

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Департамент молекулярной и биологической физики

ИЗМЕРЕНИЕ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР МЕТОДОМ ЯРКОСТНОЙ ПИРОМЕТРИИ

Лабораторная работа

Составитель П.С. Вервикишко

МОСКВА
МФТИ
2016

УДК 53.082.52

Рецензент

Доктор физико-математических наук *С.И. Ткаченко*

Измерение высоких температур методом яркостной пирометрии : лабораторная работа / сост. П.С. Вервикишко. – М. : МФТИ, 2016. – 20 с.

Цель лабораторной работы – ознакомить студентов с бесконтактными измерениями температуры объекта, нагреваемого лазерным излучением, методом яркостной пирометрии. В работе кратко излагаются основы законов теплового излучения тел и применения их в пирометрии для измерения температур нагретых тел.

Предназначено для студентов 3–4 курсов факультетов молекулярной и химической физики и биологической и медицинской физики, изучающих курс «Физические методы исследования».

УДК 53.082.52

© Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)», 2016
© Вервикишко П.С., сост., 2016

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Теория излучения черного тела	4
2. Яркостная температура и излучательная способность вещества	6
3. Яркостный пирометр	7
4. Конструкция пирометра	8
5. Калибровка пирометра	9
6. Оценка погрешностей	11
7. Лазерный нагрев	14
8. Порядок выполнения работы	15
9. Обработка результатов	17
10. Контрольные вопросы	17
Приложение	18
Литература	18

Введение

Слово *пирометрия* произошло от греческого $\pi\rho$ – огонь и применяется для описания методов определения температуры тела по его тепловому излучению. Приборы для измерения температуры данными методами получили название *Пирометр*, первые пирометры были созданы еще в XIX веке, в XX веке пирометры постоянно улучшались, в середине 1980-х годов с применением кремниевых детекторов сфера применения приборов существенно расширилась. Измерение температуры происходит при сравнении мощности излучения исследуемого объекта и эталонного источника, температура которого известна. Температура, регистрируемая таким методом, получила название *яркостная*. В данном контексте «яркостная» означает, что температура определена при сравнении с мощностью излучения эталона без учета оптических свойств конкретного объекта; для определения истинной термодинамической температуры необходимо ввести поправку, соответствующую излучательной способности исследуемого объекта. Излучательная способность не может быть определена достаточно точно, так как она зависит не только от вещества, но и от формы конкретной излучающей поверхности (например, шероховатости). Излучательная способность имеет значительный вклад в поправку к температуре в том случае, если яркостная температура исследуемого объекта существенно отличается от температуры эталона, обладающего такой же яркостью. В этом случае возникает значительная погрешность в определении температуры – несколько десятков градусов при измерении реальных температур порядка 3000 К. Это принципиально отличает метод яркостной пирометрии, например, от контактных методов, с помощью которых температура определяется с большей точностью (вплоть до 0,01 К в случае термомпары, свойства которой хорошо известны). Однако пирометрия является незаменимым методом при измерении высоких температур (более 2500 К). В этом случае контактные методы неприменимы из-за возможных химических реакций материала измерительного прибора и анализируемой среды. Стоит однако отметить, что область применимости метода пирометрии также ограничена температурами, при которых образуется плазма. Высокотемпературные измерения актуальны для решения задач в областях энергетики, аэрокосмической отрасли, материаловедении, а также иных научных исследованиях, связанных с изучением свойств веществ в экстремальных состояниях.

1. Теория излучения черного тела

Как известно, излучение электромагнитной энергии происходит в результате перехода системы (атомов, молекул и т.д.) из состояния с большей энергией в состояние с меньшей энергией. *Тепловое излучение* отли-

чается от других видов излучения способом возбуждения излучающих систем, который в данном случае осуществляется в результате теплового движения атомов и молекул. Подробнее про тепловое излучение и его свойства можно прочитать в [1].

