

ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Поверхность любого тела излучает электромагнитные волны в очень широком диапазоне частот (длин волн). Поток излученной энергии существенным образом зависит от свойств излучающей поверхности и ее температуры. Обычно рассматривают *тепловое излучение*, т. е. испускание электромагнитных волн за счет внутренней энергии тел. Тепловое излучение является равновесным, если излучающее тело находится в состоянии термодинамического равновесия с полем его излучения. Все остальные виды излучения не являются равновесными и называются *люминесценцией*. Тепловое излучение является *изотропным* и имеет сплошной спектр.

Для характеристики теплового излучения вводят функцию, называемую *интегральной лучеиспускающей способностью* или *интегральной энергетической светимостью* $R(T)$ [1]–[3]. Последняя имеет физический смысл энергии, испускаемой единицей поверхности тела за единицу времени при температуре T в интервале длин волн или частот от 0 до ∞ .

Для характеристики энергии, излучаемой единицей поверхности тела за единицу времени при температуре T в единичном интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$ или частот от ω до $\omega + d\omega$, используется понятие *спектральной лучеиспускающей способности* или *спектральной энергетической светимости* тела ($r(\lambda, T)$ и $r(\omega, T)$ соответственно):

$$r(\lambda, T) = \frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda}, \quad r(\omega, T) = \frac{dR(\omega, T)}{d\omega}, \quad r(\lambda, T) = \frac{2\pi c}{\lambda^2} r(\omega, T).$$

Спектральная и интегральная светимости тела связаны соотношением

$$R(T) = \int_0^{\infty} f(\lambda, T) d\lambda.$$

Наряду с излучением может происходить и обратное преобразование энергии. Энергия электромагнитного излучения поглощается веществом, т. е. трансформируется во внутреннюю энергию тела. Мерой поглощения энергии телом служит *спектральная поглощательная способность* $a(\lambda, T)$ или $a(\omega, T)$, показывающая, какую долю потока энергии, падающего на поверхность тела в интервале длин волн $(\lambda, \lambda + \Delta\lambda)$ или частот $(\omega, \omega + \Delta\omega)$, поглощает данное тело:

$$a(\lambda, T) = \frac{d\Phi(\lambda, T)_{\text{погл}}}{d\Phi(\lambda, T)_{\text{пад}}}, \quad a(\omega, T) = \frac{d\Phi(\omega, T)_{\text{погл}}}{d\Phi(\omega, T)_{\text{пад}}}$$

Тело, которое полностью поглощает энергию электромагнитных волн ($a(\lambda, T) = 1$ для всех длин волн), называют *абсолютно черным телом* (АЧТ). Следует отметить, что понятие АЧТ является абстракцией, в природе АЧТ не существует.

Если спектральная поглощательная способность тела в некоторой области спектра меньше единицы и может считаться постоянной ($a(\lambda, T) = \text{const} < 1$), т. е. не зависит от длины волны, то в этой области спектра тело считается *серым*. Понятие серого тела также является значительным приближением.

Спектральные лучеиспускательная и поглощательная способности тела зависят от длины волны или частоты излучения, температуры тела, свойств тела и состояния его поверхности. Взаимосвязь между ними описывается законом Кирхгофа (1859): *отношение спектральной лучеиспускательной способности тела $r(\lambda, T)$ к его спектральной поглощательной способности $a(\lambda, T)$ не зависит от природы тела, а является универсальной функцией его абсолютной температуры и длины волны излучения. Данная функция $f(\lambda, T)$ получила название функции Кирхгофа:*

$$\frac{r(\lambda, T)}{a(\lambda, T)} = r^*(\lambda, T) = \varphi(\lambda, T). \quad (5.1)$$

Так как для АЧТ поглощательная способность $a(\lambda, T) = 1$, то функция Кирхгофа есть не что иное, как спектральная лучеиспускательная способность абсолютно черного тела $r^*(\lambda, T)$ (далее функции и величины, относящиеся к АЧТ, будут обозначаться верхним индексом «*»).

Графики, иллюстрирующие зависимость лучеиспускательной способности АЧТ (функции Кирхгофа) от длины волны и частоты при различных температурах, приведены на рис. 5.1.

