac{J_1}{J_2} - \ln Z - 5 \cdot \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1} - \ln \frac{d\lambda_1}{d\lambda_2}}.$$

Учтем, что в процессе опытов сохраняются значения $\lambda_1, \lambda_2, d\lambda_1, d\lambda_2$. Поэтому объединим члены, содержащие постоянные величины, в две новые константы L и Z_0 :

$$L = C_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right)$$

$$Z_0 = \ln Z + 5 \cdot \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1} + \ln \frac{d\lambda_1}{d\lambda_2}.$$

Тогда формула для определения температуры примет вид

$$T = \frac{L}{\ln \frac{J_1}{J_2} - Z_0} \tag{2}$$

Из формулы (4) видно что, зная из тарировочных опытов величину Z_0 и рассчитав значения L , можно, измерив отношение J_1 / J_2 , определить соответствующую температуру излучающего тела. Важно отметить, что прибор, используемый в работе, измеряет не абсолютное значение потока, а его отношение к J_0 , которая остается постоянной в процессе измерений.

Измерение интегрального коэффициента излучения тела

Интегральный коэффициент излучения (коэффициент черноты) тела A_T определяется отношением

$$A_T = \frac{R_T}{R_T^*}$$

где R_T – энергетическая светимость тела при температуре T ,

R_T^* - энергетическая светимость абсолютно черного тела при этой же температуре.

Для вольфрама, который используется в этой лабораторной работе в качестве источника излучения (нить накала электролампы), интегральный коэффициент излучения для температуры $T = 2000K$ надежно измерен. Он оказался равным $A_{2000} = 0,249$.

Это позволяет применить относительный метод исследования зависимости интегрального коэффициента излучения от температуры излучающего тела.

Выразим интегральный коэффициент излучения при некоторой температуре T через измеряемые величины и A_{2000} .

Согласно определению

$$A_T = \frac{R_T}{R_T^*}, \quad A_{2000} = \frac{R_{2000}}{R_{2000}^*}.$$

Учтем, что по закону Стефана-Больцмана энергетические светимости абсолютно черного тела в этих выражениях равны

$$R_T^* = \sigma \cdot T^4, \quad R_{2000}^* = \sigma \cdot (2000)^4.$$

Если считать, что потери энергии за счет теплопроводности и конвекции малы, т.е. вся подводимая к вольфрамовой нити лампы энергия электрического тока превращается в энергию излучения, то энергетическую светимость источника можно выразить через мощность $P_{ИСТ}$, которая рассеивается на нем:

$$R_T = \frac{P_{ИСТ}}{S},$$

где S – площадь излучающей поверхности.

Найдем отношение коэффициентов излучения

$$\frac{A_T}{A_{2000}} = \frac{R_T R_{2000}^*}{R_T^* R_{2000}} = \frac{P_{ИСТ} \sigma (2000)^4 S}{S \sigma T^4 P_{ИСТ.2000}} = \frac{(2000)^4}{P_{ИСТ.2000}} \cdot \frac{P_{ИСТ}}{T^4} = K \cdot \frac{P_{ИСТ}}{T^4}.$$

Величину K в последней формуле можно определить из выше описанных опытов по определению температуры, если в процессе измерений снимать дополнительно значения мощности, рассеиваемой источником. Это несложно сделать, так как источник излучения нагревается электрическим током, мощность которого при высоких температурах равна

$$P_{ИСТ} = UI, \tag{3}$$

где U - напряжение на вольфрамовой спирали источника теплового излучения,

I - сила тока в спирали.

Следовательно, для интегрального коэффициента излучения получаем формулу

$$A_T = A_{2000} \cdot K \cdot \frac{P_{ИСТ}}{T^4}, \quad (4)$$

где $K = \frac{(2000)^4}{P_{ИСТ.2000}}$,

$A = 0,249$.

Рекомендуемое задание к работе:

1. Заготовьте таблицу измерений следующих величин:
 - силы тока I , протекающего через источник теплового излучения;
 - соответствующего напряжения U на вольфрамовой спирали ,
 - величины относительной интенсивности первого и второго фотоприемника J_1/J_0 и

J_2/J_0 , которые будут сниматься с регистрирующего прибора.

- Кроме того, в таблице нужно заготовить столбцы для
- вычисленных значений мощности, выделяемой источником $P_{ИСТ}$,
 - отношения сигналов с фотоприемников J_1/J_2 ,
 - температуры нагретого тела T ,
 - интегрального коэффициента излучения A_T .

2. Установите малое значение напряжения накала. Установите регулятор J_0 прибора в определенное положение и не вращайте ее в процессе дальнейших измерений. Снимите показания J_1/J_0 и J_2/J_0 с цифрового индикатора измерителя относительной интенсивности теплового излучения. Снимите показания амперметра и вольтметра. Внесите показания в таблицу измерений.

3. Постепенно увеличивая напряжение генератора, снимите такие же показания (п. 2) при 8-ми – 10-ти различных температурах источника излучения.

4. Пользуясь рабочей формулой (2), вычислите температуры источника излучения при различных значениях мощности, выделяемой на источнике. Полученная при тарировочных опытах величина $Z_0 = 1,784$.

5. Вычислите по формуле (3) мощность, выделяющуюся на спирали источника излучения для каждого значения температуры. Обратите особое внимание на мощность при $T = 2000K$.

6. Пользуясь рабочей формулой (4), вычислите значения интегрального коэффициента излучения A_T источника в исследованном диапазоне температур и постройте график $A_T = f(T)$.