

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«УДМУРТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Институт математики, информационных технологий и физики  
Кафедра общей физики

# ВОЛНОВАЯ И КВАНТОВАЯ ОПТИКА

СБОРНИК

тестовых заданий по общей физике



Ижевск

2022

УДК 378.02:37.016  
ББК 74.480.262.23-275  
В67

*Рекомендовано к изданию  
Учебно-методическим советом УдГУ*

**Рецензенты:** кандидат физико-математических наук, доцент  
**Владимир Геннадиевич Лебедев,**  
доктор педагогических наук, профессор  
**Татьяна Александровна Снигирева**

**Составитель:** кандидат физико-математических наук, доцент  
**Сергей Николаевич Костенков**

**В67** **Волновая и квантовая оптика:** сборник тестовых заданий по общей физике/ сост. С. Н. Костенков. – Ижевск: Издательский центр «Удмуртский университет», 2022. – 60 с.

Сборник заданий предназначен для студентов направления подготовки бакалавров «Физика». Он включает в себя задания, предлагаемые для проведения тестирования на практических занятиях и дома самостоятельно, по дисциплине «Оптика», являющейся одним из разделов курса общей физики. Сборник задач может быть использован в рамках работы по другим дисциплинам близким по своему программному содержанию.

Пособие пригодится студентом направлений подготовки бакалавров «Прикладные математика и физика» при освоении курса общей физики.

УДК 378.02:37.016  
ББК 74.480.262.23-275

© С. Н. Костенков, сост., 2022  
© ФГБОУ ВО «Удмуртский  
государственный университет», 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Раздел 1. Волновая оптика.....	5
1.1. Волновая природа света.....	5
1.2. Интерференция и дифракция света.....	7
1.3. Поляризация и дисперсия света.....	20
Раздел 2. Квантовая оптика.....	33
2.1. Тепловое излучение. Фотоэффект.....	33
2.2. Световое давление. Эффект Комптона.....	48
Библиографический список.....	59

## ВВЕДЕНИЕ

Тестирование - в частности, тестирование по физике - имеет своей целью проверку на основе ответов на тестовые задания прочности усвоения базовых знаний и навыков по конкретному предмету. Оно не ставит своей задачей установление глубины понимания предмета тестируемым, что может быть установлено лишь в устной беседе. Однако тестирование вполне пригодно как для предэкзаменационной проверки знаний, так и для проверки знаний остаточных, т.е. знаний и навыков по данному предмету, которыми студент обладает после изучения всего курса.

Предлагаемые в пособии тестовые задания для проверки остаточных знаний по физике ориентированы на проверку знаний фундаментальных физических понятий и законов, понимание их смысла и условий выполнения, а так же умения применять их для решения заданий легкой и средней сложности. В пособие находятся задания по тем разделам, знание которых, как показывает многолетний опыт, традиционно проверяются в процессе тестирования с использованием интернета. Поэтому оно предназначено в первую очередь для подготовки студентов к этой форме контроля остаточных знаний как самостоятельно, так и под руководством преподавателей.

Для удобства самостоятельной подготовки, каждый раздел снабжен теоретическим введением. В нем раскрывается смысл основных понятий и законов, оно ориентировано на выполнение конкретных тестовых заданий. Кроме того, большинство разделов содержит подробные примеры выполнения заданий. Правильные ответы к заданиям отмечены звездочкой.

## Раздел 1. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА.

### 1.1. Волновая природа света.

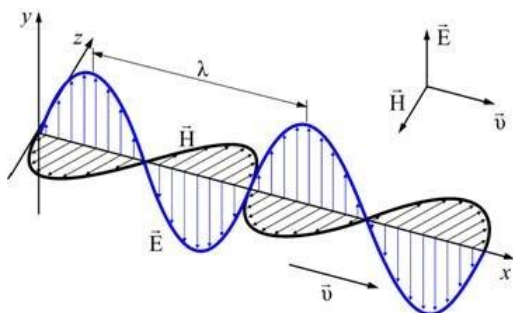
#### Теоретическое введение.

В соответствии с волновой теорией свет является электромагнитной волной. Из электромагнитной теории вытекают два важных вывода:

1. Переменные электрические и магнитные поля всегда существуют вместе, в виде единого электромагнитного поля, которое в каждой точке характеризуется одновременно двумя векторами  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$ .
2. Электромагнитное поле, возникнув в одном месте пространства, не остаётся локализованным (сосредоточенным) в нём, а распространяется от этого места с конечной скоростью в виде электромагнитной волны, т.е. электромагнитная волна - форма существования электромагнитного поля.

Одной из особенностей электромагнитных волн является то, что они не требуют никакой среды для своего распространения и могут распространяться в пустоте (вакууме).

Векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  электромагнитной волны взаимно перпендикулярны и перпендикулярны вектору скорости распространения электромагнитной волны  $\vec{v}$ .



Простейшей электромагнитной волной является плоская синусоидальная волна, т.е. такая волна, у которой фронт представляет собой плоскость, перпендикулярную направлению распространения, а в фиксированной точке изменения векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  происходит по закону синуса или косинуса.

Электромагнитная волна переносит энергию. В любой точке пространства объемную плотность энергии магнитного поля можно представить в виде объемной плотности энергии электрического и магнитного поля:

$$\omega = \omega_E + \omega_H = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} + \frac{\mu_0 \mu H^2}{2},$$

$$\omega = \varepsilon_0 \varepsilon E.$$

Отсюда следует, что плотность энергии электрического и магнитного поля в любой точке пространства в любой момент времени всегда равны. Плотность потока электромагнитной энергии равна  $S = \omega \cdot V = E \cdot H$ , где  $V$  - объём, занимаемый волной.

Вектор Умова-Пойтинга  $\vec{S} = [\vec{E} \times \vec{H}]$  указывает направление распространения электромагнитной волны и численно равен энергии, переносимой электромагнитной волной через площадь в  $1 \text{ м}^2$  за 1 секунду. Скорость распространения электромагнитной волны в вакууме не зависит от частоты и длины волны и называется скоростью света в вакууме  $c$  ( $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ ).

Отношение скорости света в вакууме к фазовой скорости света  $v$  в данной среде называется абсолютным показателем преломления  $n$ :

$$n = \frac{c}{v}.$$

Относительный показатель преломления второй среды относительно первой равен  $n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$ , где  $\lambda$  - длина волны.

При переходе электромагнитной волны из одной среды в другую частота и период колебаний векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  не изменяются, а скорость распространения, длина волны и показатель преломления изменяются скачком.

#### Задания к теме.

Задание 1. Ориентация векторов напряжённости электрического  $\vec{E}$  и магнитного  $\vec{H}$  полей в электромагнитной волне такова, что они направлены вдоль оси  $x$  и  $y$ . Вектор плотности потока энергии электромагнитного поля ориентирован в направлении .....

1) оси  $z$ ;

- 2) оси  $x$ ;
- 3) оси  $y$ .

Задание 2. Электромагнитная волна, переходит из среды 1 в среду 2 перпендикулярно границе раздела. Длина волны в первой среде равна  $0,75$  мкм во второй  $0,5$  мкм. Отношение скорости света в среде 2 к его скорости в среде 1 равно ...

- 1)  $0,67$ ;
- 2)  $1,5$ ;
- 3)  $1,75$ ;
- 4)  $0,84$ .

Задание 3. Электромагнитная волна, переходит из среды 1 в среду 2 перпендикулярно границе раздела. Длина волны в первой среде равна  $0,75$  мкм во второй  $0,5$  мкм. Относительный показатель преломления среды 1 относительно среды 2 равен ...

- 1)  $0,67$ ;
- 2)  $1,5$ ;
- 3)  $1,75$ ;
- 4)  $0,84$ .

## 1.2. Интерференция и дифракция света.

### 1.2.1. Интерференция света.

#### Теоретическое введение.

Интерференцией света называется явление наложения когерентных световых волн, приводящее к перераспределению энергии в пространстве, в результате которого возникают максимумы и минимумы интенсивности света. Когерентными называются две волны, имеющие одинаковые частоты и постоянную разность фаз в данной точке пространства.

