

ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВОЛЬФРАМА

Цель работы – экспериментальное исследование зависимости спектральной плотности энергетической светимости вольфрама от длины волны и температуры; определение температуры вольфрамовой нити накала лампы методом спектральных отношений; определение светового коэффициента полезного действия лампы накаливания.

52.1. Метод измерений и расчетные соотношения

Тепловым излучением называется электромагнитное излучение атомов и молекул, возбуждаемое за счет их теплового движения. Тепловое излучение наблюдается при любой температуре и содержит сплошной спектр – от инфракрасного излучения до видимого света и ультрафиолетового излучения. В теории теплового излучения особое значение имеет понятие равновесного излучения. Состояние системы является равновесным, если с течением времени распределение энергии между телом и излучением для каждого интервала длин волн не меняется, а убыль энергии тела (благодаря излучению) пополняется за счет его нагревания. Из всех видов излучения равновесным может быть только тепловое излучение. Характеристики равновесного теплового излучения определяется температурой тела; поэтому его называют также температурным излучением. Основными характеристиками теплового излучения являются:

1. *Энергетическая светимость* R – энергия, излучаемая в единицу времени единицей поверхности тела при данной температуре во всем диапазоне длин волн по всем направлениям в пределах пространственного угла 2π . Единица измерения энергетической светимости $[R] = \text{Вт}/\text{м}^2$.

2. *Спектральная плотность энергетической светимости тела* $r_{\lambda,T}$ – отношение энергии $d\Phi_{\lambda,T}$, излучаемой в единицу времени единицей поверхности тела при данной температуре в интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$, к значению этого интервала длин волн: $r_{\lambda,T} = \frac{d\Phi_{\lambda,T}}{d\lambda}$. В Международной системе (СИ) единица измерения спектральной плотности энергетической светимости $[r_{\lambda,T}] = \text{Вт}/\text{м}^3$. Для краткости величину $r_{\lambda,T}$ называют *испускательной способностью тела*.

3. *Поглощательная способность тела* $a_{\lambda,T}$ – отношение энергии поглощенной единицей поверхности тела в единицу времени $d\Phi'_{\lambda,T}$ в интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$ к падающей энергии $d\Phi_{\lambda,T}$:

$a_{\lambda,T} = \frac{d\Phi'_{\lambda,T}}{d\Phi_{\lambda,T}}$. Поглощательная способность тела – безразмерная вели-

чина; она может изменяться в пределах: $0 \leq a_{\lambda,T} \leq 1$.

Зависимость испускательной способности $r_{\lambda,T}^*$ абсолютно черного тела от длины волны и температуры описывается формулой Планка:

$$r_{\lambda,T}^* = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp[hc/\lambda kT] - 1}, \quad (52.1)$$

