

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА»

ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ

Кафедра физики

Ф И З И К А

Часть V. ОПТИКА

Методические указания и задания
для самостоятельной работы студентов

Санкт-Петербург
2020

УДК 53(07)
ББК 22.343
Ф 503

Физика. Ч. V. Оптика: методические указания и задания для самостоятельной работы студентов /сост.: А.Л. Ашкалунин, М.Н. Полянский; ВШТЭ СПбГУПТД. - СПб., 2020.- 25 с.

Методические указания содержат индивидуальные задания по оптике. Предназначается для студентов всех направлений и специальностей.

Рецензент: зав. кафедрой физики ВШТЭ СПбГУПТД, канд. физ.-мат. наук
Е.А. Яшкевич

Подготовлено и рекомендовано к печати кафедрой физики ВШТЭ СПбГУПТД (протокол № 7 от 23 апреля 2015г.)

Утверждено к изданию методической комиссией института энергетики и автоматизации ВШТЭ СПбГУПТД (протокол № 4 от 06.05.2015г.)

ПРЕДИСЛОВИЕ

Индивидуальные задания посвящены 7 темам по геометрической, волновой, и квантовой оптике. Студент выполняет по одному заданию из каждой темы. Обычно студенту выдается **двухзначный номер** варианта, который позволяет в задачах взять необходимые данные из таблиц 1 и 2: **первая** цифра номера варианта обозначает номер строки данных из таблицы 1, **вторая** цифра – из таблицы 2.

Задание выполняется в отдельной школьной тетради, каждая задача начинается с новой страницы. Полное и краткое условие задачи переписывается в том варианте, в котором её следует решать. Если в таблице наименование величин не указано, то она дана в системе СИ.

Решение должно быть полным, со всеми необходимыми рисунками. При защите студент должен уметь объяснить решение любой задачи, знать определение и свойства используемых физических величин, формулировки и смысл используемых физических законов.

ТЕМА 1. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

В вакууме световые волны любых длин распространяются с одной и той же скоростью $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. В веществе свет распространяется с другой скоростью, различной для разных веществ. На границе двух сред с разными скоростями света происходит частичное преломление и отражение света. При этом выполняется закон преломления: *отношение синуса угла падения к синусу угла преломления равно отношению скоростей света в этих средах:*

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = n_{21},$$

где: n_{21} – показатель преломления второй среды относительно первой ($n_{21} = n_2 / n_1$).

Отношение скорости света в вакууме к скорости света в среде $n = c/v$ называется *абсолютным показателем преломления* вещества.

Показатель преломления и скорость света в веществе зависит от длины волны – это явление называется *дисперсией*.

Явление дисперсии используется в призмных спектроскопах для разложения «белого» света в спектр. В линзах дисперсия света приводит к нежелательному явлению – *хроматической абберации*, т.е. зависимости положения изображения от длины волны. Расстояние между положениями изображения для двух длин волн называется хроматизмом положения. Для уменьшения хроматической абберации используют линзы, склеенные из стекла двух видов с разными показателями преломления и разной величиной

дисперсии – при этом одна линза «положительная», а другая -«отрицательная». В этом случае можно добиться совпадения положений изображения для двух длин волн, обычно выбираемых в синей и красной области спектра.

Распространение света происходит по *принципу Ферма*: реальный луч, идущий из точки А в некоторую точку В, затрачивает наименьшее время из всех возможных (т.е. виртуальных) лучей, соединяющих точки А и В. Вместо времени удобнее использовать оптическую длину луча:

$l_{\text{опт}} = \sum_i n_i \Delta l_i$, при вычислении которой геометрический путь в каждой среде

Δl_i умножается на показатель преломления среды n_i . Время распространения света определяется оптической длиной луча

$$\tau = \sum_i \frac{\Delta l_i}{v} = \sum_i \frac{n_i \Delta l_i}{c} = \frac{l_{\text{опт}}}{c}$$

Отсюда следует, что оптическая длина - это тот путь, который свет прошел бы в вакууме за то время, которое он шел в данных средах.

Задание 1

Луч света из точки А в вакууме падает на стеклянную пластину (рис. 1) толщиной d и показателем преломления n_1 . Угол падения α , угол преломления β . Расстояние от точки А до пластинки - a (см. рис.1). Из стекла луч выходит под углом γ в жидкость с показателем преломления n_2 и приходит в точку В, находящуюся на расстоянии b от стеклянной пластины. Скорости света в стекле и жидкости - v_1 и v_2 .

Определить оптическую длину луча и время распространения света из точки А в точку В. Время рассчитать двумя способами: используя обычную длину лучей и используя оптическую длину луча.

Построить в масштабе, удобном для построения, ход луча. Данные берутся из табл. 1.1 и 1.2.

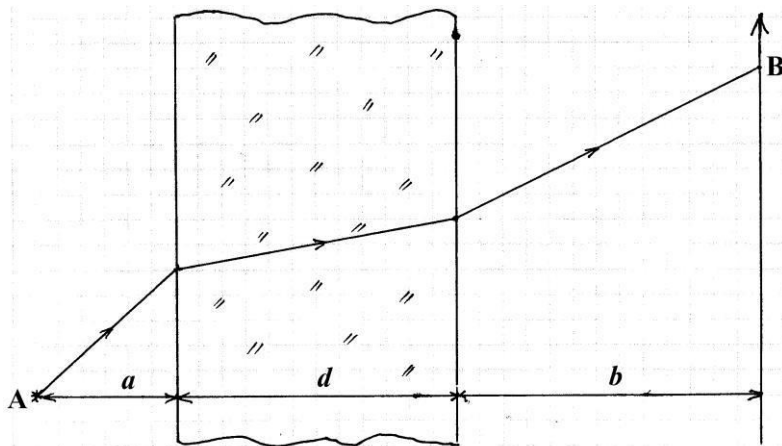


Рис.1

Таблица 1.1

| № вар. | a , мм | d , мм | b , мм |
|--------|----------|----------|----------|
| 0 | 10 | 6 | 8 |
| 1 | 8 | 10 | 12 |
| 2 | 6 | 12 | 8 |
| 3 | 15 | 10 | 12 |
| 4 | 12 | 8 | 15 |
| 5 | 20 | 15 | 20 |
| 6 | 18 | 20 | 25 |
| 7 | 8 | 14 | 12 |
| 8 | 6 | 10 | 8 |
| 9 | 12 | 20 | 16 |