Методы пирометрии применяют для измерения температур нагретых тел без их механического контакта с термодатчиком. Для определения температуры осуществляют измерение мощности теплового излучения, поэтому данный метод относится к бесконтактным. Вследствие того, что оптические свойства (излучательная способность, коэффициенты отражения и прозрачности) реальных тел могут сильно различаться, невозможно установить универсальный закон, позволяющий характеризовать излучение каждого конкретного тела. По этой причине все законы, приведенные ниже, справедливы только для абстрактного тела с коэффициентом излучения (излучательной способностью) равным 1, такой объект называется *абсолютно черное тело* (далее АЧТ).

Объемная спектральная плотность излучения АЧТ задается формулой Планка:

$$E_{\lambda,T} = C_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1} \Delta\lambda \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right], \quad (1)$$

здесь

$$C_1 = 2\pi h c^2 = (3.7413 \pm 0.0002) \cdot 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2,$$

$$C_2 = \frac{hc}{k} = (1.4380 \pm 0.001) \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{град}^{**}.$$

Формула (1) задает спектральное распределение энергии излучаемой в полусфере единицей поверхности, нагретой до температуры T , иногда для описания $E_{\lambda,T}$ используют термин *светимость*. Формулу (1) можно применять для оценки мощности излучения поверхности с температурой T в спектральном интервале $\Delta\lambda$, середина которого характеризуется длиной волны λ .

В случае, когда $h\nu/kT \ll 1$, можно воспользоваться приближением Рэля–Джинса:

$$E_{\lambda,T} = \frac{2\pi c}{\lambda^4} kT \Delta\lambda \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]. \quad (2)$$

В случае, когда $h\nu/kT \gg 1$, можно воспользоваться приближением Вина:

$$E_{\lambda,T} = C_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} \right)^{-1} \Delta\lambda \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]. \quad (3)$$

Для вычисления суммарной мощности излучения АЧТ в полусферу по всем длинам волн используют формулу Стефана–Больцмана:

$$E_{T_4} = \sigma T^4, \quad (4)$$

здесь $\sigma = 5,6687 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})^4$ – постоянная Стефана–Больцмана. В случае излучения реального тела суммарная мощность излучения с единицы поверхности отличается от излучения АЧТ на коэффициент α , называемый *интегральной излучательной способностью* тела.

2. Яркостная температура и излучательная способность вещества

Ввиду того, что излучение реальных тел отличается от излучения АЧТ, для описания их излучения с помощью формул (1) – (4) необходимо ввести поправку на *степень черноты* (или *излучательную способность*). Процессы поглощения лучистой энергии и ее излучение взаимнообратные, способность тел поглощать лучистую энергию характеризуется коэффициентом поглощения α , который равен отношению интенсивностей поглощенного телом потока энергии к интенсивности упавшего на него потока энергии. Отношение излучательной и поглощательной способностей не зависит от природы тела, а является для всех тел одной и той же функцией длины волны и температуры (*закон Кирхгофа*). Допустим, мы имеем два тела, одно является абсолютно черным, другое имеет отличную от единицы степень черноты. *Яркостной температурой* тела в лучах с длиной волны λ называется такая температура АЧТ, при которой *яркости* (т.е. светимости в единицу телесного угла) обоих тел в свете одной и той же длины волны равны между собой. Обозначим через $\varepsilon_{\lambda,T}$ степень черноты тела для длины волны λ и температуры T , тогда мощность излучения с единицы поверхности реального тела при температуре T в спектральном интервале $\Delta\lambda$, середина которого характеризуется длиной волны λ , можно записать:

$$E_{\lambda,T} = \varepsilon_{T,\lambda} \cdot C_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1} \Delta\lambda \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]. \quad (5)$$

Аналогичный вид имеет формула Вина для реальных тел:

$$E_{\lambda,T} = \varepsilon_{T,\lambda} \cdot C_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} \right)^{-1} \Delta\lambda \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]. \quad (6)$$

Для измерения температур от 1000 до 5000 К на длинах волн, лежащих в видимой и ближней ИК-областях, для расчета температуры пирометрическими методами используют формулу Вина, так как линеаризация функции (1) существенно облегчает вывод формул пирометрии. При этом необходимо помнить, что отклонения от формулы Планка могут давать существенную ошибку в некоторых диапазонах длин волн и температур. В дальнейшем мы будем пользоваться только формулой Вина, однако полезно знать диапазон применимости этой формулы и отклонения по температуре.