Оптической разностью хода двух волн называется величина:

$$\Delta = \ell_2 \cdot n_2 - \ell_1 \cdot n_1,$$

где  $\ell_1$ - расстояние, пройденное светом в среде с показателем преломления  $n_1$ ,  
 $\ell_2$  - расстояние, пройденное светом в среде с показателем преломления  $n_2$ .

Оптическая разность хода связана с разностью фаз  $\delta$  соотношением:

$$\delta = \frac{2\pi\Delta}{\lambda}.$$

Условие интерференционного максимума:  $\delta = 2k\pi$ , а  $\Delta = k\lambda$ , условие интерференционного минимума:  $\delta = (2k+1)\pi$ , а  $\Delta = (2k+1)\lambda/2$ .

Если складываются две плоские когерентные волны, уравнения которых имеют вид:

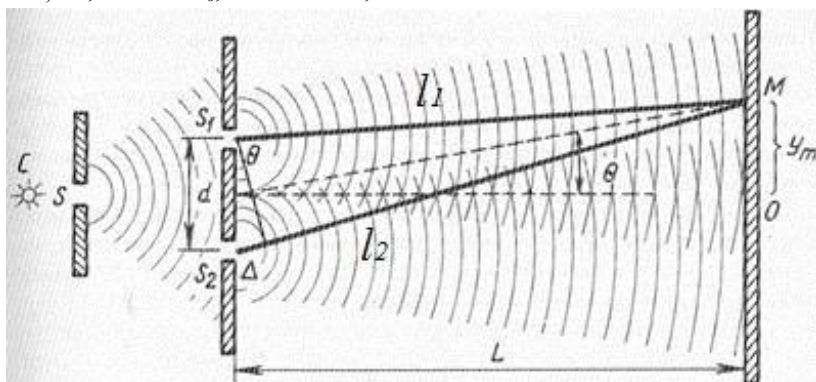
$$A_1 = A_{01}\cos(\omega t + \varphi_1), A_2 = A_{02}\cos(\omega t + \varphi_2),$$

где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  начальные фазы волн, то амплитуда результирующего колебания равна:

$$A^2 = A_{10}^2 + A_{20}^2 + 2A_{10} \cdot A_{20} \cdot \cos(\delta),$$

где  $\delta = (\varphi_1 - \varphi_2)$  - разность фаз, складываемых колебаний. Если  $\delta = 2k\pi$ , то  $A^2 = A_{10}^2 + A_{20}^2 + 2A_{10} \cdot A_{20}$ , если  $\delta = (2k+1)\pi$ , то  $A^2 = A_{10}^2 + A_{20}^2 - 2A_{10} \cdot A_{20}$ , где  $k=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$  - порядок минимума или максимума.

Интенсивность света  $I \sim A^2$ . При сложении когерентных волн с одинаковыми амплитудами суммарная интенсивность  $I = 0$ , если  $\delta = (2k+1)\pi$ , а  $\Delta = (2k+1)\lambda/2$ , или  $I = 4I_0$ , если  $\delta = 2k\pi$ , а  $\Delta = k\lambda$ .





## 1.2.2. Дифракция света.

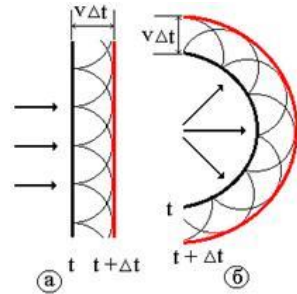
Под дифракцией понимают совокупность явлений, наблюдаемых при распространении света в среде с резкими неоднородностями и связанных с отклонениями от законов геометрической оптики.

Дифракция света проявляется в отклонении световых лучей от прямолинейного распространения на препятствиях, сравнимых с размерами длины волны света  $\lambda$  (распространение в области геометрической тени). Если  $\lambda \rightarrow 0$  то законы волновой оптики переходят в законы геометрической оптики, потому что  $\lambda$  - световых волн мало наблюдать дифракцию можно в специальных созданных условиях.

Если расстояние от препятствия до источников света  $S$  и до точки наблюдения  $P$  велико, что лучи, идущие в точку  $P$ , практически параллельны, то говорят и дифракции Фраунгофера (или дифракция в параллельных лучах). Во всех остальных случаях имеем дело с дифракцией Френеля.

Качественно поведение любых волн за преградой описывается принципом

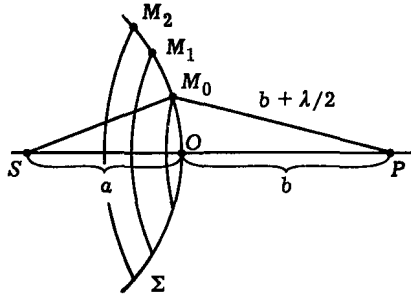
Гюйгенса. Если известен фронт волны в момент времени  $t$ , то фронт волны в момент времени  $t + \Delta t$  можно получить как огибающую от вторичных волн, рассматривая каждую точку среды, до которой дошло возбуждение в момент времени  $t$  как их источник. На рисунке представлен принцип Гюйгенса для плоской волны а) и сферической б).



Френель дополнил принцип Гюйгенса представлением об интерференции вторичных волн, что позволило количественно рассчитать амплитуду результирующих волн в любой точке. Суть принципа Гюйгенса-Френеля состоит в том, что для вычисления амплитуды колебаний в точке  $P$ , порождаемых световой волной реального источника можно этот источник заменить совокупностью вторичных источников, расположенных вдоль волновой поверхности.

### 1.2.3. Зоны Френеля.

Френелем был предложен метод зон, который позволяет рассчитывать амплитуду простым алгебраическим суммированием. Этот метод удобен в случаях симметричного распространения световых волн. Рассмотрим его на примере сферической  $S$  волны от точечного источника  $S$ . Найдем амплитуду в точке наблюдения  $P$ . Световые волны симметричны относительно  $SP$ . Суть метода зон Френеля состоит в разбиении волновой поверхности на кольцевые зоны, расстояние от краев соседних зон до  $P$  отличаются на величину  $\frac{\lambda}{2}$ .



Следовательно, результирующие колебания, создаваемые каждой из зон в целом, для соседних зон будут отличаться по фазе на  $\pi$  (то есть в противофазе). Так как площадь  $\Delta S_m$  зон уменьшается при увеличении  $m$ , то амплитуда от каждой зоны в точке  $P$  с увеличением  $m$  убывает:

$$A_1 > A_2 > A_3 > A_4 > \dots A_{m-1} > A_m > A_{m+1}.$$

Так как колебания от соседних зон приходят в точку наблюдения  $P$  в противофазе, то результирующая амплитуда равна:

$$A = A_1 - A_2 + A_3 - A_4 \dots$$

Если ее записать как:

$$A = \frac{A_1}{2} + \left( \frac{A_1}{2} - A_2 + \frac{A_3}{2} \right) + \left( \frac{A_3}{2} - A_4 + \frac{A_5}{2} \right) + \dots$$

и положить, что  $A_m = \frac{A_{m-1} + A_{m+1}}{2}$ , то  $A = \frac{A_1}{2}$ .

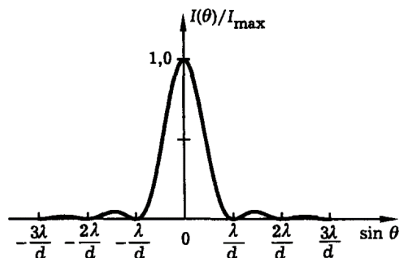
Таким образом, амплитуда, создаваемая сферической волной в точке  $P$ , равна половине амплитуды, создаваемой первой зоной Френеля. Если в экране оставить отверстие под 1 зону Френеля, то амплитуда будет  $A_1$ , то

есть в 2 раза больше, чем  $A$ . Интенсивность будет в 4 раза больше. Если перекрыть все четные или нечетные зоны Френеля, то интенсивность в точке Р резко возрастает. Такая пластинка называется зонной. Существует фазовая зонная пластинка, которая изменяет фазу, допустим, нечетных зон Френеля, на  $\pi$ . Интенсивность изменяется в 4 раза (амплитуда в 2 раза). Радиус  $m$  зоны Френеля равен:

$$r_0 = \sqrt{\frac{ab}{a+b} m \lambda}.$$

#### 1.2.4. Дифракционная решетка.

Под дифракционной решеткой понимаются совокупность большого числа одинаковых, отстоящих на одно и то же расстояние друг от друга щелей. Расстояние между центрами соседних щелей называется периодом решетки  $d$ . Располагая за дифракционной решеткой собирающую линзу и экран в фокальной плоскости, на экране можно наблюдать дифракционную картину. Пусть период  $d$ , ширина щелей -  $b$ . Каждая щель создает на экране картину, описываемую кривой представленной на рисунке.