Таблица 1.2

| № вар. | n_1 | n_2 | $\alpha, ^\circ$ | $\beta, ^\circ$ | $\gamma, ^\circ$ | $v_1, 10^8$ м/с | $v_2, 10^8$ м/с |
|--------|-------|-------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|
| 0 | 1,5 | 1,7 | 30 | - | - | - | - |
| 1 | - | - | 40 | 25 | - | - | 2,0 |
| 2 | - | - | 50 | - | - | 1,8 | 2,2 5 |
| 3 | - | 1,6 | 60 | - | - | 1,6 | - |
| 4 | 1,7 | - | 35 | - | 25 | - | - |
| 5 | 1,5 | - | 25 | - | - | - | 2,1 |
| 6 | - | 1,33 | 40 | 25 | - | - | - |
| 7 | 1,6 | - | 45 | - | - | - | 2,0 |
| 8 | - | - | 30 | - | 20 | 1,7 | - |
| 9 | - | - | 60 | 35 | 45 | - | - |

ТЕМА 2. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

Интерференция света – это усиление или гашение волн при их наложении в зависимости от разности фаз $\Delta\varphi$ между ними. Интерferируют только *когерентные* волны, т.е. волны, разность фаз которых не зависит от времени. Амплитуда суммарной волны при интерференции

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2 A_1 A_2 \cos\Delta\varphi. \quad (2.1)$$

Яркость (освещенность) определяется энергией, переносимой волной, и пропорциональна квадрату амплитуды $J = w \cdot A^2$. Умножая (2.1) на коэффициент пропорциональности w , получим

$$J = J_1 + J_2 + 2\sqrt{J_1 J_2} \cos\Delta\varphi. \quad (2.2)$$

Реальные источники света всегда *не когерентны*, т.е. разность фаз их колебаний изменяется случайным образом. Для таких источников интерференция не наблюдается, и значения интенсивности волн просто складываются, т.е.

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2. \quad (\text{или } J = J_1 + J_2) \quad (2.3)$$

Для получения когерентных волн свет от одного источника делят на два или несколько лучей, которые затем сходятся вместе и *интерferируют*, при этом разность фаз определяется пройденными лучами расстояниями, скоростью света и пропорциональна *оптической разности хода*:

$$\Delta_{\text{опт}} = l_{2, \text{опт}} - l_{1, \text{опт}}. \quad (2.4)$$

где $(l_{\text{опт}} = \sum n_i \Delta l_i$ – оптическая длина луча). Тогда разность фаз $\Delta\varphi = 2\pi \frac{\Delta_{\text{опт}}}{\lambda}$.

При расчете интерференционной картины нужно также учитывать изменение фазы волны на противоположную (т.е. на π) при отражении света от оптически более плотной среды (среды с большим показателем преломления). Для этого к оптической длине луча при каждом отражении добавляют $\lambda/2$. Максимумы интерференции наблюдают, если $\Delta_{\text{опт}} = k\lambda$, а минимумы - при $\Delta_{\text{опт}} = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}$, где k – любое целое число, которое называют *порядком максимума*:

$$k = \frac{\Delta_{\text{опт}}}{\lambda} \quad (2.5)$$

Тогда целым значениям k соответствуют максимумы, а полуцелым – минимумы. Для произвольных k формулу (2.5) можно записать: $\Delta\varphi = 2\pi k$. Следует иметь в виду, что косинус в (2.2) зависит только от дробной части k . При расчете интерференционной картины требуется вычислить оптическую длину лучей с высокой (до нескольких сотых долей от λ) точностью, т.е. порядка $0,01 \text{ мкм} = 10^{-8} \text{ м}$. При этом длина лучей изменяется от нескольких миллиметров до нескольких тысяч миллиметров. Пусть, например, требуется вычислить длину луча AC при AB = 2 м и BC = 5 мм (рис. 2.1).

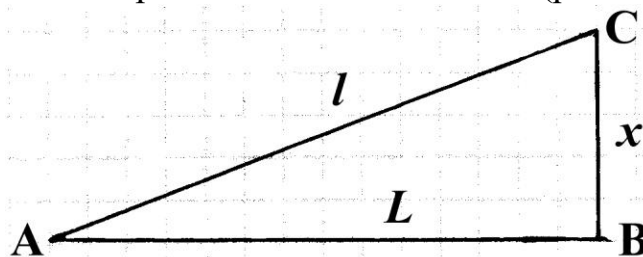


Рис. 2.1

Прямое использование теоремы Пифагора даёт:

$l = \sqrt{L^2 + x^2} = \sqrt{4 + 25 \cdot 10^{-6}} = \sqrt{4,000025}$ - требуется вычислить с 8–10 разрядами, что может быть проведено только на калькуляторе. В этом случае удобно использовать приближённую формулу $\sqrt{1 + \alpha} \approx 1 + \frac{1}{2}\alpha$, справедливую при $\alpha \ll 1$.

Погрешность при этом меньше α^2 . Используя ее, получим для нашего случая:

$l = L \sqrt{1 + \left(\frac{x}{L}\right)^2} = L + \frac{x^2}{2L} = 2,00000625 \text{ м}$. Погрешность при этом не превышает величину $L \left(\frac{x}{L}\right)^4 \approx 2 \cdot 10^{-11} \text{ м} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ мкм}$.