Используя определение яркостной температуры и формулу (6), получим следующее соотношение:

$$\varepsilon_{T,\lambda} \cdot C_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T_{\text{я}}}} \right)^{-1} \Delta\lambda = C_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T_{\text{и}}}} \right)^{-1} \Delta\lambda, \quad (7)$$

где $T_{\text{я}}$ и $T_{\text{и}}$ – яркостная и истинная термодинамическая температура соответственно.

После сокращения и логарифмирования получим

$$\frac{1}{T_{\text{я}}} - \frac{1}{T_{\text{и}}} = \frac{\lambda}{C_2} \ln \frac{1}{\varepsilon_{\lambda,T}}. \quad (8)$$

Формула (8) связывает яркостную и истинную температуры реального тела через спектральную излучательную способность (монохроматическую степень черноты) $\varepsilon_{T,\lambda}$.

3. Яркостный пирометр

Пирометрические методы применяют для бесконтактного определения температуры нагретых тел посредством измерения мощности теплового излучения исследуемых объектов. Существует несколько видов пирометрии, среди них яркостная, цветовая и радиационная. Данная работа посвящена изучению яркостной пирометрии, методам калибровки яркостного пирометра и его применению. Для измерения яркостной температуры применяют косвенный метод, сначала измеряют мощность излучения исследуемой поверхности с температурой T в спектральном интервале $\Delta\lambda$ середина которого характеризуется длиной волны λ , затем, применяя калибровочную функцию пирометра, рассчитывают яркостную температу-

ру. Для получения истинной термодинамической температуры по формуле (8) необходимо знать значение монохроматической излучательной способности исследуемого тела. Для определения этого коэффициента нужно провести отдельный эксперимент, в работе будут использоваться табличные значения излучательной способности.

4. Конструкция пирометра

На рис. 1 представлена схема установки, используемой в данной работе. Свет от объекта фокусируется объективом пирометра на зеркальную диафрагму. Диафрагма представляет собой тонкую зеркальную пластинку с отверстием диаметром около 300 мкм в центре. Фокусное расстояние объектива 200–300 мм.

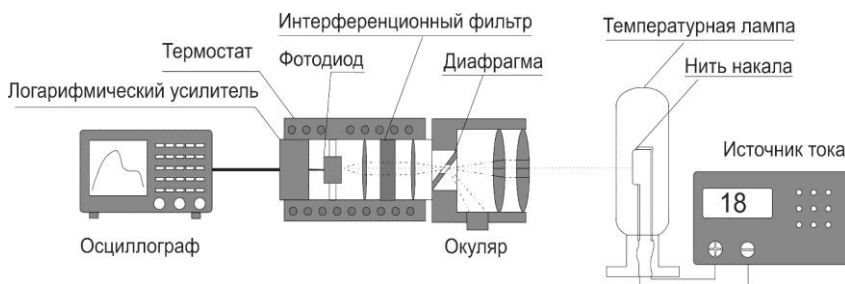


Рис. 1. Схема лабораторной установки

Свет, прошедший сквозь диафрагму, попадает на интерференционный фильтр, который вырезает из всего спектра участок шириной 10 нм с центральной длиной волны 650 нм (рис. 2). Система линз фокусирует полученный монохроматический пучок на детектор. Фототок от детектора преобразуется логарифмическим усилителем $\log 114$ согласно формуле

$$U = 0,375 = \log \left(\frac{I}{I_0} \right), \quad (9)$$

где I – ток с фотодиода, I_0 – референсный ток на входе усилителя. Референсный ток определяется делением напряжения питания усилителя (2.5 В) на значение сопротивления, стоящего непосредственно перед входом усилителя. В работе его значение составляет порядка 1 мкА. Для того чтобы повысить точность измерений, производится стабилизация температуры логарифмического усилителя с помощью термостата.