Условие, определяющее положение главных максимумов интенсивности:

$$d \sin \varphi = \pm m \lambda, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4, \dots \pm m_{\max}.$$

Для этих направлений колебания, создаваемые различными щелями, усиливают друг друга, амплитуда для них  $A_{\text{реш}} = N A_{\varphi}$ . Интенсивность определяется как  $I_{\text{реш}} = N^2 I_{\varphi}$ . Так как  $\sin \varphi \leq 1$ , то из условия главных максимумов следует, что количество главных максимумов.  $m \leq \frac{d}{\lambda}$ .

Положение главных максимумов зависит от  $\lambda$ . Следовательно, при пропускании белого света все максимумы, за исключением центрального, разлагаются в спектр. Фиолетовый конец обращен к центру дифракционной картины, красный – наружу.

### 1.2.5. Характеристики дифракционной решетки.

1. Под угловой дисперсией понимается величина:

$$D_{\varphi} = \frac{d\varphi}{d\lambda}$$

$d\varphi$  - угловое расстояние между двумя линиями, отличающимися по длине волны на величину  $d\lambda$ .

$$D_{\varphi} = \frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{m}{d \cos \varphi}$$

Отсюда видно, что, чем больше период, тем меньше  $D_{\varphi}$ , чем больше порядков дает дифракционная решетка, тем больше  $D_{\varphi}$ .

2. Линейная дисперсия:

$$D_e = \frac{dl}{d\lambda}$$

$dl$  - линейное расстояние между спектральными линиями, отличающихся друг от друга на величину  $d\lambda$ . При малых значениях угла  $\varphi$ , выполнимо равенство  $dl = d\varphi \cdot f$ , ( $f$  - фокус линзы) и дисперсии связаны соотношением:

$$D_e = \frac{d\varphi \cdot f}{d\lambda} = fD_{\varphi} \approx f \frac{m}{d}.$$

Таким образом, дисперсии определяют линейное или угловое расстояние между спектральными линиями, отличающимися на единицу длины волны.

3. Разрешающая способность дифракционной решетки определяет минимальную разность длин волн  $d\lambda$ , при которой две линии воспринимаются в спектре раздельно:

$$R = \frac{\lambda}{d\lambda} = mN.$$

$N$  - число щелей,  $d\lambda$  - минимальная разность длин волн двух спектральных линий, при которой эти линии воспринимаются раздельно. Решетки бывают прозрачные (кварцевые пластины) и отражательные (металлические пластины). На лучших решетках до 1200 делений на 1 мм.

Задания к теме.

Задание 4. От двух когерентных источников  $S_1$  и  $S_2$  ( $\lambda = 0.8$  мкм) лучи попадают на экран. На экране наблюдается интерференционная картина. Когда на пути одного из лучей перпендикулярно ему поместили мыльную пленку ( $n = 1.33$ ), интерференционная картина изменилась на противоположную. При какой наименьшей толщине  $d_{\min}$  пленки это возможно?

- 1) 1,21 мкм;
- 2) 6,03 мм;
- 3) 15,70 мм;
- 4) 12,94 мкм.

Задание 5. Появление цветных радужных пятен на поверхности воды, покрытой тонкой бензиновой или масляной пленкой является следствием явления

- 1) Интерференции света;
- 2) Дифракции света;
- 3) Поляризации света;
- 4) Дисперсии света.

Задание 6. Разность хода двух интерферирующих лучей равна  $\lambda/4$  ( $\lambda$  – длина волны). Разность фаз колебаний равна:

- 1)  $90^\circ$ ;
- 2)  $30^\circ$ ;

- 3)  $60^\circ$ ;
- 4)  $45^\circ$ .

Задание 7. Складываются два гармонических колебания одного направления с одинаковыми частотами и равными амплитудами  $A_0$ . При разности фаз  $\Delta\varphi = \pi/2$  амплитуда результирующего колебания равна...

- 1)  $A_0\sqrt{2}$ ;
- 2)  $A_0\sqrt{3}$ ;
- 3) 0;
- 4)  $2A_0$ .

Задание 8. Складываются два гармонических колебания одного направления с одинаковыми частотами и равными амплитудами  $A_0$ . При разности фаз  $\Delta\varphi = \pi$  амплитуда результирующего колебания равна...

- 1) 0;
- 2)  $A_0\sqrt{2}$ ;
- 3)  $A_0\sqrt{3}$ ;
- 4)  $2A_0$ .

Задание 9. При интерференции когерентных лучей с длиной волны 400 нм максимум второго порядка возникает при разности хода ...

- 1) 800 нм;
- 2) 200 нм;
- 3) 400 нм;
- 5) 100 нм.

Задание 10. Из приведенных утверждений, касающихся сложения волн, верным является следующее утверждение:

- 1) суммарная интенсивность при интерференции двух когерентных волн зависит от разности фаз интерферирующих волн;
- 2) при интерференции когерентных волн одинаковой интенсивности суммарная интенсивность равна учетверенной интенсивности каждой волны;
- 3) при сложении когерентных волн суммарная интенсивность равна сумме интенсивностей складываемых волн.

Задание 11. Когерентные волны с начальными фазами  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  и разностью хода  $\Delta$  при наложении максимально ослабляются при выполнении условия ( $k = 0, 1, 2$ )...

- 1)  $\Delta = (2k+1)\lambda/2$ ;
- 2)  $\varphi_1 - \varphi_2 = 2k\pi$ ;
- 3)  $\Delta = k\lambda = 2k\lambda/2$ ;
- 4)  $\Delta = \lambda/4$ .

Задание 12. Оптическая разность хода лучей от двух когерентных источников  $S_1$  и  $S_2$  равна 1,2 мкм. Если длина волны в вакууме 600 нм, то в точке наблюдения будет ...

- 1) максимум интерференции, так как разность хода равна четному числу полуволн;
- 2) минимум интерференции, так как разность хода равна нечетному числу полуволн;
- 3) минимум интерференции, так как разность хода равна четному числу полуволн;
- 4) максимум интерференции, так как разность хода равна нечетному числу полуволн.

Задание 13. При интерференции когерентных лучей с длиной волны 400 нм минимум второго порядка возникает при разности хода...

- 1) 1000 нм;

- 2) 1200 нм;
- 3) 400 нм;
- 4) 800 нм.

Задание 14. Тонкая стеклянная пластинка с показателем преломления  $n$  и толщиной  $d$  находится между двумя средами с показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$  причем  $n_1 < n < n_2$ . На пластинку нормально падает свет с длиной волны  $\lambda$ . Разность хода интерферирующих отраженных лучей равна ...

- 1)  $2dn$ ;
- 2)  $2dn_1 + \lambda/2$ ;
- 3)  $2dn + \lambda/2$ ;
- 3)  $2dn_1$ .

Задание 15. Тонкая плёнка, освещённая белым светом, вследствие явления интерференции в отражённом свете имеет зелёный цвет. При уменьшении толщины плёнки она ...

- 1) посинеет;
- 2) покраснеет;
- 3) её цвет не изменится.

Задание 16. Складываются два гармонических колебания одного направления с одинаковыми периодами. Результирующее колебание имеет максимальную амплитуду при разности фаз равной ...