Задание 2

Экран освещается двумя точечными монохроматическими источниками света S_1 и S_2 , изображенными на рис.2.2. Длина волны света - λ . Каждый источник создает в точке P экрана освещенность $J_0 = 100$ лкс. Найти

освещенность в этой точке J при наложении света от обоих источников в двух случаях: а) источники - когерентные; б) источники - некогерентные. На пути лучей перпендикулярно к ним расположены стеклянные пластинки толщиной d_1 и d_2 с показателем преломления n_1 и n_2 , при этом, $d_2=2$ мм, а остальные данные берутся из табл. 2.1 и 2.2.

Для решения задачи надо найти: 1) оптическую длину каждого луча; 2) оптическую разность хода; 3) порядок максимума; 4) разность фаз лучей в точке P . Разность фаз следует найти в долях π и привести к интервалу $[-\pi, +\pi]$. Оптическая длина луча должна быть рассчитана с точностью не ниже 0,01 мкм.

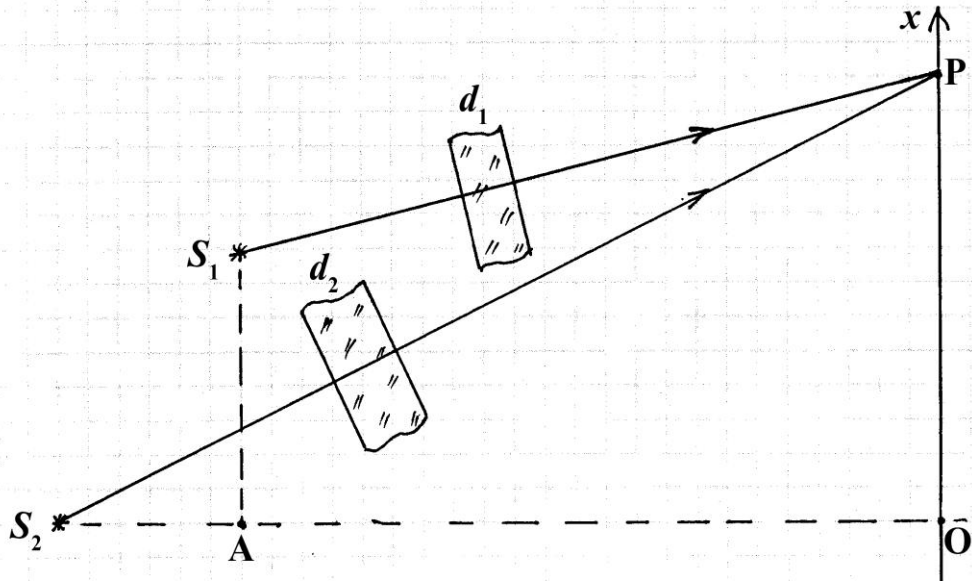


Рис.2.2

Примечание: $S_1A = a$; $S_2A = b$; $S_2O = L$; $OP = x$

| № вар. | L , м | a , мм | n_1 | λ , нм |
|--------|---------|----------|-------|----------------|
| 0 | 1,0 | 2,0 | 1,500 | 400 |
| 1 | 1,2 | 1,5 | 1,505 | 420 |
| 2 | 0,9 | 3,0 | 1,510 | 500 |
| 3 | 0,8 | 0,7 | 1,508 | 450 |
| 4 | 1,3 | 4,0 | 1,503 | 550 |
| 5 | 1,5 | 4,5 | 1,502 | 600 |
| 6 | 1,4 | 3,5 | 1,507 | 580 |
| 7 | 0,9 | 3,0 | 1,509 | 620 |
| 8 | 0,85 | 4,0 | 1,501 | 650 |
| 9 | 1,4 | 1,0 | 1,506 | 700 |

Таблица 2.1

| № вар. | x , мм | b , мм | n_2 | d_1 , мм |
|--------|----------|----------|-------|------------|
| 0 | 0 | 10 | 1,750 | 23 |
| 1 | +2 | 15 | 1,749 | 33 |
| 2 | +5 | 20 | 1,745 | 43 |
| 3 | +7 | 25 | 1,746 | 53 |
| 4 | +6 | 30 | 1,752 | 63 |
| 5 | -2 | 12 | 1,755 | 27 |
| 6 | -5 | 16 | 1,754 | 35 |
| 7 | -7 | 18 | 1,747 | 39 |
| 8 | -3 | 24 | 1,753 | 51 |
| 9 | +1 | 12 | 1,751 | 27 |

Таблица 2.2

ТЕМА 3. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА. ЗОНЫ ФРЕНЕЛЯ

Явление дифракции – это огибание светом препятствий. Оно наблюдается для всех волн. Из-за дифракции параллельный пучок света, пройдя через щель или отверстие, превращается в расходящийся. Чем меньше отверстие, тем больше расходимость. Дифракция объясняется принципом Гюйгенса – Френеля: *каждая точка волнового фронта сама является источником вторичных волн. В любую точку пространства приходят вторичные волны от всех участков волнового фронта, и результат определяется их интерференцией.*