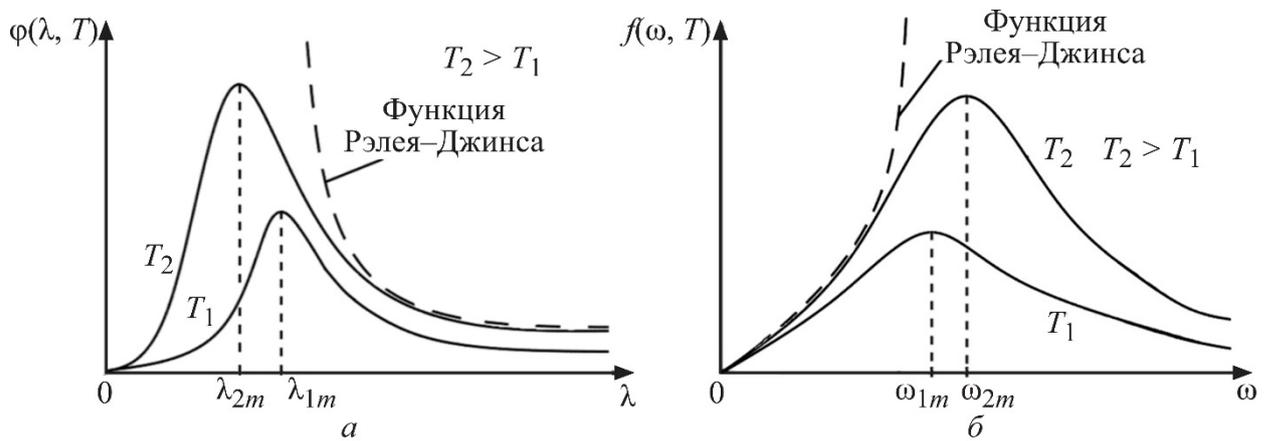


Рис. 5.1. Зависимость функции Кирхгофа от длины волны (а) и от частоты (б) при различных температурах

Как видно, обе кривые стремятся к нулю при больших и малых частотах и длинах волн. Положение максимума функции $\varphi(\lambda, T)$ при повышении температуры сдвигается в сторону меньших длин волн. Вильгельм Вин (1893) установил, что длина волны λ_{\max} , соответствующая максимуму функции Кирхгофа $\varphi(\lambda, T)$, обратно пропорциональна абсолютной температуре тела.

Это утверждение получило название «закон смещения» Вина:

$$\lambda_{\max} = b/T, \quad (5.2)$$

где $b = 2.90 \cdot 10^{-3}$ м · К – постоянная Вина.

Экспериментальные (1879 г., Йозеф Стефан) и теоретические (1884 г., Людвиг Больцман) исследования позволили сформулировать закон Стефана–Больцмана, который гласит: интегральная лучеиспускательная способность (энергетическая светимость) АЧТ пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры:

$$R(T) = \int_0^{\infty} f(\omega, T) d\omega = \sigma T^4, \quad (5.3)$$

где $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ Дж/(м² · К) – постоянная Стефана–Больцмана.

Попытка объяснить вид графиков и закономерности теплового излучения исходя из законов классической физики была предпринята Рэлеем и Джинсом. Из уравнений Максвелла для электромагнитного поля следует, что излучение АЧТ эквивалентно системе бесконечного числа независимых осцилляторов. Методами статистической физики и с учетом того, что согласно классическим законам средняя энергия осциллятора $\langle \varepsilon \rangle = kT$, Рэлей и Джинс получили следующее выражение для функции Кирхгофа, названной в их честь формулой Рэля–Джинса:

$$f(\omega, T) = \frac{\omega^2}{4\pi^2 c^2} kT, \quad (5.4)$$

где $k = 1.38 \cdot 10^{23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с скорость света в вакууме.