- 1) 0;
- 2)  $\frac{\pi}{4}$ ;
- 3)  $\frac{\pi}{2}$ ;
- 4)  $\pi$ .



Задание 17. Из приведенных утверждений, касающихся сложения волн, верным является следующее:

- 1) суммарная интенсивность при интерференции двух когерентных волн зависит от разности фаз интерферирующих волн;
- 2) при сложении когерентных волн суммарная интенсивность равна сумме интенсивностей складываемых волн;
- 3) при интерференции волн одинаковой интенсивности суммарная интенсивность равна учетверённой интенсивности каждой волны.

Задание 18. Масляное пятно на поверхности воды имеет вид, представляющий чередование concentричных цветных колец. Цвета от центра к периферии расположены в следующей последовательности: красный, зеленый, синий, зеленый, красный. При движении от центра пятна толщина масляной плёнки ...

- 1) сначала уменьшается, затем увеличивается;
- 2) не изменяется;
- 3) увеличивается;
- 4) уменьшается;
- 5) сначала увеличивается, затем уменьшается.

Задание 19. Когерентные волны с начальными фазами  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  и разностью хода  $\Delta$  при наложении максимально усиливаются при выполнении условия ( $k = 0, 1, 2, \dots$ )

1)  $\varphi_1 - \varphi_2 = 2k\pi$ ;

2)  $\Delta = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}$ ;

3)  $\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{\pi}{2}$ ;

4)  $\varphi_1 - \varphi_2 = (2k + 1)\pi$ .

Задание 20. На схеме разбиения волновой поверхности на зоны Френеля. Амплитуды колебаний, возбуждаемых в точке наблюдения 1-й, 2-й, 3-й и т.д. зонами, обозначим  $A_1, A_2, A_3$  и т.д. Амплитуда  $A$  результирующего колебания в точке наблюдения определяется выражением ...

- 1)  $A = A_1 - A_2 + A_3 - A_4 + \dots$ ;
- 2)  $A = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + \dots$ ;
- 3)  $A = A_1 + A_3 + A_5 + A_7 + \dots$ ;
- 4)  $A = A_2 + A_4 + A_6 + A_8 + \dots$ ;
- 5)  $A = A_1 - A_2 - A_3 - A_4 - \dots$

Задание 21. Если закрыть  $n$  открытых зон Френеля, а открыть только первую, то амплитуда в точке наблюдения ...

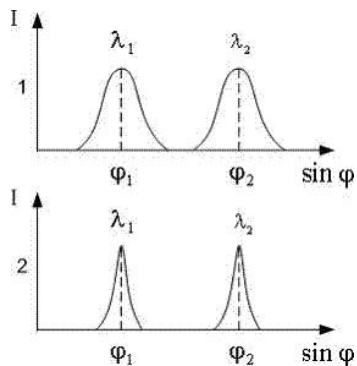
- 1) увеличится в 2 раза;
- 2) уменьшится в 2 раза;
- 3) увеличится в  $n$  раз;
- 4) не изменится.

Задание 22. На схеме разбиения волновой поверхности на зоны Френеля. Разность хода между лучами, идущими от края первой зоны и от края второй зоны до точки наблюдения равна ...

- 1)  $\lambda/2$ ;
- 2)  $\lambda$ ;
- 3) 0;
- 4)  $3\lambda/2$ ;
- 5)  $2\lambda$ .

Задание 23. Свет от некоторого источника представляет собой две плоские монохроматические волны с длинами  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ . У экспериментатора имеется две дифракционные решетки. Число щелей в этих решетках  $N_1$  и  $N_2$ , а их по-

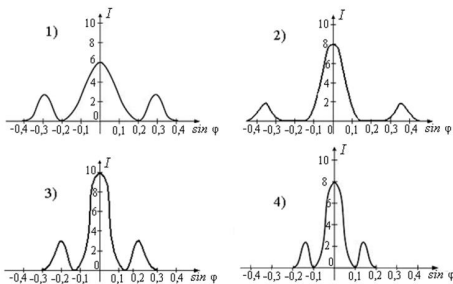
стоянные  $d_1$  и  $d_2$ , соответственно. При нормальном падении света на дифракционную решетку 1 получено изображение в максимуме  $m$ , показанное на рисунке 1. После того, как дифракционную решетку 1 поменяли на решетку 2, изображение максимума  $m$  стало таким, как показано на рисунке 2. Постоянная решетки и число щелей у этих решеток соотносятся следующим образом...



- 1)  $N_2 > N_1$ ;  $d_1 = d_2$ ;
- 2)  $N_1 = N_2$ ;  $d_1 = d_2$ ;
- 3)  $N_1 > N_2$ ;  $d_1 = d_2$ ;
- 4)  $N_1 = N_2$ ;  $d_1 > d_2$ ;
- 5)  $N_1 = N_2$ ;  $d_1 < d_2$ .

Задание 24. Имеются 4 решетки с различными постоянными  $d$ , освещаемые с одним и тем же монохроматическим излучением различной интенсивности.

Какой рисунок иллюстрирует положение главных максимумов, создаваемых дифракционной решеткой с наименьшей постоянной решетки? ( $I$  – интенсивность света,  $\varphi$  – угол дифракции).



- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 3;
- 4) 4.

Задание 25. Угол дифракции в спектре k-ого порядка больше для лучей...

- 1) красного цвета;
- 2) желтого цвета;
- 3) зеленого цвета;
- 4) фиолетового цвета.

### 1.3. Поляризация и дисперсия света.

Теоретическое введение.

#### 1.3.1. Поляризация света.

##### 1.3.1.1. Естественный и поляризованный свет.

В естественном свете колебания светового вектора совершаются хаотически по всем направлениям, так как в любом источнике света одновременно излучает очень большое количество атомов, имеющих различные фазы. Если световые колебания каким-либо образом упорядочены, то свет называется поляризованным. Рассмотрим характеристики поляризованного света.

Если есть два взаимно перпендикулярных электрических колебания, совершающихся вдоль осей X, Y и имеющих разность фаз  $\delta$ :

$$\begin{aligned} E_x &= A_1 \cos \omega t \\ E_y &= A_2 \cos(\omega t + \delta) \end{aligned}$$

То результирующая напряженность складывающихся колебаний:

$$\vec{E} = \vec{E}_x + \vec{E}_y.$$

Угол между векторами  $\vec{E}$  и  $\vec{E}_x$  определяется соотношением:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{E_y}{E_x} = \frac{A_2 \cos(\omega t + \delta)}{A_1 \cos \omega t}.$$

Из выражения для тангенса видно:

1. Если разность фаз  $\delta$  хаотически изменяется, то направление вектора  $\vec{E}$  будет неупорядоченно изменяться. Поэтому естественный свет представляют в виде сложения двух некогерентных колебаний, поляризованных во взаимно перпендикулярных плоскостях с одинаковой интенсивностью.

2. Если колебания когерентны  $\delta = 0$  или  $\pi$ , то  $tg\varphi = \pm \frac{A_2}{A_1} = const$  - свет поляризованный.

3. Если  $A_2 = A_1$ ,  $\delta = \pm \frac{\pi}{2}$ , то  $tg\varphi = \mp tg\omega t$  - плоскость поляризации поворачивается с угловой скоростью  $\omega$ , то свет поляризован по кругу.

4. При  $A_2 = A_1$ ,  $\delta$  - произвольная постоянная – свет эллиптически поляризован. Конец вектора  $\vec{E}$  движется по эллипсу. Если  $\vec{E}$  вращается по часовой стрелке по отношению к направлению, противоположному направлению распространения луча, то поляризацию называют правой. В противном случае – левой. Плоскость, в которой колеблется вектор  $\vec{E}$ , называется плоскостью колебаний. Перпендикулярная ей плоскость – плоскостью поляризации. Пропуская естественный свет через поляризаторы, которые из всевозможных направлений колебаний пропускают лишь колебания в определенном направлении, параллельном плоскости поляризатора, получают полностью или частично поляризованный свет.