Рассмотрим прохождение света через круглое отверстие (рис. 3.1, 3.2). С точки зрения геометрической оптики, в точку **P** и ее окрестность попадают только прямолинейные лучи от источника **S** (луч **SP** и близкие к нему). Поэтому интенсивность света в точке **S** не зависит от диаметра отверстия. Это и наблюдается для больших отверстий (мы не учитываем свет, отраженный от других предметов), но принцип Гюйгенса – Френеля дает совсем другую картину распространения волн. В точку **P** приходят волны от всех открытых участков волнового фронта, и интенсивность в этой точке зависит от всего отверстия. При очень малых отверстиях интенсивность очень быстро растет (как квадрат площади), затем рост замедляется, далее интенсивность убывает до нуля, а затем опять возрастает и т.д. Для нахождения амплитуды светового колебания, возбуждаемого в точке **P** сферической волной, испущенной точечным источником **S**, Френель разбил волновую поверхность на кольцевые зоны (рис. 3.1), построенные так, что расстояние от краев каждой зоны до точки **P** отличается на $\lambda / 2$, где λ -длина волны света. Расстояние l_m от внешнего края m -й зоны до точки **P** можно представить в виде:

$$l_m = l_0 + m \lambda / 2, \quad (3.1)$$

где: l_0 - расстояние от вершины волновой поверхности **O** до точки **P**, при этом колебания, приходящие в точку **P** от аналогичных точек двух соседних зон, будут находиться в «противофазе». В связи с этим результирующее колебание, создаваемое каждой из зон в целом, будет для соседних зон отличаться по фазе на π . Зоны Френеля обладают следующими свойствами: *волны, исходящие из всех точек любой зоны Френеля, усиливают друг друга, при этом волны от двух соседних зон Френеля взаимно гасят друг друга, так как находятся всегда в «противофазе».* Если открыто четное число зон Френеля, то они попарно гасят друг друга и в точке **P** наблюдается темное пятно (минимум). Если открыто нечетное число зон Френеля, то останется одна непогашенная зона и в точке **P** наблюдается яркое пятно (максимум).

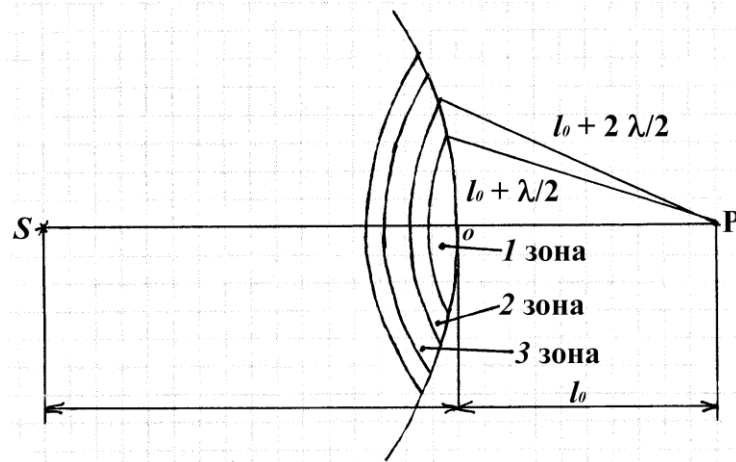


Рис. 3.1

Амплитуды колебаний, приходящих от разных зон, практически одинаковы, но при большом количестве открытых зон необходимо учитывать их постепенное убывание. Амплитуда A_m колебания, возбуждаемого m -й зоной в точке **P**, монотонно убывает с ростом m : $A_1 > A_2 > A_3 > \dots > A_{m-1} > A_m > \dots$, при этом амплитуда результирующего колебания находится как алгебраическая сумма: $A = A_1 - A_2 + A_3 - A_4 + A_5$. Для полностью открытого волнового фронта $A_\infty = \frac{1}{2}A_1 + (\frac{1}{2}A_1 - A_2 + \frac{1}{2}A_3) + (\frac{1}{2}A_3 - A_4 + \frac{1}{2}A_5) + \dots$. Члены в скобках очень малы, и суммарная амплитуда $A_\infty = \frac{1}{2}A_1$, т. е. действие всей волновой поверхности в точке **P** эквивалентно половине действия центральной зоны. Интенсивность при этом составляет четверть интенсивности, создаваемой первой зоной Френеля.

Если на пути сферической световой волны поместить непрозрачный экран с круглым отверстием (рис. 3.2), то в точку **P** попадет свет только от открытых зон Френеля. Число m зон Френеля в отверстии:

$$m = 2(l_m - l_0) / \lambda, \quad (3.2)$$

где l_0 - длина центрального луча **OP**, l_m - длина крайнего луча **KP**.

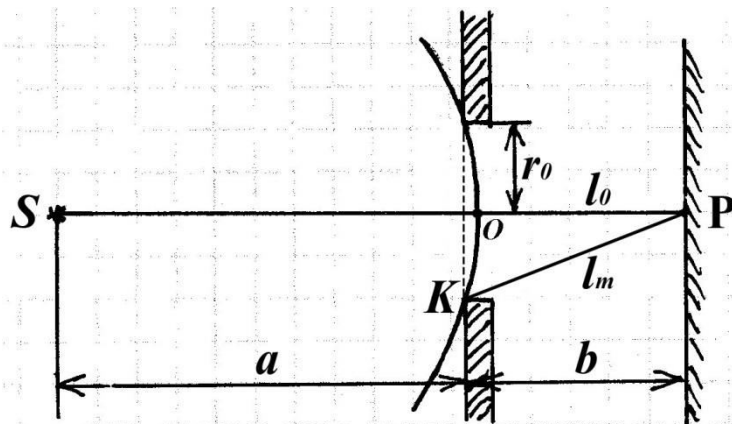


Рис. 3.2

Обычно $r_0 \ll a, b$. Тогда, находя **ОР** и **КР** по теореме Пифагора и используя приближенные формулы для вычисления корней (см. с. 5), получим

$$m = \frac{r_0^2}{\lambda} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) \quad (3.3)$$

Задание 3

Точечный источник света с длиной волны λ расположен на расстоянии a от непрозрачной преграды с круглым отверстием радиуса r_0 . На расстоянии b от преграды параллельно ей расположен экран (рис. 3.2).