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

$r_{\lambda,T} \cdot 10^{-12}$,

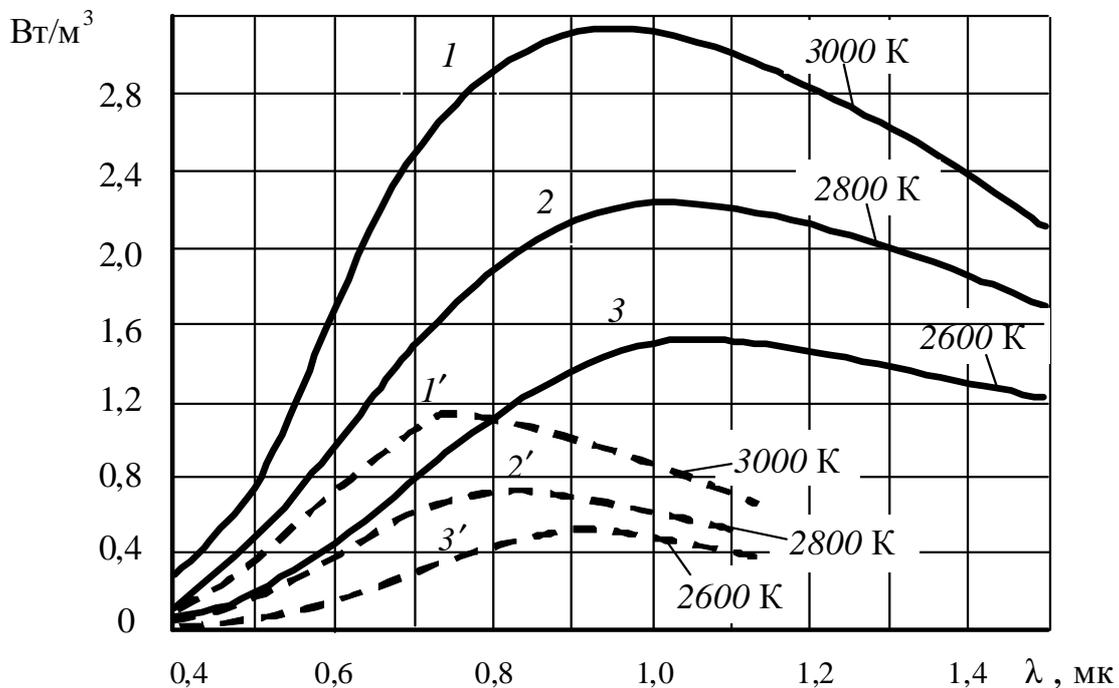


Рис. 52.1. Спектральная плотность энергетической светимости $r_{\lambda,T}^*$ для абсолютно черного тела (кривые 1, 2, 3) и $r_{\lambda,T}$ для вольфрама (кривые 1', 2', 3') в зависимости от длины волны излучения и температуры тела.

Согласно закону Кирхгофа, испускательная способность $r_{\lambda,T}$ тела может быть определена, если известна его поглощательная способность $a_{\lambda,T}$:

$$\frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}} = r_{\lambda,T}^* \quad (52.2)$$

Из формулы (52.2) следует, что энергия излучения реальных тел меньше, чем энергия излучения абсолютно черного тела, так как $a_{\lambda,T} < 1$. На рис.52.1 приведено распределение энергии в спектре излучения абсолютно черного тела и вольфрама при трех температурах. Видно, что длина

волны, при которой наблюдается максимум испускательной способности, уменьшается с увеличением температуры тела.

Вольфрам, в силу особенностей распределения энергии в спектре его излучения, применяется для изготовления нитей ламп накаливания. Это обусловлено тем, что вольфрам при рабочей температуре ламп накаливания (2600К) излучает в видимом интервале длин волн больше энергии, чем другие материалы. Однако и в случае использования вольфрамовых нитей накала, основная часть излучения приходится на инфракрасную область спектра. Введем понятие коэффициента световой отдачи лампы накаливания («световой КПД»), как отношение энергии, излучаемой в единицу времени в видимом интервале длин волн, к энергии, излучаемой во всем интервале длин волн от нуля до бесконечности (т.е. подводимой к источнику излучения мощности). Для вольфрамовых нитей накала «световой КПД» не превышает нескольких процентов.

Для определения температуры вольфрамовой нити накала лампы можно применить *метод спектральных отношений энергий излучения*. Схема метода представлена на рис.52.2. Метод основан на выделении двух узких (квазимонохроматических) участков спектра теплового излучения тела *1* с помощью спектрального оптического прибора *2*, преобразовании энергии выделенного излучения в электрический сигнал в приёмнике излучения *3* и определении отношения энергий излучения соответствующих двум близким значениям длин волн.

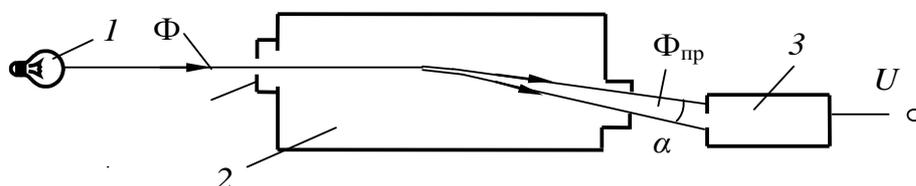


Рис. 52.2. Схема метода спектральных отношений энергии излучения

Рассмотрим узкий диапазон длин волн от λ до $\lambda + \Delta\lambda$, в котором испускательную способность $r_{\lambda,T}$ можно считать постоянной величиной. Плотность потока излучения $\Delta\Phi$ в узком диапазоне длин волн с учётом (52.2) выражается формулой

$$\Delta\Phi = a_{\lambda,T} r_{\lambda,T}^* \Delta\lambda .$$

Плотности потоков излучений $\Delta\Phi$ тела с температурой T для двух различных длин волн λ_1 и λ_2 при различных значениях диапазонов $\Delta\lambda_1$ и $\Delta\lambda_2$ равны соответственно

$$\Delta\Phi_1 = a_1 r_1^* \Delta\lambda_1, \quad \Delta\Phi_2 = a_2 r_2^* \Delta\lambda_2, \quad (52.3)$$