Если вращать идеальный поляризатор (анализатор), поставленный на пути частично поляризованного света, вокруг направления луча, то интенсивность прошедшего света изменяется от  $I_{min}$  до  $I_{max}$  при каждом повороте на  $\frac{\pi}{2}$ . Отсюда можно ввести характеристику частично поляризованного света - степень поляризации:

$$P = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}.$$

$P = 1$  если  $I_{\min} = 0$  – свет полностью поляризован.  $P = 0$  если  $I_{\min} = I_{\max}$  - свет естественный. К эллиптически поляризованному свету понятие степени поляризации неприменимо.

Если плоскость колебаний поляризованного света направлена под углом  $\varphi$  к плоскости поляризатора, то амплитуда прошедшего светового вектора  $A = A_0 \cos \varphi$ . Тогда интенсивность прошедшего света:

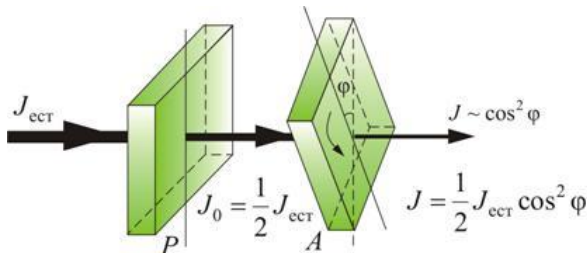
$$I = I_0 \cos^2 \varphi,$$

представленное выражение есть закон Малюса,  $\cos^2 \varphi$  - выражает долю интенсивности света, прошедшего через анализатор.

При прохождении естественного света через поляризатор, так как все направления  $\varphi$  равновероятны, вращение поляризатора не приводит к изменению интенсивности на выходе поляризатора. Так как среднее значение  $\cos^2 \varphi = \frac{1}{2}$ , то интенсивность поляризованного света равна половине интенсивности естественного света  $I = \frac{1}{2} I_{\text{ест}}$ .

Интенсивность света, прошедшего через два поляризатора, плоскости которых находятся под углом  $\varphi$ :

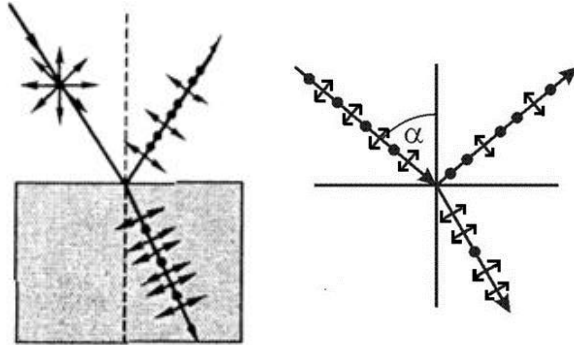
$$I = \frac{I_{\text{ест}}}{2} \cos^2 \varphi.$$



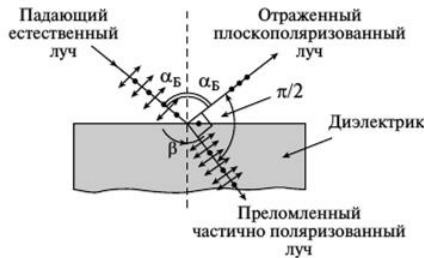
### 1.3.1.2. Поляризация при отражении и преломлении.

При падении света на границу раздела двух диэлектриков под углом падения, отличным от нуля, и отраженный луч, и преломленный оказываются ча-

стично поляризованными. В отраженном луче преобладают колебания, перпендикулярные плоскости падения, в преломленном луче преобладают колебания, параллельные плоскости падения. Падающий свет естественный, отраженный и преломлённый свет поляризованный.



При угле падения  $\alpha = \alpha_{бр}$  (угол Брюстера), определяемого из условия  $tg \alpha_{бр} = n_{21}$ , отраженный луч оказывается полностью поляризованным.



Степень поляризации преломлённого луча максимальна, но  $P \neq 1$ . При  $\alpha = \alpha_{бр}$  отраженный луч и преломленный луч перпендикулярны.

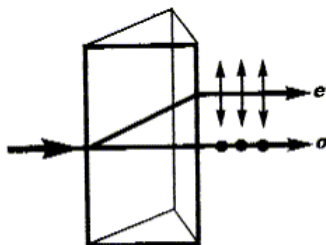
Интенсивности отраженных и преломленных волн:

$$I' = I_o \left( \frac{n_{21} - 1}{n_{21} + 1} \right)^2,$$

$$I'' = I_o \cdot n_{21} \left( \frac{2}{n_{21} + 1} \right)^2.$$

### 1.3.1.3. Прохождение поляризованного света через анизотропные среды.

При падении света на прозрачный кристалл (кроме кубических систем) происходит разделение луча на два луча, которые распространяются в кристалле по разным направлениям и с разными скоростями. Это явление называют двойным лучепреломлением.



Один из лучей называется обыкновенным (о), он подчиняется обычному закону преломления, другой – необыкновенным (е), так как отношение синусов углов падения и преломления зависит от угла падения и преломленный луч, как правило, не лежит в одной плоскости с падающим лучом и нормалью к поверхности.

Такое поведение света объясняется анизотропией кристаллов (т.е. зависит их свойств от направления).

Кристаллы, разделяющие луч на обыкновенный и необыкновенный, называются одноосными (исландский шпат, кварц, турмалин).

У этих кристаллов есть направление, называемое оптической осью кристалла, распространяясь вдоль которого «о» и «е» лучи не разделяются и движутся с одинаковой скоростью (ось кристалла не прямая, а направление в кристалле).

У двухосных кристаллов оба луча необыкновенные (слюда, гипс).

Любая плоскость, проходящая через оптическую ось кристалла, называется главным сечением кристалла. Для удобства её проводят через световой луч.

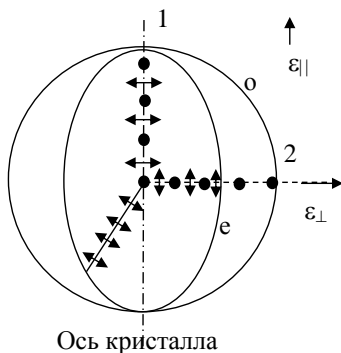
При выходе из кристалла «о» и «е» лучи оказываются поляризованными во взаимно перпендикулярных направлениях. В «о» - луче колебания  $\vec{E}$  пер-



пендикулярны главному сечению, а плоскость колебаний в «е» - луче совпадает с главным сечением.

Явление большего поглощения одного из лучей (о или е) называется дихроизмом, а вещество, обладающее таким свойством, - поляридом (турмалин, одинаково направленные кристаллы йодистого сульфата)

Двойное лучепреломление объясняется анизотропией кристаллов, диэлек-



трическая проницаемость  $\varepsilon$  в направлении главной оптической оси и в направлениях перпендикулярных ей различны.

Следовательно, так как  $n = \sqrt{\varepsilon}$ , то электромагнитным волнам с различными направлениями вектора  $\vec{E}$  соответствуют разные показатели преломления и скорости распространения.

В направлении главной оптической оси кристалла скорости  $v$  и одинаковы. Для одноосного кристалла можно ввести показатель преломления обыкновенного луча:

$$n_0 = \frac{c}{v_0},$$

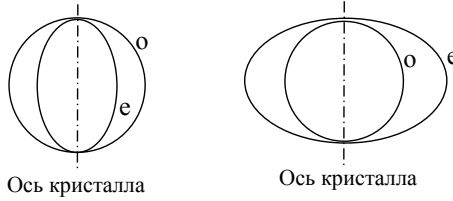
$$v_0 = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{\perp}}},$$

Показатель преломления необыкновенного луча, перпендикулярного оптической оси:

$$n_0 = \frac{c}{v_e},$$

$$v_e = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{\parallel}}}.$$

При  $\alpha = 0$  направление колебаний совпадает с направлением главной оптической оси.



В зависимости от того, какая из скоростей  $v_e$  и  $v_0$  больше различают положительные кристаллы при  $v_e < v_0$ , ( $n_e > n_0$ ), и отрицательные кристаллы – при  $v_e > v_0$ , ( $n_e < n_0$ ).