1. Сколько зон Френеля укладывается в отверстие?
2. Светлое или темное пятно наблюдается в точке **Р**?
3. Чему равна амплитуда колебаний в точке **Р**, если амплитуда колебаний, доходящих в точку от первой зоны, равна A_1 ?
4. Чему равна интенсивность в точке **Р**, если интенсивность, создаваемая полностью открытым фронтом, равна J_∞ ?
5. Что наблюдается в точке **Р**, если r_0 увеличили так, что на отверстии укладывается m зон Френеля? Данные взять из таблиц 3.1 и 3.2.

Число зон Френеля надо найти по формуле 3.2, рассчитав **ОР** и **КР** по теореме Пифагора. Сравнить с результатом, даваемым формулой 3.3. В общем случае число зон получится не целым. Считать, что доля зоны Френеля дает вклад, пропорциональный этой доле, т.е., например, треть зоны дает вклад $\frac{1}{3}A_1$

Таблица 3.1

| № п/п | a , м | b , м | m |
|----------|------------|------------|-----|
| 0 | 1 | 2 | 3 |
| 1 | 1 | 1 | 2 |
| 2 | 1 | 0,7 | 4 |
| 3 | 1 | 1,5 | 6 |
| 4 | 1,4 | 1 | 7 |
| 5 | 1,5 | 1,5 | 3 |
| 6 | 1,2 | 1 | 5 |
| 7 | 1,3 | 1,5 | 2,5 |
| 8 | 0,9 | 1,2 | 3 |
| 9 | 1,3 | 2 | 3,5 |

Таблица 3.2

| № п/п | λ , мкм | r_0 , мм |
|----------|--------------------|---------------|
| 0 | 0,5 | 1,0 |
| 1 | 0,55 | 0,7 |
| 2 | 0,7 | 1,5 |
| 3 | 0,6 | 2,0 |
| 4 | 0,5 | 0,8 |
| 5 | 0,6 | 2,5 |
| 6 | 0,5 | 1,2 |
| 7 | 0,7 | 1,6 |
| 8 | 0,4 | 0,8 |
| 9 | 0,65 | 1,7 |

ТЕМА 4. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

В ряде явлений (интерференция, дифракция, поляризация и др.) свет ведет себя, как электромагнитная волна, т.е. распространение колебаний электромагнитного поля, описываемого векторами напряженности электрического и магнитного поля \vec{E} и \vec{H} . Эти вектора всегда направлены перпендикулярно друг другу и лежат в плоскости, перпендикулярной к лучу. В естественном (неполяризованном) свете направление колебаний векторов \vec{E} и \vec{H} хаотически меняется. В поляризованном свете направление колебаний векторов \vec{E} и \vec{H} постоянно.

Закон Брюстера: луч, отраженный от границы раздела двух диэлектриков, полностью поляризован, если угол падения α_B удовлетворяет условию:

$$\operatorname{tg} \alpha_B = n_{\text{отн}}, \quad (4.1)$$

где $n_{\text{отн}}$ - относительный показатель преломления. Для угла Брюстера $\rho_{\parallel} = 0$.

Закон Малюса: если на поляризатор (или анализатор) падает поляризованный свет, то интенсивность света I , прошедшего через поляризатор (или анализатор), пропорциональна квадрату косинуса угла ψ между главной плоскостью поляризатора и направлением плоскости поляризации, т. е.

$$I = I_0 \cos^2 \psi, \quad (4.2)$$

где I_0 - интенсивность поляризованного света, падающего на анализатор. Если на поляризатор (или анализатор) падает неполяризованный свет, то через него пройдет ровно половина интенсивности падающего света.

Задание 4

4. Для сравнения яркости освещения двух поверхностей (S_1 , S_2) одну из них рассматривают непосредственно, а вторую - через два николя (рис. 4). Каково отношение величин яркости, если освещение обеих поверхностей кажется одинаковым при угле между николями ψ ? Один николь поглощает K_1 падающей на него энергии, второй - K_2 . Каким станет видимое отношение величин яркости, если один николь убрать?

Как в этом случае изменяется величина яркости при вращении николя? Данные берутся из табл. 4.1, 4.2.

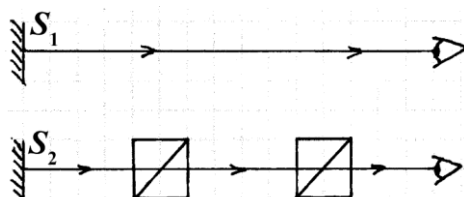


Рис. 4

Таблица 4.1

| № вар. | $K_1, \%$ | $K_2, \%$ |
|--------|-----------|-----------|
| 0 | 5 | 15 |
| 1 | 5 | 20 |
| 2 | 15 | 10 |
| 3 | 6 | 4 |
| 4 | 8 | 6 |
| 5 | 10 | 6 |
| 6 | 6 | 8 |
| 7 | 5 | 10 |
| 8 | 10 | 10 |
| 9 | 10 | 15 |

Таблица 4.2

| № вар. | $\psi, ^\circ$ |
|--------|----------------|
| 0 | 40 |
| 1 | 50 |
| 2 | 60 |
| 3 | 45 |
| 4 | 55 |
| 5 | 75 |
| 6 | 35 |
| 7 | 65 |
| 8 | 70 |
| 9 | 80 |

ТЕМА 5. ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Любое тело при температуре выше 0 К излучает электромагнитные волны. Излучение тела описывается *потоком световой энергии*, т. е. энергией, излучаемой за единицу времени $\Phi = \Delta W / \Delta t$. Поток энергии, излучаемый однородным телом, пропорционален площади поверхности тела. Удобно использовать *излучательность* $R = \Phi / S$ – поток, испускаемый с единицы площади поверхности тела. Излучательность учитывает энергию, излучаемую при всех длинах волн. Спектр излучения, т. е. распределение энергии по длинам волн, описывается *спектральной плотностью излучательности* r_λ , которая определяется из соотношения $dR_\lambda = r_\lambda \cdot d\lambda$. dR_λ определяется аналогично R , но вместо полного потока энергии Φ берется поток энергии $d\Phi_\lambda$ в узком спектральном интервале $[\lambda, \lambda + d\lambda]$. Полная излучательность $R_{\lambda T}$ дается интегралом от спектральной плотности по всем длинам волн:

$$R_{\lambda T} = \int_0^\infty r_{\lambda T} d\lambda \quad (5.1)$$

где индекс T указывает на сильную зависимость $R_{\lambda T}$ от температуры.