Формула (5.4) достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными в области малых частот (больших длин волн), но резко расходится при переходе к коротковолновой части излучения. На рис. 5.1 данный график изображен штриховой линией. Как видно из графиков, при $\omega \rightarrow \infty$ выражение (5.4), полученное Рэлеем и Джинсом, стремится к бесконечности, хотя в эксперименте $r^*(\omega, T)$ стремится к нулю. В литературе некоторое время употреблялся даже термин «ультрафиолетовая катастрофа», поскольку к концу XIX в. теория электромагнитного поля (волновая теория) считалась самодостаточной, т. е. способной описать любые явления и процессы, связанные с излучением и поглощением электромагнитных волн. Физики того времени пытались найти неточности в выводе Рэля и Джинса, но безуспешно.

Только отказ от некоторых представлений классической физики позволил дать объяснение свойствам излучения черного тела. Первому это удалось сделать Макс Планку (1900). Планк выдвинул гипотезу о том, что энергия электромагнитного излучения испускается в виде отдельных порций ε_0 , которые он назвал квантами энергии, причем энергия ε_0 должна быть пропорциональна частоте излучения: $\varepsilon_0 = h\nu = \hbar\omega$, где $h = 6.625 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – коэффициент пропорциональности, получивший название «постоянная Планка». Часто используется еще одна постоянная Планка $\hbar = h/2\pi = 1.05 \cdot 10^{-34}$ Дж·с. Исходя из своего предположения, Планк получил выражение для спектральной лучеиспускательной способности АЧТ (функции Кирхгофа):

$$\varphi(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/(kT\lambda)} - 1}, \quad (5.5)$$

где c – скорость света; k – постоянная Больцмана.

Выражение (5.5) носит название «формула Планка». Из анализа формулы Планка легко получить закон смещения Вина (5.2), а также закон Стефана–Больцмана (5.3).

Зависимость длины волны для максимума теплового излучения, определяемая законом смещения Вина (5.2), хорошо известна из повседневного опыта. Так, при комнатной температуре λ_{\max} приходится на далекую инфракрасную область и не регистрируется человеческим глазом,

так что излучение воспринимается как тепло. При повышении температуры появляется видимое свечение, изменяясь от вишнево-красного до белого. Спектральные свойства излучения нагретых тел широко используются в науке и технике для бесконтактного определения температуры. Здесь надо иметь в виду, что на спектральном составе и интенсивности излучения сильно сказывается отличие свойств тела от АЧТ. Степень серости исследуемых тел, как правило, неизвестна и обычно зависит от частоты излучения. Поэтому вводят три вида температур:

- 1) цветовая – температура, определяемая законом смещения Вина;
- 2) яркостная – температура, определяемая по закону Стефана–Больцмана, при которой АЧТ имеет при определенной длине волны ту же монохроматическую яркость, что и данное тело;
- 3) истинная температура тела, которая может быть вычислена, если известна яркостная.

При бесконтактном определении температуры пользуются разного рода приборами, называемыми пирометрами. Так, в оптическом пирометре, яркостную температуру измеряют визуально, сравнивая цвет нагретого тела с цветом подогреваемой электрическим током нити, температура которой определяется по протекающему по ней току. Ток в нити изменяют до тех пор, пока она не перестанет быть видимой на фоне исследуемого нагретого тела. Заметим, что оптическая пирометрия является почти единственным способом определения температуры сильно нагретых тел и, что особенно важно, тел, достаточно удаленных от наблюдателя.

Лабораторная работа 5.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НАГРЕТОГО ТЕЛА

Макет и первое описание данной лабораторной работы были разработаны на кафедре физики СПбГЭТУ «ЛЭТИ» [4].

Цели работы: экспериментальное измерение яркостной и истинной температур накаливаемого тела (тонкой металлической пластины); проверка закона Стефана–Больцмана.

Приборы и принадлежности: пирометр с исчезающей нитью, исследуемое тело (металлическая лента лампы накаливания), амперметр, вольтметр. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 5.2. В фокусе объектива О зрительной трубы пирометра расположена нить электрической лампы Л, изогнутая в форме полуокружности. Через окуляр Ок и светофильтр Ф

наблюдатель видит среднюю часть нити на фоне поверхности тела (пластины), температуру которого требуется определить. С помощью потенциометра R регулируется ток в нити и яркость ее свечения. После включения кнопкой K нагрева нити, ток, проходящий через нить лампы, регулируют до тех пор, пока нить не исчезнет (сольется с фоном пластины). Это соответствует равенству монохроматической яркости нити лампы пирометра и накаливаемого тела (пластины).