где a_1 и a_2 – спектральные поглощательные способности тела (вольфрама), r_1^* и r_2^* – испускательные способности абсолютно черного тела при длинах волн λ_1 и λ_2 соответственно. Для приемника, воспринимающего плотности потоков $\Delta\Phi_{\text{пр}1}$ и $\Delta\Phi_{\text{пр}2}$ падающего на него излучения

в двух различных узких диапазонах длин волн $\Delta\lambda_1$ и $\Delta\lambda_2$, величины этих потоков будут равны:

$$\Delta\Phi_{\text{пр1}} = K_1 a_1 r_1^* \Delta\lambda_1, \quad \Delta\Phi_{\text{пр2}} = K_2 a_2 r_2^* \Delta\lambda_2, \quad (52.4)$$

где K_1 и K_2 – коэффициенты использования потоков излучения измерительной системой. С помощью этих коэффициентов учитывается, что воспринимаемые приемником световые потоки $\Delta\Phi_{\text{пр1}}$ и $\Delta\Phi_{\text{пр2}}$ составляют некоторую часть от общего излучения источника. Значения коэффициентов K_1 и K_2 зависят от размеров приемника, расстояния от источника до приемника и наличием на пути излучения поглощающих сред, т.е. определяются такими параметрами измерительной системы, которые не изменяются в процессе опыта для выбранных длин волн. Рассмотрим отношение воспринимаемых приемником потоков излучения для двух длин волн

$$\frac{\Delta\Phi_{\text{пр1}}}{\Delta\Phi_{\text{пр2}}} = Y \frac{r_1^* \Delta\lambda_1}{r_2^* \Delta\lambda_2}, \quad Y = \frac{K_1 a_1}{K_2 a_2}.$$

Величины r_1^* и r_2^* определяются с помощью формулы Планка (52.1). Следовательно,

$$\frac{\Delta\Phi_{\text{пр1}}}{\Delta\Phi_{\text{пр2}}} = Y \frac{C_1 \lambda_2^5 [\exp(C_2/\lambda_2 T) - 1] \Delta\lambda_1}{C_1 \lambda_1^5 [\exp(C_2/\lambda_1 T) - 1] \Delta\lambda_2},$$

где $C_1 = 2\pi hc^2 = 3,742 \cdot 10^{-16}$ Вт·м², $C_2 = hc/k = 1,439 \cdot 10^{-2}$ м·К.

Оценим величину $\exp(C_2/\lambda T)$ и сравним ее с единицей. Пусть $T = 3000$ К, $\lambda = 1$ 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).

$$\frac{\Delta\Phi_{\text{пр1}}}{\Delta\Phi_{\text{пр2}}} = Y \frac{\lambda_2^5 \Delta\lambda_1}{\lambda_1^5 \Delta\lambda_2} \cdot \exp\left[\frac{C_2}{T} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right)\right].$$

Прологарифмируем это выражение и найдем из полученной формулы температуру тела T .

$$T = \frac{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right)}{\ln \frac{\Delta\Phi_{\text{пр1}}}{\Delta\Phi_{\text{пр2}}} - \ln Y - 5 \cdot \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1} + \ln \frac{\Delta\lambda_1}{\Delta\lambda_2}} \quad (52.5)$$

Напряжение U на выходе приемника излучения пропорционально плотности потока излучения $\Delta\Phi_{\text{пр}}$, попадающего на его входное окно:

$$U = \Delta\Phi_{\text{пр}} S F_0, \quad (52.6)$$

где U - напряжения на выходе приемника ($[U]=\text{В}$); S - чувствительность приемника излучения ($[S]=\text{В/Вт}$); F_0 - площадь области перекрытия входного окна приемника и выходной щели спектрометра. Будем считать, что в пределах выбранного диапазона длин волн λ_1 и λ_2 чувствительность S приемника и коэффициент K использования потока излучения постоянны. Ширина спектрального интервала $\Delta\lambda$ излучения на выходе из спектрометра определяется его угловой дисперсией D и выходной апертурой - углом α , под которым видна выходная щель прибора (рис.52.2):

$$\Delta\lambda = \frac{\alpha}{D}. \quad (52.7)$$

Тогда с учетом (52.6) и (52.7) соотношение (52.5) принимает вид:

$$T = \frac{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)}{\ln \frac{U_1}{U_2} - \ln \frac{a_1}{a_2} - 5 \cdot \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1} + \ln \frac{D_2}{D_1}}. \quad (52.8)$$

