

Раздел 5

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

Работа 5.1

Изучение законов теплового излучения

Оборудование: источник теплового излучения (нихромовая спираль в виде цилиндра), механический модулятор светового потока, набор инфракрасных фильтров, сферическое зеркало, пироэлектрический приемник излучения, лампа накаливания, пирометр с исчезающей нитью.

Введение

Тепловое излучение является по своей природе электромагнитным и возникает вследствие изменения энергетических положений атомов, ионов, из которых состоит тело. Излучение энергии в этом случае происходит при охлаждении тела.

Характер теплового излучения зависит не только от типа квантовых переходов, но и от агрегатного состояния вещества. Если спектр излучения нагретых газов является дискретным, то твердые тела имеют сплошной спектр.

Тепловое излучение тела при его неизменной температуре носит *равновесный* характер. Если температура тела поддерживается постоянной за счет поглощения телом теплового излучения из окружающей среды, то говорят, что тело находится в состоянии термодинамического равновесия с окружающей средой.

Абсолютно черным называется тело, которое поглощает лучи всех длин волн, падающих на него. Соответственно при определенной температуре абсолютно черное тело излучает максимальную энергию. В природе таких источников нет. Однако возможно создание источников теплового излучения, очень близких к абсолютно черным по своим характеристикам.

Одной из основных количественных характеристик теплового излучения тела является его *лучеиспускательная способность* (спектральная плотность) ($r_{\lambda, T}$):

$$r_{\lambda, T} = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)},$$

где λ — длина волны излучения, $C_1 = 2hc^2$, $C_2 = \frac{hc}{k}$, h — постоянная Планка, T

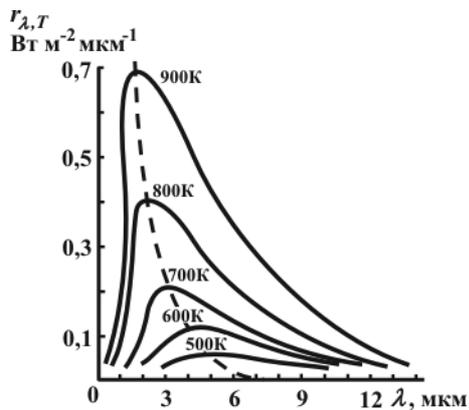


Рис. 5.1

— абсолютная температура, k — постоянная Больцмана, c — скорость света в вакууме.

Величина $r_{\lambda, T}$ зависит от длины волны и абсолютной температуры. Изотермы спектральной плотности излучения абсолютно черного тела в диапазоне температур от 500 до 900 К показаны на рис. 5.1.

Они представляют собой плавные кривые с одним максимумом. Полный поток излучения (энергетическую светимость) можно определить следующим образом:

$$R_T = \int_0^{\infty} r_{\lambda, T} d\lambda = \sigma T^4. \quad (1)$$

Уравнение (1) выражает сущность закона Стефана — Больцмана. Распределение энергии излучения по длинам волн не является равномерным. Для некоторой длины волны при определенной температуре тела наблюдается максимум энергии излучения

$$\lambda_{\max} T = b, \quad (2)$$

где λ_{\max} — длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности излучения; b — постоянная Вина ($b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$). При увеличении температуры тела T максимум энергии излучения сдвигается в сторону коротких длин волн.

Уравнение (2) является аналитическим выражением закона смещения Вина.

Энергетическая светимость реальных тел (R'_T) меньше, чем энергетическая светимость (R_T) абсолютно черного тела.

$$\alpha = \frac{R'_T}{R_T}, \quad (3)$$

где α — коэффициент излучения. Соотношение (3) отражает одну из формулировок закона Кирхгофа.

Описание установки. Схема лабораторной установки показана на рис. 5.2. Поток излучения от нихромовой спирали 1 модулируется во времени, проходит через оптический фильтр 4 и после отражения от сферического зеркала 5 падает на пироэлектрический приемник 6. Модуляция осуществляется для увеличения точности измерений с помощью обтюратора 2, который приводится во вращение электродвигателем 3. Оптический фильтр позволяет выделить из потока излучения энергию в узком спектральном интервале. Имея набор фильтров,

пропускающих различные длины волн λ , можно по результатам измерений построить спектральную характеристику излучения нагретого тела. Сферическое зеркало создает изображение источника излучения в плоскости чувствительной площадки пироприемника. Чувствительность приемника практически постоянна в диапазоне длин волн 2 — 20 мкм. Обработка сигнала фотоприемника осуществляется электронным блоком 6 с цифровым вольтметром 7 и блоком питания 8.

Порядок выполнения работы

Задание 1. Проверка закона Стефана — Больцмана и закона смещения Вина.

1. Включите источник излучения.
2. Установите температуру T_1 .
3. После прогрева установки (10 — 15) минут приступайте к измерениям.

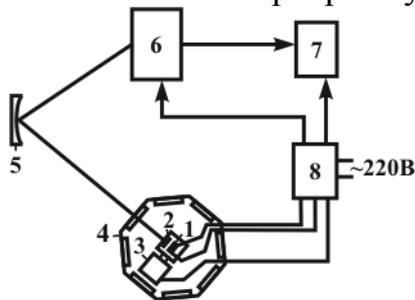


Рис. 5.2

4. Поворотом ручки блока фильтров по часовой стрелке установите в рабочее состояние фильтр № 1.