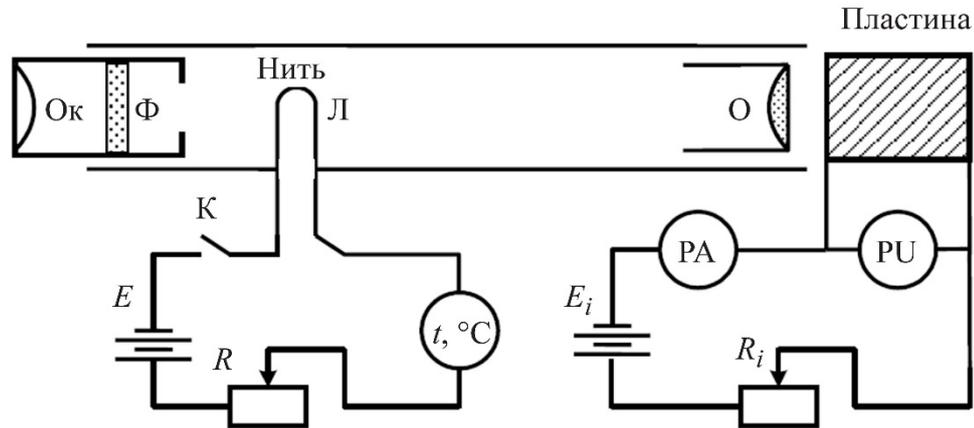


Рис. 5.2. Схема экспериментальной установки

Оптический пирометр прокалиброван по абсолютно черному телу. Шкала амперметра, измеряющего силу тока в нити, оцифрована в градусах по шкале Цельсия и определяет температуру нити (модели АЧТ).

Электрическая схема нагрева пластины содержит источник тока, амперметр PA для измерения силы тока I в пластине, который регулируется потенциометром R_i , и вольтметр PU для определения падения напряжения U на пластине. На рис. 5.3 приведен внешний вид экспериментальной установки, в которой практически реализована схема рис. 5.2.



Рис. 5.3. Внешний вид экспериментальной установки

Исследуемые закономерности. Методика эксперимента

Объектом исследования в работе является нагретая до высокой температуры тонкая металлическая пластина, которую можно считать серым телом, поглощательная способность которого равна $a(\omega, T) = 0.92$ при длине волны 665 нм и $a(\omega, T) = 0.95$ при длине волны 660 нм . В процессе эксперимента измеряются мощность Джоуля–Ленца $P = UI$, выделяемая в

пластине, переходящая в мощность теплового излучения пластины $P_{Т.и}$. В условиях теплового равновесия $P = P_{Т.и} = a(\omega, T) \cdot S \cdot \sigma \cdot T^4$. Для измерения температуры T пластины в работе используется неконтактный термометр (оптический пирометр).

Через окуляр зрительной трубы пирометра наблюдатель видит светящуюся нить (основная часть пирометра) на фоне светящейся поверхности исследуемого тела (рис. 5.4, а). Увеличение силы тока в нити пирометра приводит к возрастанию ее температуры и яркости свечения. При определенной яркости нить становится невидимой (рис. 5.4, б) на фоне светящейся поверхности. Если бы оба тела (нить и пластина) являлись абсолютно черными телами, то одинаковая яркость их свечения свидетельствовала бы о равенстве их температур. В экспериментальной же установке нить пирометра является эквивалентом АЧТ, а нагреваемая пластина относится к классу серых тел. Поэтому при одинаковой яркости черного и серого тел их истинные температуры T^* и T будут различны.