### 1.3.2. Дисперсия света.

Явление зависимости показателя преломления вещества от длины волны называют дисперсией света  $n = f(\lambda_0)$ ,  $\lambda_0$  - длина световой волны в вакууме.

Дисперсией вещества называют производную  $n$  по  $\lambda_0$ :  $D = \left( \frac{dn}{d\lambda_0} \right)$ . Для всех

прозрачных сред показатель преломления  $n$  видимого света с увеличением

длины волны  $\lambda_0$  уменьшается, откуда следует  $\frac{dn}{d\lambda_0} < 0, \left( \frac{dn}{d\omega} > 0 \right)$  - это нор-

мальная дисперсия.

Если белый свет пропускать через трёхгранную стеклянную призму, то прошедший свет разлагается в дисперсионный спектр.

Так как с увеличением длины волны показатель преломления уменьшается, то красный свет, которому соответствует большая длина волны, отклоняется на меньший угол по сравнению с другими цветами. Фиолетовый цвет,

которому соответствует самая малая длина волны видимого света, отклоняется на самый большой угол. Это можно проиллюстрировать рисунком:



Дисперсия света служит причиной появления радуги.

#### Задания к теме.

Задание 26. Угол между плоскостями пропускания двух поляризаторов равен  $45^\circ$ . Если угол увеличить в 2 раза, то интенсивность света, прошедшего через оба поляризатора ....

- 1) станет равной нулю;
- 2) увеличится в 3 раза;
- 3) увеличится в 2 раза;
- 4) увеличится в 1,41 раз.

Задание 27. Пучок естественного света проходит через два идеальных поляризатора. Интенсивность естественного света равна  $I_0$ , угол между плоскостями пропускания поляризаторов равен  $\varphi$ . Согласно закону Малюса интенсивность света после первого поляризатора равна ....

- 1)  $I = \frac{I_0}{2} \cos^2 \varphi$ ;
- 2)  $I = \frac{I_0}{2}$ ;
- 3)  $I = I_0 \cos^2 \varphi$ ;
- 4)  $I = I_0$ .

Задание 28. На идеальный поляризатор падает свет интенсивности  $J_{\text{ест}}$  от обычного источника. При вращении поляризатора вокруг направления распространения луча интенсивность света за поляризатором ...

- 1) не меняется и равна  $J_{\text{ест}}/2$ ;
- 2) меняется от  $J_{\text{ест}}$  до  $J_{\text{max}}$ ;
- 3) меняется от  $J_{\text{min}}$  до  $J_{\text{max}}$ ;
- 4) не меняется и равна  $J_{\text{ест}}$ .

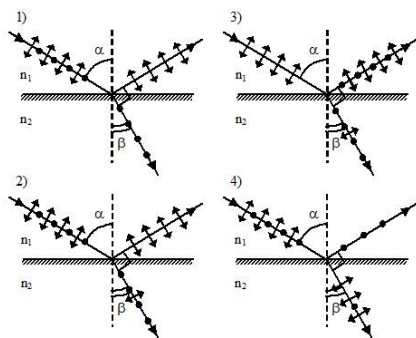
Задание 29. Естественный свет проходит через стеклянную пластинку и частично поляризуется. Если на пути света поставить ещё одну такую же пластинку, то степень поляризации света ...

- 1) увеличится;
- 2) уменьшится;
- 3) не изменится.

Задание 30. При пропускании пучка естественного света через два последовательных идеальных поляризатора, угол между осями свободного пропускания которых  $45^\circ$ , интенсивность пучка...

- 1) уменьшится в 4 раза;
- 2) уменьшится в 2 раза;
- 3) уменьшится в  $\sqrt{2}$  раз;
- 4) не изменится.

Задание 31. Явление поляризации света при отражении правильно изображает рисунок (двухсторонними стрелками и точками указано направление колебаний светового вектора)...



- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 3;
- 4) 4.

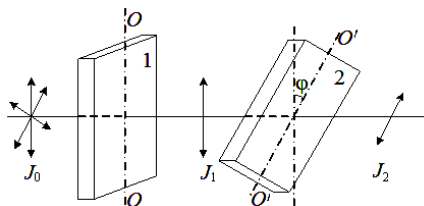
Задание 32. На диэлектрическое зеркало под углом Брюстера падает луч естественного света. Для отражённого и преломлённого луча справедливы утверждения:...

- 1) отражённый луч полностью поляризован;
- 2) оба луча не поляризованы;
- 3) отражённый луч поляризован частично;
- 4) преломлённый луч полностью поляризован.

Задание 33. При падении света из воздуха на диэлектрик отражённый луч полностью поляризован. Угол преломления равен  $30^\circ$ . Тогда показатель преломления равен ...

- 1) 1,73;
- 2) 2,0;
- 3) 1,41;
- 4) 1,5.

Задание 34. На пути естественного света помещены две пластинки турмалина. После прохождения пластинки 1 свет полностью поляризован. Если  $J_1$  и  $J_2$  – интенсивности света, прошедшего пластинки 1 и 2 соответственно, и угол между направлениями  $OO$  и  $O'O'$   $\varphi = 30^\circ$ , то  $J_1$  и  $J_2$  связаны соотношением ...



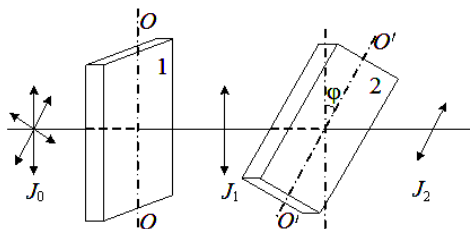
1)  $J_2 = \frac{3}{4} J_1$ ;

2)  $J_2 = \frac{J_1}{2}$ ;

3)  $J_2 = \frac{J_1}{4}$ ;

4)  $J_2 = J_1$ .

Задание 35. На пути естественного света помещены две пластинки турмалина. После прохождения пластинки 1 свет полностью поляризован. Если  $J_1$  и  $J_2$  – интенсивности света, прошедшего пластинки 1 и 2 соответственно, и угол между направлениями  $OO$  и  $O'O'$   $\varphi = 0^\circ$ , то  $J_1$  и  $J_2$  связаны соотношением ...



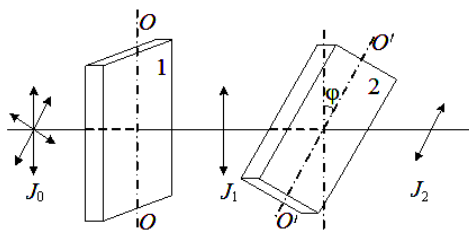
1)  $J_2 = J_1$ ;

2)  $J_2 = \frac{J_1}{2}$ ;

$$3) J_2 = \frac{J_1}{4}$$

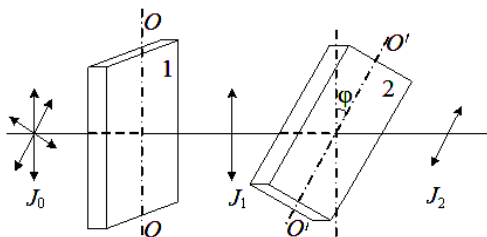
$$4) J_2 = \frac{3}{4} J_1.$$

Задание 36. На пути естественного света помещены две пластинки турмалина. После прохождения пластинки 1 свет полностью поляризован. Если  $J_1$  и  $J_2$  – интенсивности света, прошедшего пластинки 1 и 2 соответственно, и  $J_2 = 0$ , то угол между направлениями  $OO$  и  $O'O'$  равен ...



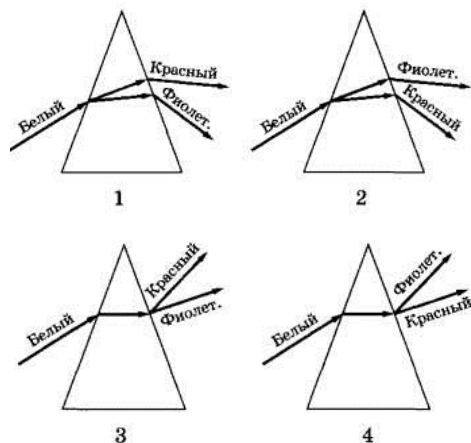
- 1)  $90^\circ$ ;
- 2)  $30^\circ$ ;
- 3)  $60^\circ$ ;
- 4)  $0^\circ$ .