Излучательность тел зависит от того, как тела поглощают свет. Чем лучше тело поглощает данные световые волны, тем лучше оно их излучает при нагревании. *Поглощательная способность* (коэффициент поглощения) $a_\lambda = \Phi_{\text{погл}} / \Phi_0$ и *коэффициент отражения* $\rho_\lambda = \Phi_{\text{отр}} / \Phi_0$ показывают, какая часть падающего светового потока Φ_0 поглощается или, соответственно, отражается. λ – длина волны монохроматического света, для которой они определены. *Закон Кирхгофа*: отношение спектральной плотности излучательности к поглощательной способности для всех тел одинаково и равно спектральной плотности абсолютно черного тела:

$$\frac{r_{\lambda T}^{(1)}}{a_{\lambda T}^{(1)}} = \frac{r_{\lambda T}^{(2)}}{a_{\lambda T}^{(2)}} = \varepsilon_{\lambda T} \quad (5.2)$$

Здесь $\epsilon_{\lambda T}$ - спектральная плотность излучательности «абсолютно черного тела», т. е. тела, которое поглощает все падающие на него лучи. Для него $a_{\lambda}=1$, а $\rho_{\lambda}=0$. Полная излучательность для «абсолютно черного тела»

$$E_T = \int_0^{\infty} \epsilon_{\lambda T} d\lambda. \quad (5.3)$$

Спектр излучения абсолютно черного тела описывается формулой Планка, полученной на основе представлений о квантовом характере излучения:

$$\epsilon_{\lambda T} = \frac{4\pi^2 c^2 h}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)},$$

где c - скорость света в вакууме; h - постоянная Планка; k - постоянная Больцмана. Константы: $C_1 = 3,74 \cdot 10^{-16}$ Вт м²; $C_2 = 1,44 \cdot 10^{-2}$ м К.

На рис.5 приведены рассчитанные спектры излучения абсолютно черного тела для температур 2500 К и 3000 К. Кривые имеют две характерные точки: длину волны, на которую приходится максимум λ_m , и высоту максимума.

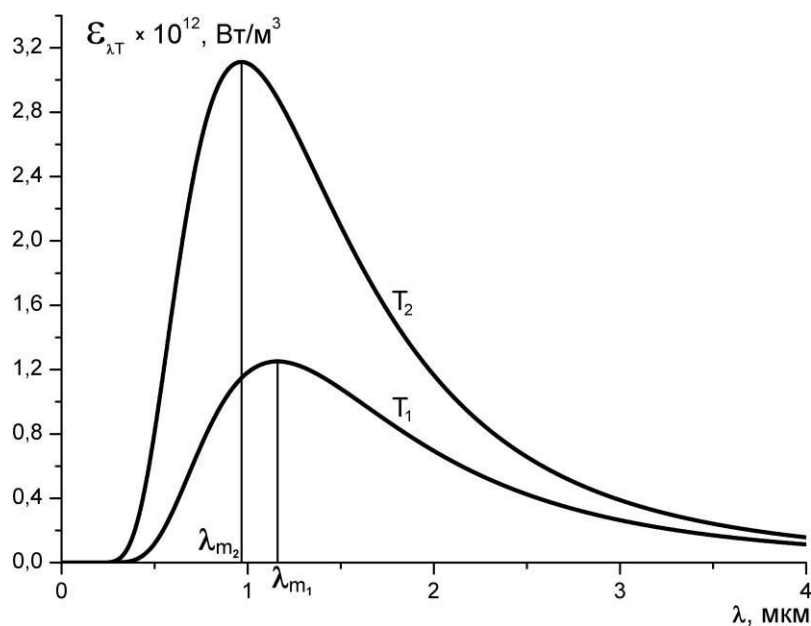


Рис.5

Закон Стефана – Больцмана: полная излучательность E_T абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры $E_T = \sigma T^4$, где T - абсолютная температура, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² К⁴) - постоянная Стефана - Больцмана. На рис. 5 E_T изображается площадью под кривой.

Закон смещения Вина: длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности излучательности, обратно пропорциональна абсолютной температуре:

$$\lambda_m = b / T, \quad (5.5)$$

где постоянная Вина $b = 2,9 \cdot 10^{-3}$ м К.

Второй закон Вина: максимальная спектральная плотность излучательности $\epsilon_{\lambda m}$ пропорциональна пятой степени абсолютной температуры:

$$\epsilon_{\lambda m} = C_3 T^5, \quad (5.6)$$

где $C_3 = 1,29 \cdot 10^{-5}$ Вт/м³.

«Серое тело» – это тело, которое одинаково поглощает лучи всех длин волн, т.е. оно не имеет окраски, и поэтому для него A_λ не зависит от длины волны. Для «серого тела» полная излучательность

$$R_T = \int_0^\infty r_{\lambda T} d\lambda = \int_0^\infty a_\lambda \epsilon_{\lambda T} d\lambda = a \int_0^\infty \epsilon_{\lambda T} d\lambda = a E_T. \quad (5.7)$$

Задание 5

1. Нагретое до температуры T «серое тело» (площадь поверхности - S) излучает поток энергии Φ . Чему равен коэффициент поглощения a ?
2. Вычислить спектральную плотность излучательности $r_{\lambda T}$ для длины волны λ_m рассматриваемого тела.
3. Найти поток излучения данного тела в интервале длин волн, отличающихся от λ_m на 1%.
4. Во сколько раз изменится поток излучения, если λ_m увеличится на $\Delta\lambda$?
5. Пусть рассматриваемое тело поддерживали при равновесной температуре T (мощность внутреннего источника тепла - W_0). Определить новую равновесную температуру T_1 , если мощность выделяемого в теле тепла увеличилась на W_1 ?