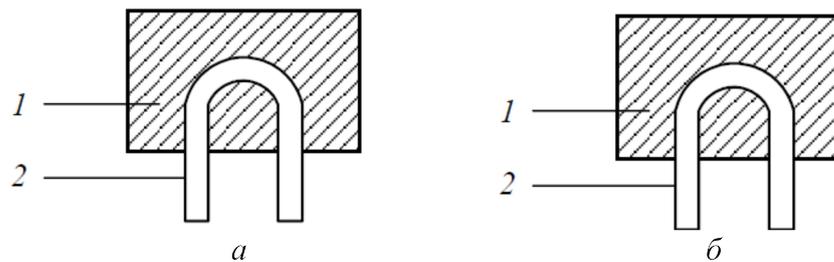


Рис. 5.4. Видимое изображение нагретой нити 2 на фоне светящейся поверхности исследуемого тела при разной (а) и одинаковой (б) светимости тел

Оптический пирометр проградуирован по температуре АЧТ, и в опыте измеряется яркостная температура T^* нити. Чтобы найти связь этой температуры с истинной температурой T пластины, надо приравнять спектральные яркости АЧТ и серого тела $b_{\lambda, T^*}^0 = b_{\lambda, T}$ для данной длины волны. Так как между спектральной яркостью и спектральной лучеиспускательной способностью существует прямая пропорциональность [5] $r_{\lambda, T} = \pi b_{\lambda, T}$, то

$$r^*(\lambda, T^*) = r(\lambda, T). \quad (5.6)$$

В спектральной области видимого света, где $\lambda \sim 10^{-7}$ м, для температур $T \leq 2000$ К, это позволяет вычислять спектральные лучеиспускательные способности АЧТ и серого тела по приближенным формулам (приближение Вина) [5]:

$$r^*(\lambda, T) \approx \frac{C_1}{\lambda^5} e^{\frac{-c_2}{\lambda T^*}}, \quad r(\lambda, T) \approx a(\lambda, T) \frac{C_1}{\lambda^5} e^{\frac{-c_2}{\lambda T}}. \quad (5.7)$$

Здесь введены обозначения: $C_1 = 2\pi c^2 h = 3.74 \cdot 10^{-16}$ Вт·м², а $C_2 = \frac{hc}{k} = 1.439 \cdot 10^{-2}$ м·К.

После подстановки выражений (5.7) в (5.6) и последующего логарифмирования этого уравнения получаем связь между истинной температурой T тела (пластины) и температурой T^* АЧТ (нити), регистрируемой пирометром:

$$T = \frac{C_2 T^*}{C_2 + \lambda T^* \ln(a(\lambda, T))}. \quad (5.8)$$

В (5.8) входит длина волны излучения, пропускаемого светофильтром пирометра, равная $\lambda_1 = 600$ нм для желтого светофильтра, и $\lambda_2 = 665$ нм – для красного.

Зная истинную температуру тела, по закону Стефана–Больцмана (5.3) можно определить излучаемую им мощность, которая в условиях термодинамического равновесия равна мощности постоянного тока, протекающего через пластину:

$$a(\lambda, T) S \cdot \sigma T^4 = IU,$$

где I – сила тока; U – напряжение на пластине. Логарифмируя это выражение, получим

$$\ln(a(\lambda, T) S \sigma) + 4 \ln T = \ln I + \ln U.$$

Если построить график, где по оси абсцисс отложить $\ln T$, а по оси ординат $\ln I + \ln U$, то получится прямая линия, тангенс угла наклона которой должен быть равен 4. Точка пересечения прямой линии с осью ординат имеет координату, равную $\ln(a(\lambda, T) S \sigma) = \ln a(\lambda, T) + \ln S + \ln \sigma$.

Задания для подготовки к лабораторной работе

1. Изучить теоретические сведения, изложенные в общих сведениях раздела 5 и в подразделе «Исследуемые закономерности» описания лабораторной работы 5.1.

2. Подготовить протокол наблюдений с таблицей для записи результатов эксперимента, где должны быть предусмотрены места для записи следующих экспериментальных данных: силы тока (I), протекающего через пластину,

падения напряжения (U) на ней, значения температуры нити пирометра t [$^{\circ}\text{C}$], используемого цвета светофильтра и соответствующей длины волны. Кроме того, необходимо заготовить таблицу для дальнейшей обработки результатов наблюдений, куда будут заноситься: абсолютная температура нити пирометра $T^* = t$ [$^{\circ}\text{C}$] + 273 К, истинная температура пластины T , вычисленная по (5.8), и значения натуральных логарифмов функций $\ln I$, $\ln U$, $\ln T$.