Задание 37. На пути естественного света помещены две пластинки турмалина. После прохождения пластинки 1 свет полностью поляризован. Если  $J_1$  и  $J_2$  – интенсивности света, прошедшего пластинки 1 и 2 соответственно, и  $J_2 = J_1/4$ , тогда угол между направлениями  $OO$  и  $O'O'$  равен...



- 1)  $60^\circ$ ;
- 2)  $30^\circ$ ;
- 3)  $45^\circ$ ;
- 4)  $90^\circ$ .

Задание 38. Стекла́нная призма разлагает белый свет. На рисунках представле́н ход лучей в призме. Правильно отражает реальный ход лучей рисунок ....



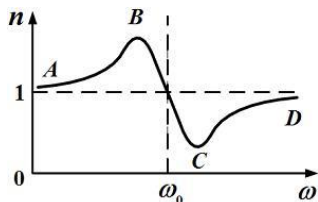
- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 3;
- 4) 4.

Задание 39. При прохождении белого света через трехгранную призму наблюдается его разложение в спектр. Это явление объясняется...

- 1) дисперсией света;
- 2) дифракцией света;
- 3) поляризацией света;
- 4) интерференцией света.



Задание 40. Кривая дисперсии в области одной из полос поглощения имеет вид, показанный на рисунке. Соотношение между фазовой и групповой скоростями для участка  $bc$  имеет вид ...



- 1)  $u > v$ ;
- 2)  $u < v$ ;
- 3)  $u = v$ ;
- 4)  $u > v > c$ .

## Раздел 2. КВАНТОВАЯ ОПТИКА.

### 2.1. Тепловое излучение. Фотоэффект.

#### 2.1.1. Тепловое излучение. Квантовая природа излучения.

##### Теоретическое введение.

Тепловое излучение. Основные понятия. Закон Кирхгофа. Под тепловым излучением понимают излучение, создаваемое всеми телами за счет их внутренней энергии. Это электромагнитное излучение, которое с повышением температуры тела возрастает (существует еще хемилюминесценция, фотолюминесценция, электролюминесценция и т.д.).

Тепловое излучение – единственное излучение, которое может находиться в равновесии с излучающими телами.

Если излучающее тело окружить идеально отражающей оболочкой и откачать из нее воздух, то излучение, отражаясь от стенок, опять поглощается телом. В результате непрерывного обмена энергией между телом и заполняющим оболочку излучением установится равновесие между телом и излучением.

Энергия, поглощенная телом за единицу времени, равна излученной им энергии.

Энергия, которую излучает единица поверхности тела за единицу времени по всем направлениям (в пределах телесного угла  $2\pi$ ), во всем диапазоне длин волн называют энергетической светимостью.

Её обозначают  $R_T$ . Энергетическая светимость  $R_T$  является интегральной характеристикой теплового излучения. Она зависит только от температуры излучающей поверхности.

Так как на разные длины волн (частоты) приходится различная энергия, то для определения различных характеристик равновесного теплового излучения вводится дифференциальная характеристика, которую называют спектральной плотностью (испускательной способностью) излучения. Эта величина показывает, какая энергия излучается единицей поверхности тела за единицу времени в единичном интервале частот, обозначается  $r(\omega, T)$ .

Тогда энергия, излучаемая с единицы площади за 1 с. в диапазоне частот от  $\omega$  до  $\omega + d\omega$  определяется как:

$$dR_\omega = r(\omega, T)d\omega$$

Тогда энергетическая светимость будет связана со спектральной плотностью излучения соотношением:

$$R_T = \int dR_\omega = \int r(\omega, T)d\omega$$

Если на элементарную площадку за единицу времени падает энергия  $d\Phi_\omega$ , обусловленная электромагнитными волнами, заключенными в интервале  $d\omega$  и часть её  $d\Phi'_\omega$  будет поглощена телом, то величину, равную отношению поглощенной энергии к падающей энергии в интервале частот  $d\omega$  называют поглощательной способностью тела:

$$a(\omega, T) = \frac{d\Phi'_\omega}{d\Phi_\omega}$$

Из закона сохранения энергии следует, что  $a(\omega, T) \leq 1$ . Тело, для которого  $a(\omega, T) \equiv 1$ , называется абсолютно черным (поглощает излучение во всем диапазоне частот),  $a(\omega, T) = \text{const} < 1$  – серое тело.

Между функциями  $r(\omega, T)$  и  $a(\omega, T)$  существует связь. Чем больше у тела  $r$ , тем больше  $a$ . Закон, устанавливающий эту связь, называется законом Кирхгофа - отношение испускательной способности тела к его поглощательной способности для всех тел является универсальной функцией частоты и температуры:

$$\frac{r(\omega, T)}{a(\omega, T)} = f(\omega, T),$$

где  $f(\omega, T)$  - универсальная функция Кирхгофа. Если перейти от частоты  $\omega$  к длине волны  $\lambda$  и интервалу  $d\omega$  соответствует участок  $d\lambda$ , то из соотношения  $\omega = 2\pi \frac{c}{\lambda}$  следует:

$$d\omega = -2\pi c \frac{d\lambda}{\lambda^2} \Rightarrow d\lambda = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} d\omega,$$

$$dR_\omega = dR_\lambda,$$

$$r(\omega, T)d\omega = r(\lambda, T)d\lambda,$$

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

Для теплового равновесия нескольких тел в полости с температурой  $T$  справедливо равенство отношений:

$$\frac{r_1(\omega, T)}{a_1(\omega, T)} = \frac{r_2(\omega, T)}{a_2(\omega, T)} = \dots$$

Излучение, каких частот тело лучше излучает, такое же излучение оно лучше поглощает.

Законы излучения абсолютно черного тела Закон Вина, Стефана. – Больцмана, формула Планка.

Для абсолютно черного тела  $a(\omega, T) \equiv 1$  поэтому  $r(\omega, T) = f(\omega, T)$ . Таким образом, универсальная функция Кирхгофа по-другому излучательная способность абсолютно черного тела. В природе абсолютно черных тел нет (Солнце, сажа, платиновая чернь).

Устройство, излучение которое близко к излучению абсолютно черного тела, представляет собой замкнутую полость с маленьким отверстием. Любое излучение за счет многократных отражений поглощается. Раскладывая в спектр с помощью дифракционной решетки излучение такой полости и, измеряя интенсивность различных участков спектра, можно найти экспериментально вид  $f(\omega, T)$  - универсальную функцию Кирхгофа. При экспериментальных исследованиях функцию Кирхгофа  $f(\omega, T)$  представляют через функцию, выраженную через длину волны  $\varphi(\lambda, T)$ .

Попытки теоретически получить  $f(\omega, T)$  или  $\varphi(\lambda, T)$  не увенчались успехом из-за использования классических представлений о процессе испускания электромагнитного излучения.

Больцман, используя термодинамические соображения, получил, что энергетическая светимость абсолютно черных тел связана с абсолютной температурой соотношением:

$$R = \int f(\omega, T) d\omega = \sigma \cdot T^4,$$

закон Стефана-Больцмана,  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{Вт}{м^2 K^4}$  - постоянная закона Стефана-Больцмана.