Таблица 5.1

| № вар. | T , К | S , см ² | Φ , Вт |
|--------|---------|-----------------------|-------------|
| 0 | 2000 | 20 | 1600 |
| 1 | 2100 | 30 | 3000 |
| 2 | 2200 | 25 | 2800 |
| 3 | 2300 | 40 | 5000 |
| 4 | 2400 | 20 | 2500 |
| 5 | 2500 | 10 | 1800 |
| 6 | 2600 | 15 | 2800 |
| 7 | 2700 | 10 | 1500 |
| 8 | 2800 | 20 | 4000 |
| 9 | 2900 | 30 | 8000 |

Таблица 5.2

| № вар. | $\Delta\lambda$, мкм | W_1 , Вт |
|--------|-----------------------|------------|
| 0 | 0,5 | 500 |
| 1 | 0,6 | 800 |
| 2 | 0,7 | 600 |
| 3 | 0,8 | 2000 |
| 4 | 0,9 | 400 |
| 5 | 1,0 | 700 |
| 6 | 1,1 | 800 |
| 7 | 0,3 | 600 |
| 8 | 0,5 | 1500 |
| 9 | 0,6 | 2000 |

ТЕМА 6. КВАНТОВАЯ ОПТИКА. ФОТОЭФФЕКТ

Электромагнитное поле обладает двойственной природой: оно является одновременно волной и потоком частиц. Этот эффект называется *корпускулярно-волновым дуализмом*. Частицы света называются *квантами света* или *фотонами*. Энергия кванта света (фотона) $\varepsilon_{\text{ф}} = h\nu$; масса фотона $m_{\text{ф}} = h\nu/c^2$; импульс фотона $p_{\text{ф}} = m_{\text{ф}}c = h/\lambda$. Для монохроматической волны поток световой энергии пропорционален потоку квантов $\Phi = nh\nu$.

Фотоэффект – это явление выбивания светом электронов из металлов, относящееся к квантовым. Квант отдает всю энергию электрону и исчезает. Если энергия кванта достаточно велика, то происходит фотоэффект, при этом только часть электронов (обычно 1-2 %) вылетает из вещества, так как не каждый фотон взаимодействует с электроном.

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта: $\varepsilon = h\nu = A + W_{\text{к}}$, где A - работа выхода электрона из металла; $W_{\text{к}}$ - максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов. Читается так: *энергия светового кванта расходуется на работу выхода электрона из вещества и на сообщение кинетической энергии выбитому электрону*. Красная граница фотоэффекта определяется:

$\nu_0 = \frac{A}{h}$, $\lambda_0 = \frac{hc}{A}$, где λ_0 – максимальная длины волны, при которой еще возможен фотоэффект.

Вылетающие фотоэлектроны (электроны, вылетевшие под действием фотонов) можно задержать тормозящим электрическим полем с разностью потенциалов $U_{\text{зад}}$, при этом фототок полностью прекращается, если работа сил *задерживающего* поля равна максимальной кинетической энергии фотоэлектронов, т. е.: $eU_{\text{зад}} = W_{\text{к}}$. Тогда уравнение фотоэффекта можно записать и в виде: $h\nu = A + eU_{\text{зад}}$.

Задание 6

На металлическую пластину падает свет с интенсивностью I и длиной волны

λ . Поверхность имеет коэффициент отражения ρ . Найти:

- 1) Сколько электронов вылетает за 1с с поверхности металла, если к фотоэффекту приводит $b\%$ поглощенных фотонов? Площадь поверхности - S .
- 2) Какую задерживающую разность потенциалов $U_{\text{зад}}$ нужно приложить, чтобы прекратить фототок? Работа выхода электронов из металла - A .
- 3) Определить максимальную скорость электронов, вылетающих из металла. Какую максимальную скорость они будут иметь у анода, если приложить задерживающую разность потенциалов, равную $U_{\text{зад}}/2$?
- 4) Какую долю энергии поглощенного кванта составляет энергия вылетающего электрона?
- 5) Найти красную границу фотоэффекта. Данные берутся из табл. 6.1 и 6.2.

Таблица 6.1

| № вар. | I , Вт/см ² | λ , мкм | A , эВ |
|--------|--------------------------|-----------------|----------|
| 0 | 0,2 | 0,4 | 1,9 |
| 1 | 0,3 | 0,18 | 4,5 |
| 2 | 0,4 | 0,31 | 2,3 |
| 3 | 0,5 | 0,22 | 4,0 |
| 4 | 0,6 | 0,1 | 6,3 |
| 5 | 0,7 | 0,18 | 2,2 |
| 6 | 0,8 | 0,33 | 2,2 |
| 7 | 0,1 | 0,2 | 2,5 |
| 8 | 0,5 | 0,18 | 2,3 |
| 9 | 0,6 | 0,1 | 4,5 |

Таблица 6.2

| № вар. | ρ | b , % | S , см ² |
|--------|--------|---------|-----------------------|
| 0 | 0,3 | 5 | 2 |
| 1 | 0,4 | 10 | 3 |
| 2 | 0,5 | 15 | 4 |
| 3 | 0,6 | 1 | 7 |
| 4 | 0,2 | 2 | 8 |
| 5 | 0,8 | 3 | 5 |
| 6 | 0,7 | 4 | 2,5 |
| 7 | 0,4 | 6 | 6 |
| 8 | 0,3 | 7 | 9 |
| 9 | 0,5 | 8 | 1,5 |

ТЕМА 7. ЭФФЕКТ КОМПТОНА

Эффектом Комптона называют изменение длины волны рентгеновских волн при рассеивании веществом. По квантовой теории при рассеивании рентгеновских лучей происходит упругое столкновение рентгеновского кванта со свободным покоящимся электроном (рис.7.1-а), при этом квант отдаёт часть своей энергии и импульса электрону (рис.7.1-б), поэтому энергия кванта $h\nu_0$ уменьшается, следовательно, уменьшается частота (или увеличивается длина волны) рассеянного рентгеновского излучения.