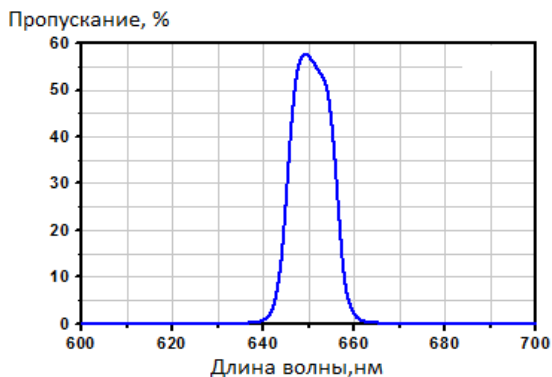


Рис. 2. Спектральная характеристика интерференционного фильтра пирометра

Воспользуемся приближением Вина (3), логарифмируя данную функцию, получаем линейную зависимость $\ln(E)$ от T^{-1} . Сравним полученную зависимость с функцией логарифмического усилителя, учитывая, что фототок линейно зависит от мощности излучения, падающего на фотодиод, получим, что зависимость выходного напряжения должна быть линейной функцией от обратной температуры.

5. Калибровка пирометра

Для того чтобы привязать значения напряжения на выходе пирометра к значениям температуры, необходимо провести калибровку по эталонному источнику. Для калибровки яркостных пирометров применяют температурные лампы. Лампа состоит из вакуумной или газонаполненной колбы, внутри которой закреплена вольфрамовая лента и электроды. Лампа подключается к стабилизированному источнику тока, пирометр фокусируют в центр ленты и подают ток на ламу. Температурная лампа имеет паспорт или сертификат поверки, в котором указаны значения тока и соответствующая яркостная температура ленты. Стоит отметить, что в паспорте указаны значения с учетом всех поправок, таких как поглощение света стеклом колбы и др. Поэтому при выполнении калибровки очень важно правильно расположить пирометр и лампу на оптическом столе. Пучок лучей, отраженный от внутренней поверхности колбы и попадающий затем на ленту, отражается преимущественно в направлении, перпендикулярном ее поверхности. По этой причине, визируя пирометр на ленту под разными углами вблизи нормального, можно получить различные значения яркостной температуры при одном и том же значении тока. Поэтому следует устанавливать пирометр так, чтобы его оптическая ось была строго перпендикулярна ленте. Для облегчения процесса позицио-

нирования пирометра на лампу нанесены специальные метки, перед началом работы преподаватель продемонстрирует вам способ наведения с их использованием.

После включения лампы в цепь необходимо дождаться наступления теплового равновесия внутри лампы, в газонаполненных лампах процесс стабилизации теплового потока замедляется из-за конвекции. Время установления равновесия в используемой лампе составляет около 30 минут. При незначительном изменении тока время установления теплового баланса не столь велико и при переходе между соседними температурными точками достаточно подождать 5 минут. Калибровочная таблица температурной лампы представлена ниже (табл. 1).

Таблица 1

**Яркостная температура нити температурной лампы
в зависимости от величины протекающего через нее тока**

Температура, К	Ток через лампу, А
1547	13,000
1631	14,000
1707	15,000
1776	16,000
1841	17,000
1904	18,000
1964	19,000
2022	20,000
2078	21,000
2133	22,000
2186	23,000
2239	24,000
2290	25,000
2341	26,000
2389	27,000
2437	28,000
2484	29,000

Как было описано выше, выходное напряжение пирометра должно быть линейной функцией от обратной температуры, таким образом, после калибровки должна получиться функция вида $U = a + \frac{b}{T}$, где a и b – коэффициенты линейной аппроксимации калибровочных данных, а U и T

– выходное напряжение пирометра и температура соответственно. Выходное напряжение определяется по формуле (9), фототок – мощностью излучения падающего на фотодиод в спектральном интервале $\Delta\lambda$, середины которого характеризуется длиной волны λ , $I/I_0 \sim E_{\lambda,T}$, подставляя вместо $E_{\lambda,T}$ формулу (3), получим:

$$U = 0,375 \log \left(C_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} \right)^{-1} \right), \quad (10)$$

$$U = \frac{0,375}{\ln(10)} \ln \left(C_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} \right)^{-1} \right) = \frac{0,375}{\ln(10)} \left(\ln(C_1 \lambda^{-5}) - \frac{C_2}{\lambda T} \right). \quad (11)$$

Сравнивая калибровочную функцию $U = a + \frac{b}{T}$ и выражение (11), получим

$$b = -\frac{0,375}{\ln(10)} \cdot \frac{C_2}{\lambda}. \quad (12)$$

Откуда легко получается выражение для эффективной длины волны λ .