Отношение спектральных поглотительных способностей слабо зависит от температуры. Так, для длин волн 1,0 мкм и 1,4 мкм в интервале температур нити накала лампы 1600 – 2800 К, изменение отношения a_1/a_2 с температурой не превышает 5%. Отношение дисперсий D_2/D_1 в формуле (52.8) соответствует выбранным значениям длин волн и, следовательно, является постоянной величиной. Объединим члены формулы (52.8), содержащие постоянные величины, в две новые константы

$Z = C_2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)$ и $Z_0 = + \ln \frac{a_1}{a_2} + 5 \cdot \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1} - \ln \frac{D_2}{D_1}$. Тогда формула для определения температуры примет вид

$$T = \frac{Z}{\ln \frac{U_2}{U_1} + Z_0}. \quad (52.9)$$

Из формулы (52.9) видно что, зная величину Z_0 и рассчитав значение Z для выбранных длин волн λ_1 и λ_2 (длины волн должны быть выражены в метрах) можно, по измеренному в опыте отношению U_2 / U_1 , определить соответствующую температуру излучающего тела. Величина Z_0 , полученная из тарировочных опытов, представлена на стенде.

Из соотношений (52.3), (52.4) и (52.6) можно установить связь напряжения U на выходе приемника излучения и плотности потока излучения лампы:

$$\Delta\Phi_{\lambda,T} = \frac{U}{K \cdot F_0 \cdot S}, \quad (52.10)$$

где S – чувствительность приемника излучения.

Для того чтобы рассчитать испускательную способность, плотность потока излучения (52.10), приходящуюся на некоторый интервал $\Delta\lambda$ нужно разделить на спектральный интервал $\Delta\lambda$, определяемый выражением (52.7):

$$r_{\lambda,T} = \frac{\Delta\Phi_{\lambda,T}}{\Delta\lambda} = \frac{UD}{K \alpha F_0 S}. \quad (52.11)$$

Формулу (52.11) можно записать в виде:

$$r_{\lambda,T} = F \cdot U, \quad (52.12)$$

где F – коэффициент пересчёта напряжения U в испускательную способность, включающий в себя все коэффициенты предыдущей формулы (52.11). Для упрощения расчетов будем считать этот коэффициент не зависящим от длины волны.

Значение коэффициента F можно оценить по формуле:

$$F = \frac{a_{\lambda_1,T} \cdot r_{\lambda_1,T}^*}{U_1}, \quad (52.13)$$

где U_1 , $a_{\lambda_1,T}$, $r_{\lambda_1,T}^*$ – соответственно, показание вольтметра, поглощательная способность вольфрама и испускательная способность абсолютно черного тела для $\lambda_1 = 1,0$ мкм и температуре опыта T . Значения $a_{\lambda_1,T}$ при различных температурах представлены в табл.52.1. Расчет испускательной способности абсолютно черного тела выполняется по формуле Планка (52.1).

Таблица 52.1

Значения поглощательной способности вольфрама $a_{\lambda_1,T}$ для $\lambda_1 = 1,0$ мкм при различных температурах

T, K	$a_{\lambda_1,T}$
1600	0,390
1800	0,386
2000	0,380
2200	0,373
2400	0,370
2600	0,370
2800	0,367

52.2. Описание схемы установки

В настоящей лабораторной работе экспериментально измеряется распределение энергии в спектре излучения вольфрама, т.е. зависимость спектральной плотности энергетической светимости его излучения от длины волны. Схема экспериментальной установки представлена на рис.52.3. Свет от источника 1 (лампа накаливания с вольфрамовой нитью) поступает в монохроматор 2 – спектральный оптический прибор - монохроматор, выделяющий узкие (квазимонохроматические) участки спектра оптического излучения. Основной частью монохроматора является диспергирующий элемент 3, пространственно разделяющий излучение с различными длинами волн, отклоняя лучи на разные углы от первоначального направления.