Рис. 7.1

При «комптоновском» рассеивании выполняются законы сохранения импульса и энергии. Пусть \vec{p}_0 , \vec{p} и $m\vec{v}$ - импульсы падающего, рассеянного кванта и электрона отдачи соответственно. Тогда

$$\vec{p}_0 = \vec{p} + m\vec{\mathcal{G}}, \quad (7.1)$$

где импульсы квантов: $\vec{p}_0 = h / \lambda$, $\vec{p} = h / \lambda_0$; θ - угол рассеивания кванта; β - угол рассеивания электрона отдачи. Закон сохранения энергии запишется в виде:

$$h\nu_0 = h\nu + (m - m_0)c^2, \quad (7.2)$$

где: $(m - m_0)c^2$ - кинетическая энергия электрона; m_0 - масса покоя электрона;

масса движущегося электрона $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 + \frac{v^2}{c^2}}}$.

Все параметры рассеянных частиц определяются углом θ и, решая совместно уравнения, можно найти изменение длины волны рассеянного рентгеновского кванта (фотона) в виде:

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \frac{h}{m_0c} (1 - \cos\theta), \quad (7.3)$$

где: $\frac{h}{m_0c} = \Lambda_K$ - «комптоновская» длина волны ($\Lambda_K = 2,44\text{пм}$).

Задание 7

Рентгеновский квант рассеивается на свободном электроне на угол θ . Длина волны падающего кванта - λ_0 ?, частота - ν_0 , масса - m_ϕ , импульс - p_0 и энергия - ϵ_0 . Найти: 1) энергию; 2) импульс; 3) скорость и направление движения электрона «отдачи»; также найти все характеристики падающего кванта.

Примечание: задачу решить: а) аналитически и б) графически, построив в масштабе векторную диаграмму импульсов. Импульс электрона найти двумя способами: 1) используя закон сохранения энергии и 2) из векторной диаграммы импульсов по «теореме косинусов».

Порядок решения: 1) вычислить длину волны, импульс и энергию рассеянного кванта; 2) построить в масштабе импульсы \vec{p}_0, \vec{p} ; 3) из полученного треугольника найти $m\vec{\mathcal{G}}$ и β ; 4) из закона сохранения энергии определить массу электрона и найти его скорость. Рассчитать импульс электрона. Данные берутся из табл. 7.1 и 7.2.

Таблица 7.1

| № вар. | λ_0 , пм | ν_0 , 10^{20} Гц | $\frac{m_\phi}{m_0}$ | $\frac{p_0}{m_0 c}$ | ε_0 , МэВ |
|-----------|---------------------|---------------------------|----------------------|---------------------|--------------------------|
| 0 | - | 4 | - | - | - |
| 1 | 0,6 | - | - | - | - |
| 2 | - | - | 0,7 | - | - |
| 3 | - | - | - | - | 0,6 |
| 4 | - | 6 | - | - | - |
| 5 | - | - | - | 1,2 | - |
| 6 | 1,2 | - | - | - | - |
| 7 | - | - | - | 1,0 | - |
| 8 | - | - | 0,5 | - | - |
| 9 | - | - | - | - | 0,3 |

Таблица 7.2

| № вар. | θ |
|-----------|----------|
| 0 | 90^0 |
| 1 | 60^0 |
| 2 | 45^0 |
| 3 | 30^0 |
| 4 | 120^0 |
| 5 | 135^0 |
| 6 | 150^0 |
| 7 | 180^0 |
| 8 | 105^0 |
| 9 | 70^0 |

$1 \text{ МэВ} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$, m_0 - масса покоя электрона, c - скорость света,
 $1 \text{ пм} = 10^{-12} \text{ м}$.

Библиографический список

1. Савельев И.В. Курс общей физики. В 5 т. Т.2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. М., «Лань», 2011, 352с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. В 5 т. Т.3. Квантовая оптика. Атомная физика. М., «Лань», 2011, 392с.

Содержание

| | |
|---|----|
| ПРЕДИСЛОВИЕ | 3 |
| ТЕМА 1. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА | 3 |
| Задание 1 | 4 |
| ТЕМА 2. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА..... | 5 |
| Задание 2 | 6 |
| ТЕМА 3. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА. ЗОНЫ ФРЕНЕЛЯ | 8 |
| Задание 3 | 10 |
| ТЕМА 4. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА..... | 11 |
| Задание 4 | 11 |
| ТЕМА 5. ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ | 12 |
| Задание 5 | 14 |
| ТЕМА 6. КВАНТОВАЯ ОПТИКА. ФОТОЭФФЕКТ | 15 |
| Задание 6 | 15 |
| ТЕМА 7. ЭФФЕКТ КОМПТОНА..... | 16 |
| Задание 7 | 17 |
| Библиографический список | 19 |

Александр Леонидович Ашкалунин

Михаил Николаевич Полянский

ФИЗИКА
Часть V. ОПТИКА

Методические указания и задания
для самостоятельной работы студентов

Редактор и корректор В.А.Басова

Техн. редактор Л.Я.Титова

Подп. к печати 14.05.2015. Формат 60x84/16. Бумага тип.№1.

Печать офсетная. Объём 2,0 печ.л., 2,0 уч.-изд.л. Тираж 50 экз. Изд.№.

Цена «С». Заказ

Ризограф Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД, 198095,
СПб., ул.И.Черных, 4.