Смысл данных расчетов заключается в проверке соответствия рабочей (эффективной) длины волны пирометра (определяемой в данном случае характеристиками светофильтра) и калибровочной длины волны температурной лампы. Дело в том, что данные, представленные в табл. 1, справедливы для длины волны 650 нм. Ввиду того, что излучательная способность вольфрама не является константой, яркостная температура на другой длине волны при неизменном токе через лампу будет отличаться. В таком случае необходимо вводить дополнительную поправку на излучательную способность для получения точной калибровочной функции. В данной работе эффективная длина волны пирометра совпадает с «цветом» калибровочных температур ($\lambda = 650$ нм).

6. Оценка погрешностей

Возникновение ошибок при измерении температуры может быть обусловлено следующими причинами:

- 1) низкое соотношение сигнал/шум в требуемом диапазоне температур;
- 2) ошибки при измерении калибровочных точек температурной лампы и, как следствие, нарастание ошибки при экстраполяции;
- 3) наличие поглощающей среды в промежутке между пирометром и объектом (газ, окно камеры...);

- 4) несоответствие эффективной длины волны пирометра и калибровочных данных.
1. Несмотря на то, что диапазон измерений пирометра с логарифмическим усилителем достаточно широк и составляет, как правило, не менее 3000 К, при низких температурах ($T < 1000$ К) отношение сигнал/шум мало и ошибка измерений температуры будет существенной. Действительно, при низких температурах максимум функции Планка находится в инфракрасной области, а на пирометрическую длину волны (650 нм) приходится незначительная доля мощности излучения. Это приводит к тому, что значения фототока, поступающего на вход логарифмического усилителя, получаются крайне низкими. При токах менее 1 мкА логарифмический усилитель находится в области нелинейности, иными словами, выходное напряжение $U \neq 0,375 \cdot \log(I/I_0)$, поэтому измерения температуры в этой области некорректны.
 2. Неточность измерения выходного напряжения, отличия значения тока через лампу от представленных в табл. 1, невыполнение правил юстировки приборов, указанных выше, и много другое могут привести к ошибкам регистрации калибровочных точек. Для проверки калибровочной функции необходимо построить кривую в координатах $U[1/T]$, точки должны ложиться на линию с достаточно высокой точностью, т.к. даже незначительная ошибка в диапазоне калибровки приведет к серьёзным отклонениям при экстраполяции в область высоких температур. Для того чтобы оценить, насколько хорошо калибровочные данные ложатся на прямую, необходимо посчитать *коэффициент детерминации*. Уравнение линейной парной регрессии выглядит следующим образом: $Y = a + bX$, где Y – функция независимой переменной X ; параметры уравнения могут быть определены, например, с помощью метода наименьших квадратов. Для анализа степени приближения уравнения регрессии используют множественный коэффициент детерминации R^2 , называемый также квадратом коэффициента множественной корреляции R . R^2 всегда находится в пределах интервала $[0;1]$. Значение R^2 , равное единице, означает, что построенная модель полностью объясняет всю изменчивость соответствующих переменных. Если значение R^2 близко к нулю, построенная модель не описывает анализируемые данные.
- Применительно к вопросу построения калибровочной функции: коэффициент детерминации R^2 показывает, на сколько процентов построенная функция регрессии описывает связь между значениями U и $1/T$.

Рассмотрим пример расчета коэффициента детерминации. Построим несколько точек с небольшим отклонением от прямой, Y_i – исходные данные, Y_i^M – данные, полученные из регрессионной модели, $\langle Y \rangle$ – значение, полученное при усреднении всех экспериментальных значений.