Указания по проведению эксперимента

1. Включить тумблер питания установки. Вращением рукоятки потенциометра R_i (см. рис. 5.2) установить минимальную силу тока в пластине (см. указания на крышке установки), до появления *минимального* видимого свечения. Установить диапазон измерения температуры 1400 $^{\circ}\text{C}$ и соответствующий ему желтый светофильтр.

2. Включить накал нити пирометра с помощью кнопки К. Регулируя силу тока в нити с помощью потенциометра R , добиться исчезновения видимого ее изображения на фоне светящейся поверхности пластины (см. рис. 5.4, б). Результаты измерений температуры нити t [$^{\circ}\text{C}$], силы тока в пластине I и падения напряжения U на ней записать в таблицу.

3. Повторить цикл измерений, описанный в пп. 1 и 2 при других значениях силы тока I в пластине с шагом примерно 0.5 А (см. указания на крышке установки). При достижении температуры 1400 $^{\circ}\text{C}$ диапазон измерения переключить на 2000 $^{\circ}\text{C}$, установить красный светофильтр и продолжить измерения температуры нити с тем же шагом. Всего должно быть не менее 10 изменений температуры. Результаты совместных измерений физических величин I , U , температуры, а также цвет светофильтра записать в таблицу.

4. Измерить температуру на каждом шаге 2 раза: в режиме увеличения и уменьшения силы тока в нити.

Указания по обработке результатов наблюдений

1. Используя данные эксперимента, найти: абсолютную температуру нити пирометра $T^* = t$ [$^{\circ}\text{C}$] + 273 К; истинную температуру пластины T , вычисленную по (5.8); значения натуральных логарифмов функций $\ln I$, $\ln U$, $\ln T$ для каждого значения I , U и T . Результаты расчетов занести в таблицу.

2. Построить график функции $Y = AX + B$, где $Y = \ln I + \ln U$, $X = \ln T$. Используя метод наименьших квадратов (МНК) при обработке результатов совместных измерений (см. приложение), найти средние значения и погрешности измерений величин $A = \bar{A} \pm \Delta A$ и $B = \bar{B} \pm \Delta B$. Оценить соответствие этих параметров закону Стефана–Больцмана.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение теплового излучения и перечислите его основные свойства.

2. Что означает: тепловое излучение является равновесным?

3. Как называются виды излучения, отличные от теплового?

4. Сформулируйте основные законы теплового излучения: Кирхгофа, Стефана–Больцмана, Вина.

5. Назовите основные характеристики теплового излучения.

6. Что такое оптическая пирометрия? Какой прибор используется для измерения температуры в оптическом пирометре и в каких единицах он проградуирован?

7. Дайте определение АЧТ и серого тела. Какое тело в данной работе является АЧТ, а какое серым телом. Температуру какого из этих тел измеряет пирометр в данной работе, а температура какого рассчитывается? Как называется эта температура и почему?

8. Объясните, в чем заключалась «ультрафиолетовая катастрофа» теории Рэля–Джинса.

9. Напишите формулу Планка для спектральной энергетической светимости АЧТ $r^*(\lambda, T^*)$. Каким образом вывести из этой формулы закон смещения Вина и закон Стефана–Больцмана?

10. Постройте графики функции Кирхгофа для двух значений температур T_1 и $T_2 > T_1$.

Список литературы

1. Сивухин Д. В. Общий курс физики: учеб. пособие для вузов: в 5 т. Т. V: Атомная и ядерная физика. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 784 с.

2. Савельев И. В. Курс общей физики: учеб. пособие: в 3 т. Т. 3: Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. – СПб.: Лань, 2007. – 320 с.

3. Иродов И. В. Квантовая физика. Основные законы: учеб. пособие для вузов. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. – 272 с.

4. Волновая и квантовая оптика: руководство к выполнению лабораторных работ по физике: в 2 ч. Ч. 2 / под ред. А. Г. Граммакова; ЛЭТИ. – Л., 1975. – 58 с.

5. Фриш С. Э., Тиморева А. В. Курс общей физики: учеб.: в 3 т. Т. 3: Оптика. Атомная физика. – СПб.: Лань, 2009. – 656 с.