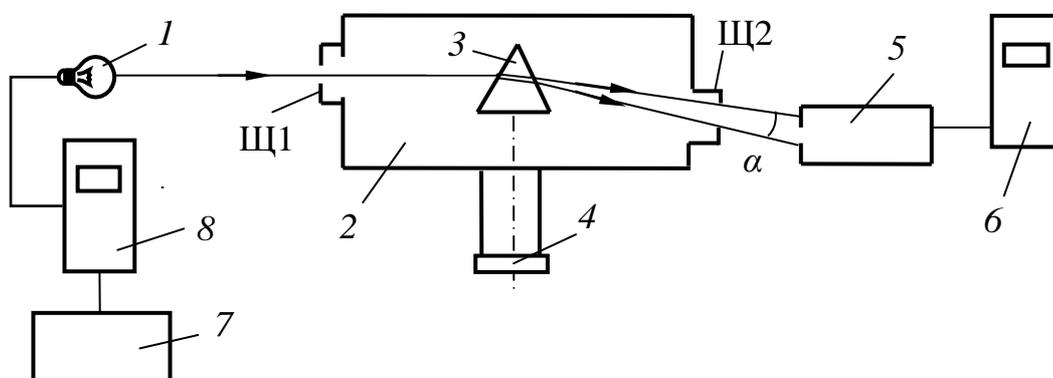


Рис. 52.3. Схема экспериментальной установки

Выделение нужного участка спектра осуществляется поворотом диспергирующего элемента на угол φ с помощью барабана 4. При этом излучение в узком спектральном интервале выводится из монохроматора через щель Щ2 (рис.52.2). В качестве диспергирующего элемента использованы две стеклянные призмы. Описание устройства двойного монохроматора ДМР-4, приведено в Приложении II.

Приемник излучения 5 (термоэлемент РТН-30С) имеет практически равномерную спектральную характеристику в исследуемом диапазоне длин волн: от 400 нм до 6000 нм.

52.3. Выполнение работы

1. Включить блок питания лампы накаливания и установить указанное на стенде значение силы тока накала I_1 , которому будет соответствовать температура нити накала T_1 .

2. Поворотом барабана монохроматора последовательно установить углы φ_1 и φ_2 , соответствующие длинам волн $\lambda_1 = 1,0$ мкм и $\lambda_2 = 1,4$ мкм, и измерить напряжения U_1 и U_2 на выходе приёмника излучения (градуировочная зависимость $\lambda(\varphi)$ монохроматора имеется в лаборатории). Измерения напряжений U_1 и U_2 повторить по три раза.

3. В диапазоне длин волн от 0,48 мкм до 3,10 мкм измерить напряжение U на выходе приемника. Шаг измерений 10° по шкале барабана монохроматора ДМР-4, в области максимума излучательной способности шаг измерений 4° .

4. Пункты 2-3 повторить при бóльшем значении силы тока накала лампы I_2 , указанном на стенде, которое будет соответствовать температуре нити $T_2 > T_1$.

52.4. Обработка результатов измерений

1. По формуле (52.9) по средним значениям напряжений U_1 и U_2 рассчитываются температуры T_1 и T_2 нити накала. *Значение полученной при тарировочных опытах константы Z_0 указано на стенде.*

2. С использованием градуировочной зависимости $\lambda(\varphi)$ монохроматора ДМР-4 определяются длины волн, соответствующие всем значениям измеренных углов установки барабана монохроматора.

3. По формуле (52.13) рассчитывается коэффициент F пересчета напряжения на приемнике излучения в испускательную способность $r_{\lambda,T}$. Значение поглощательной способности вольфрама $a_{\lambda_1,T}$ определяется по табл. 52.1.

4. По формуле (52.12) для двух значений температуры нити накала T_1 и T_2 рассчитываются значения испускательной способности $r_{\lambda,T}$.

5. На одной координатной плоскости строятся графики зависимости испускательной способности $r_{\lambda,T}$ от длины волны λ для двух значений температуры T_1 и T_2 нити накала.

6. Определяются площади под полученными для температур T_1 и T_2 кривыми распределения энергии. Площадь S_1 определяется во всем диапазоне длин волн, где показания вольтметра выше фона. Площадь S_2 - в диапазоне длин волн видимого света (от минимально установленного значения до 770 нм). Рассчитывается «световой КПД» вольфрамовой лампы накаливания по формуле:

$$\eta = \frac{S_2}{S_1} \cdot 100 \% .$$