Дисперсия, или вариация Y , характеризует степень случайного разброса значений функции регрессии около среднего значения Y :

$$\left(Y_i - \langle Y \rangle \right)^2; \quad (13)$$

- сумма квадратов остатков регрессии, та величина, которую мы минимизируем при построении прямой, часть дисперсии, которая нашим уравнением не объясняется, т.е. данные выходят за рамки используемой модели:

$$\left(Y_i - Y_i^M \right)^2; \quad (14)$$

- часть общей вариации, которая объяснима в рамках модели:

$$\left(Y_i^M - \langle Y \rangle \right)^2; \quad (15)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \left(Y_i^M - \langle Y \rangle \right)^2}{\sum_{i=1}^n \left(Y_i - \langle Y \rangle \right)^2}. \quad (16)$$

В нашем случае приемлемое значение R^2 для калибровочной функции не менее 0,999, что обеспечивает точность определения температуры в несколько градусов при измерениях температур порядка 2000 К.

3. Наличие поглощающей среды в промежутке между пирометром и объектом необходимо учитывать так же, как и степень черноты реального объекта. Обратите внимание на вывод формулы (8), она получена из формулы Вина (3) с учетом поправки на свойства излучения реальных тел, согласно закону Кирхгофа. В случае поглощения излучения в промежуточной среде логика вывода формул аналогичная, таким образом получим результирующую формулу для расчёта истинной температуры:

$$\frac{1}{T_{\text{я}}} - \frac{1}{T_{\text{и}}} = \frac{\lambda}{C_2} \ln \frac{1}{\varepsilon_{\lambda, T} \tau}, \quad (17)$$

где τ – коэффициент поглощения промежуточной среды.

4. Допустим, температурная лампа отградуирована в яркостных температурах для длины волны λ_1 . Если по этому же излучению осуществляется градуировка пирометра с эффективной длиной

волны λ_2 , то в результатах градуировки пирометра возникнет погрешность. Вывод формулы погрешности достаточно громоздкий, и здесь представлен лишь окончательный результат:

$$\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_{\text{цвет}}} \right), \quad (18)$$

$T_{\text{цвет}}$ – *цветовая температура* – такая температура АЧТ, при которой отношение монохроматических интенсивностей излучения в двух длинах волн λ_2, λ_1 у черного и нечерного тел одинаково;

$$\frac{E_{\lambda_1, T}}{E_{\lambda_2, T}} = \frac{E_{\lambda_1, T_{\text{цвет}}}^0}{E_{\lambda_2, T_{\text{цвет}}}^0}. \quad (19)$$

Используя формулу Вина для реальных тел (6), можно вывести соотношение для температур:

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\text{цвет}}} = \frac{\ln \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}}{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)}. \quad (20)$$

Формула (20) выражает связь между истинной температурой и цветовой для нечерного тела в зависимости от величины отношения его монохроматических коэффициентов черноты $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ в двух длинах волн λ_2, λ_1 .

В соответствии с формулой (18) для оценки погрешности, обусловленной несоответствием эффективной длины волны пирометра и калибровочных данных лампы, необходимо знать значения спектральной излучательной способности вольфрама для двух длин волн в широком диапазоне температур (см. Приложение).

7. Лазерный нагрев

Метод лазерного нагрева широко применяется в теплофизических экспериментах благодаря возможности предотвратить контакт исследуемого объекта с нагревателем или тиглем. Это достигается в результате реализации так называемого плавления в собственном тигле. Данное преимущество особенно важно для тугоплавких материалов, так как изменение химического состава исследуемого образца в результате химической реакции с тиглем может существенно повлиять на результат температурных измерений. Часть образца нагревается импульсом лазерного луча та-

ким образом, что температура на периферии образца остается достаточно низкой, поэтому взаимодействия с держателем не происходит. В таких исследованиях температура нагретой поверхности, как правило, определяется методом оптической пирометрии, а точка фазового перехода – по характерному плато на термограмме, полученной в процессе охлаждения жидкости и ее кристаллизации. Плато на термограмме можно объяснить тем, что при кристаллизации жидкости выделяется тепловая энергия, позволяющая поддерживать постоянное значение температуры достаточно долгое время. Необходимо отметить, что при нагреве и переходе из твердой фазы в жидкую плато на термограмме практически не наблюдается. Это вызвано следующими факторами: диссипация энергии лазерного излучения происходит в тонком поверхностном слое, масса расплава нарастает медленно, а температура поверхности растет непрерывно. Поэтому на этапе нагрева на термограмме в точке плавления виден только излом, причем кривая роста температуры достаточно гладкая и точно определить температуру появления жидкой фазы не представляется возможным.