5. Включите двигатель модулятора и не выключайте его до конца измерений.

6. Сделайте отсчет напряжения (U) на числовом индикаторе цифрового вольтметра. Если на индикаторе высвечивается цифра 1 (после запятой цифры не светятся), то надо нажать кнопку «2 диапазон» (при этом показания индикатора надо увеличить в 3 раза).

7. Последовательно меняя фильтры, снимите показания цифрового вольтметра для каждого из них.

8. Проведите аналогичные измерения для температур T_2 и T_3 . После перехода к новой температуре надо выждать 5 минут до начала проведения измерений.

9. Используя данные таблицы 1 (соответствия длин волн номеру светофильтра), постройте графики зависимости $U(\lambda)$ для трех температур. Графики следует строить на миллиметровой бумаге, выбирая масштаб по оси длин волн (ось абсцисс) — 1 мкм — 20 мм, а по оси напряжения (ось ординат) — 1В — 50 мм.

Таблица 1

№ фильтра	1	2	3	4	5	6	7
λ_{\max} , мкм	2,08	2,51	3,21	3,90	4,59	6,21	8,40

10. После окончания измерений выключите модулятор и источник излучения.

11. На основе графиков $U(\lambda)$ определите значения λ_{\max} для температур T_1 , T_2 и T_3 .

12. По формуле (2) вычислите значения соответствующих температур T_i и сравните полученные значения с паспортными данными установки: $T_1 = 900$ К, $T_2 = 740$ К, $T_3 = 630$ К.

13. Определите площади S_{T_1} , S_{T_2} и S_{T_3} , ограниченные осью абсцисс и кривыми излучения $U(\lambda)$ в диапазоне 0 — 10 мкм.

14. Проверьте выполнение равенства:

$$\frac{S_{T_1}}{T_1^4} = \frac{S_{T_2}}{T_2^4} = \frac{S_{T_3}}{T_3^4} = \text{const}.$$

Полученный результат будет являться подтверждением выполнения закона Стефана — Больцмана.

15. Экспериментально измерьте величину U_T , пропорциональную R_T для трех температур. В этом случае установите нейтральный ослабитель (№ 8) и проверьте выполнение равенства:

$$\frac{U_{T_1}}{T_1^4} = \frac{U_{T_2}}{T_2^4} = \frac{U_{T_3}}{T_3^4} = \text{const}.$$

16. Результаты измерений запишите в таблицу:

$U(\lambda)$	Номер фильтра								λ_{\max} , мкм	T , К	S_T
	1	2	3	4	5	6	7	8			
$U(T_1)$											
$U(T_2)$											
$U(T_3)$											

Задание 2. Определение температуры с помощью пирометра.

Схема пирометра с исчезающей нитью приведена на рис. 5.3. Нить накала L лежит в фокальной плоскости объектива $Об$, который в этой плоскости создает изображение исследуемого источника S . С помощью реостата R изменяют накал нити до тех пор, пока ее яркость не сравняется с яркостью источника. Наблюдение ведут через окуляр $Ок$. По шкале пирометра V определяют яркостную температуру T_j исследуемого источника излучения. Обозначения на схеме: B — батарея накала; K — тумблер; F — светофильтр, определяющий область наблюдения; P — регулятор яркости нити; Φ — ручка светофильтра.

1. Включите источник излучения (лампу накаливания) и пирометр.
2. Получите изображение источника в фокальной плоскости объектива.

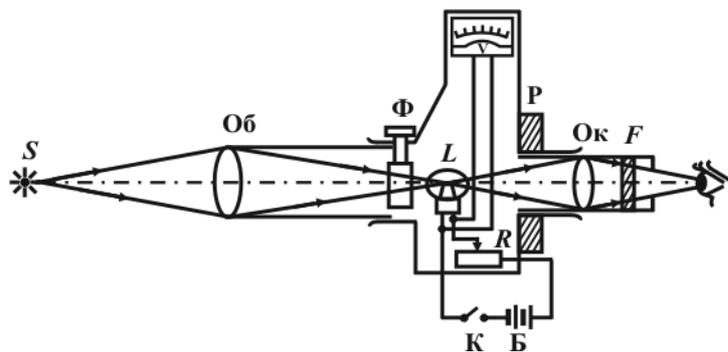


Рис. 5.3

3. Сравните яркость нити пирометра и источника излучения.

4. По шкале пирометра определите яркостную температуру источника T_y .

5. По формуле

$$T = \frac{T_y}{1 - \frac{k\lambda T_y}{2\pi ch} \ln \alpha_{\lambda, T}}$$

определите

истинную температуру источника

излучения.

Примечание. Коэффициент поглощения для вольфрама в области наблюдения $\lambda = 600$ нм, $\alpha_{\lambda, T} = 0,46$.



КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какова природа теплового излучения?
2. Дайте определение энергетической светимости тела.
3. Что называется излучающей способностью тела?
4. Дайте определение поглощающей способности тела.
5. Какие условия будут определять состояние термодинамического равновесия тела с окружающей средой?
6. Какое тело называют абсолютно черным? Приведите примеры абсолютно черных тел.
7. Сформулируйте основные законы теплового излучения.
8. Чему равна постоянная Стефана — Больцмана?
9. Почему закон Вина называется законом смещения?
10. Объясните принцип работы пирометра с исчезающей нитью.