В данной работе для нагрева используется отпаянный CO_2 -лазер, который представляет собой газоразрядную трубку и резонатор. Мы не будем вдаваться в подробности устройства и принципа действия CO_2 -лазера, а лишь отметим основные его особенности. Излучение CO_2 -лазера имеет узкую полосу с центром 10,6 мкм, его не видно глазом, и оно не проникает через большинство материалов. Прозрачными для данного излучения являются элементы, преимущественно 2–6 групп таблицы Д.И. Менделеева, а также некоторые другие соединения. Наиболее удобным с точки зрения прозрачности и практичности является соединение ZnSe , из которого изготавливают выходные зеркала лазера, линзы, окна.

8. Порядок выполнения работы

1. Включите компьютер и запустите программу Руго.
2. Включите блоки питания пирометра в розетку.
3. Установите регулятор тока на источнике Б5-30-30М в крайнее левое положение и включите источник.
4. Поворотом ручки регулятора тока установите значение 8А, температурная лампа начнет светиться.
5. Наведите пирометр на нить лампы. Для этого, во-первых, отцентрируйте пирометр – сделайте так, чтобы центр передней линзы пирометра, центр ленты лампы (отмеченный специальной риской) и точка на задней поверхности лампы лежали приблизительно на одной прямой. Во-вторых, сфокусируйте пирометр на ленте: это можно сделать двумя способами:
 - получить четкое изображения объекта, глядя в окуляр пирометра и смещая его по оси, перпендикулярной поверхности объекта.

При этом при смещении глаза относительно окуляра изображения объекта и диафрагмы не должны смещаться относительно друг друга;

– осветить окуляр фонариком и получить резкое изображение диафрагмы (черная точка) на объекте, двигая пирометр.

6. По сравнительному размеру черной точки можно судить о размере области, в которой измеряется температура, наведите черную точку на центр нити накала лампы в область, отмеченную иглой внутри лампы.
7. Измеряйте значение напряжения на выходе из логарифмического усилителя (соответствующее окно программы Pyro) пирометра в зависимости от тока, подаваемого на лампу. Значения тока устанавливайте согласно табл. 1. Время установления тока не должно быть менее трех минут. Для более точного определения значения тока к источнику питания подключен шунт и точный вольтметр. Определяйте значение тока через ламу исходя из показаний вольтметра и сопротивления шунта.
8. Проведите измерения на стадии возрастания и убывания тока.
9. Возьмите у преподавателя образец исследуемого вещества.
10. Установите образец в держатель, поверхность образца должна быть чистой, в противном случае удалите грязь металлическим шпателем.
11. Сфокусируйте пирометр в центр образца.
12. Оденьте защитные очки.
13. Включите блок охлаждения CO₂-лазера.
14. Добейтесь фокусировки лазерного излучения в центр образца, для этого попросите преподавателя продемонстрировать методику наведения лазера.
15. Включите источник питания CO₂-лазера, для этого поверните по часовой стрелке и разблокируйте кнопку аварийного отключения, загорится лампа «высокое напряжение».
16. Нажмите на кнопку «Пуск», убедитесь, что излучение CO₂-лазера попадает в центр образца, выключите пилотный лазер.
17. В программе PYRO установите время записи – 5–10 секунд. Нажмите на старт и мгновенно нажмите на кнопку «Пуск» блока управления лазером и удерживайте ее около одной секунды. На экране появится термограмма эксперимента. Нажмите «Сохранить», укажите имя файла, например EXP1.txt.
18. Проведите 5 измерений и сохраните их результаты в файлы.
19. Выключите источник питания, для этого нажмите на кнопку аварийного отключения. Выключите блок охлаждения. Отключите пирометр от сети.

9. Обработка результатов

1. Используя результаты калибровки, постройте функцию $U(1/T)$, где T – температура, U – напряжение пирометра. Проведите интерполяцию прямой линией и найдите уравнение для полученной прямой.
2. Проверьте линейность калибровки, для этого посчитайте коэффициент детерминации данной функции.
3. Используя линейную функцию интерполяции, вычислите эффективную длину волны пирометра. Проверьте, совпадает ли рабочая длина волны пирометра с длиной волны интерференционного фильтра.
4. Постройте калибровочную функцию пирометра $T(U)$ и пересчитайте полученные в п. 17 кривые в температуру.
5. Оцените ошибку, вызванную использованием приближения Вина.
6. Оцените суммарную ошибку измерения температуры.

10. Контрольные вопросы

1. Что описывает формула Планка? Нарисуйте примерный график зависимости мощности излучения от температуры на одной длине волны.
2. Оцените отклонения в определении температуры по формуле Вина на длине волны 0,65 мкм при температурах 2000–6000 К с шагом 500 К.
3. Какими оптическими свойствами характеризуется абсолютно черное тело?
4. Интегральная излучательная способность полированного графита при температуре 1000 °С равна $\alpha = 0,658$. Можно ли считать излучение, выходящее из отверстия в торце полого цилиндра диаметром D и длиной L выполненного из данного графита, эквивалентным излучению абсолютно черного тела с площадью поверхности, равной площади торца цилиндра, при условии $D \ll L$ и температуре 1000 °С, 2000 °С, 500 °С?
5. Запишите закон Стефана–Больцмана.
6. Запишите формулу Рэлея–Джинса, оцените диапазон температур (предложите критерий оценки) применения этой формулы в пирометрии.
7. Запишите формулу Вина, оцените диапазон температур (предложите критерий оценки) применения этой формулы в пирометрии.
8. Какие методы измерения температур вы знаете?

9. Формулу Стефана–Больцмана можно получить, проинтегрировав формулу Планка по всему спектру, каково будет отличие в конечной формуле, если проинтегрировать формулу Рэлея–Джинса?
10. Получите из формулы (1) формулу (2).
11. Получите из формулы (1) формулу (3).
12. Какая температура выше: яркостная или истинная?
13. Какая температура выше: цветовая или истинная?
14. Сделайте оценку мощности излучения с единицы поверхности на длине волны 650 нм при температурах 5000 °С, 1000 °С, 2000 °С.

Приложение

Таблица 2

**Значения излучательной способности $\epsilon_{\lambda,T}$ вольфрама
в зависимости от длины волны при разных температурах**

λ , мкм	T , К				
	1600	1800	2000	2200	2400
0,58	0,45	0,447	0,443	0,440	0,437
0,60	0,447	0,444	0,440	0,437	0,434
0,62	0,445	0,441	0,437	0,433	0,430
0,64	0,442	0,438	0,434	0,430	0,426
0,66	0,441	0,436	0,432	0,428	0,424
0,68	0,440	0,435	0,430	0,426	0,421

Литература

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики Т. 4. Оптика. – М.: Физматлит, 2005. – 792 с.
2. Гордов А.Н. Основы пирометрии. – М.: Металлургия, 1964. – 472 с.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Учебное издание

ИЗМЕРЕНИЕ
ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР
МЕТОДОМ ЯРКОСТНОЙ ПИРОМЕТРИИ

Лабораторная работа

Составители: **Вервикишко** Павел Сергеевич

Редактор *Л.В. Себова*. Корректор *О.П. Котова*
Компьютерная верстка *Л.В. Себова*.

Подписано в печать 01.09.2016. Формат 60 × 84 ¹/₁₆. Усл. печ. л. 1,25
Уч.-изд. л. 1,1. Тираж 85 экз. Заказ № 000

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)»,
141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
Тел. (495) 408-58-22, e-mail: rio@mipt.ru

Отдел оперативной полиграфии «Физтех-полиграф»
141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
Тел. (495) 408 84 30, e-mail: polygraph@mipt.ru