Используя кроме законов термодинамики электромагнитную теорию, Вин показал, что функция Кирхгофа имеет вид

$$f(\omega, T) = \omega^3 F\left(\frac{\omega}{T}\right),$$

$$\varphi(\lambda, T) = \frac{1}{\lambda^5} F'(\lambda T).$$

Дифференцируя последнее выражение по  $\lambda$  и приравнявая к 0 ( $\frac{d\varphi}{d\lambda} = 0$ ) получим длину волны излучения  $\lambda_m$ , на которую приходится максимум излучательной способности:

$$\lambda_m \cdot T = b = const = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}.$$

Релеем и Джинсом на основании подсчета стоячих электромагнитных волн в замкнутой полости для всех частот и исходя из теоремы классической статистики о равномерном распределении энергии по степеням свободы. На магнитную и электрическую составляющую энергии волны, приходится по  $\frac{1}{2}kT$  на каждую. Был проделан безупречный с точки зрения классической физики вывод выражения для  $f(\omega, T)$ , который согласовывался с функцией Вина. Формула Релея-Джинса:

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

Однако с экспериментальной зависимостью  $f(\omega, T)$  эта формула удовлетворительно согласовывалась только в области больших длин волн. В области коротких длин волн она приводила к так называемой ультрафиолетовой катастрофе.

Катастрофа заключалась в том, что тело, за короткое время, излучая в области коротких длин волн, должно было остыть до абсолютного нуля.

Выход из создавшегося положения был найден Максом Планком. В качестве «рабочей» гипотезы Планк предположил, что электромагнитное излучение испускается в виде отдельных порций энергии (квантов) пропорциональных частоте излучения:

$$E = \hbar \omega \quad ,$$

где  $\omega = 2\pi\nu$  ,  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$  ,  $h$  – постоянная Планка (квант действия),  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$

Дж·с,  $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.

Такое предположение противоречило всем представлениям классической физики, но как оказалось, оно было единственно верным и оказало решающую роль на развитие представлений о природе излучения. Благодаря предположению, что энергия излучения кратна  $h\nu$  и подсчету числа квантов по распределению Больцмана  $\left(N_n = A \cdot \exp\left(\frac{\varepsilon_n}{kT}\right)\right)$  Планком было получено выражение для функции  $f(\omega, T)$ :

$$f(\omega, T) = \frac{\hbar\omega^3}{4\pi^2c^2} \frac{1}{\left(\exp\left(\frac{\hbar\omega}{kT}\right) - 1\right)}.$$

Эта формула точно согласуется с экспериментальными данными во всем интервале частот от нуля до бесконечности.

Для длин волн:

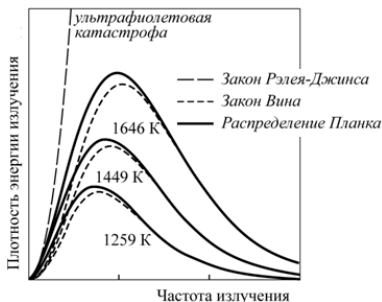
$$\varphi(\lambda, T) = \frac{4\pi^2\hbar c^2}{\lambda^5} \frac{1}{\left(\exp\left(\frac{2\pi\hbar c}{kT\lambda}\right) - 1\right)}.$$

Из формулы Планка вытекают и закон Стефана-Больцмана, и закон смещения Вина

$$R = \int f(\omega, T)d\omega = \frac{\pi^2k^4}{60c^2\hbar^3} T^4 = \sigma T^4,$$

$$\frac{d\varphi(\lambda, T)}{d\lambda} = 0 \Rightarrow T\lambda_m = \frac{2\pi\hbar c}{4.9651k} = b.$$

Формула Планка дает исчерпывающее описание равновесного теплового излучения.

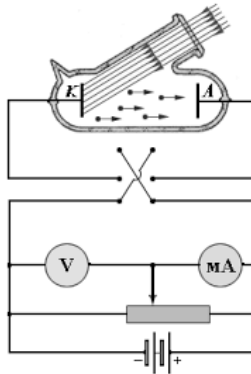


### 2.1.2. Внешний фотоэффект. Фотоны.

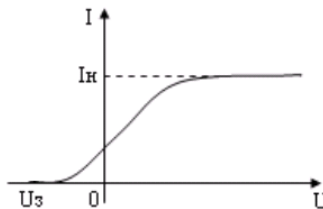
Под внешним фотоэффектом понимается явление вырывания электронов с поверхности вещества под действием электромагнитного излучения.

Это явление было обнаружено Герцем. Было установлено, что при освещении ультрафиолетовым светом одного из шариков разрядника проскакивание искры облегчается. Так же было обнаружено, что отрицательно заряженные тела при освещении быстро разряжаются.

Столетовым при помощи установки, показанной на рисунке, было показано, что испускаемые под действием света частицы имеют отрицательный заряд. Ленард и Томсон показали, что ими являются электроны.



Вид вольтамперной характеристики и зависимость фототока от напряжения между А и К показан на рис.



Законы фотоэффекта:

1. Количество электронов, испускаемых катодом или ток насыщения, при неизменном спектральном составе падающего излучения прямо пропорцио-

нально интенсивности излучения или освещенности катода (количеству квантов света).

2. Кинетическая энергия фотоэлектронов не зависит от интенсивности излучения, а зависит от частоты падающего излучения. Она определяется по задерживающей разности потенциала  $U_3$ .

3. Для каждого вещества, у которого возможен фотоэффект, существует минимальная частота (или максимальная длина волны излучения), при которой фотоэффект исчезает.

Максимальное значение кинетической энергии фотоэлектронов определяется по обращению в ноль силы фототока при задерживающем напряжении между катодом и анодом:

$$\frac{m_e v_m^2}{2} = eU_3.$$

Второй закон фотоэффекта противоречит электромагнитной теории света. В 1905 году Эйнштейн показал, что все закономерности фотоэффекта можно объяснить, если считать, что излучение не только испускается, но и поглощается в виде порциями энергии. Если электрон, находящийся у самой поверхности вещества, взаимодействует с квантом света, то справедлива формула Эйнштейна:

$$h\nu = \hbar\omega = \frac{m_e v_m^2}{2} + A,$$

где  $A$  – работа выхода электрона из металла.

Фототок и работа выхода сильно зависят от состояния поверхности металлов. Если энергии кванта достаточно только на вырывание электрона, то

$$h\nu_{min} = A,$$

$\nu_{min} = \frac{A}{h}$  - красная граница фотоэффекта. При выполнении условия  $\nu < \nu_{min}$

( $\lambda > \lambda_{min}$ ) фотоэффект не наблюдается  $\left( \lambda_{max} = \frac{ch}{A} \right)$ .



При создании лазеров стало возможным наблюдать многофотонный фотоэффект:

$$Nh\nu = \frac{m_e v_m^2}{2} + A \quad (N = 2, 3, \dots).$$

Задания к теме.

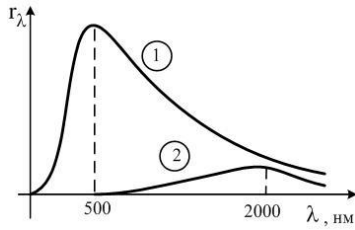
Задание 41. Длина волны, на которую приходится максимум энергии в спектре излучения черного тела,  $\lambda_{\max} = 0,58$  мкм. Определить энергетическую светимость  $R_e$  поверхности тела.

- 1)  $3,54 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>;
- 2)  $7,08 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>;
- 3)  $1,77 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>;
- 4)  $0,89 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>.

Задание 42. Определить максимальную скорость  $v_{\max}$  фотоэлектронов, вырываемых с поверхности серебра: 1) ультрафиолетовым излучением с длиной волны  $\lambda_1 = 0,155$  мкм; 2)  $\gamma$  - излучением с длиной волны  $\lambda_2 = 1$  пм.

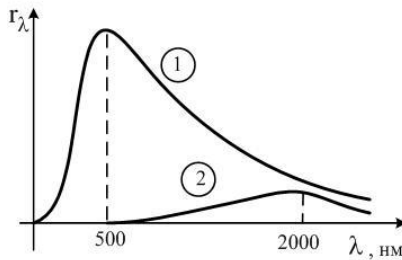
- 1)  $1,08 \cdot 10^6$  м/с,  $2,85 \cdot 10^8$  м/с;
- 2)  $2,85 \cdot 10^8$  м/с,  $1,08 \cdot 10^6$  м/с;
- 3)  $5,70 \cdot 10^8$  м/с,  $0,56 \cdot 10^8$  м/с;
- 4)  $1,63 \cdot 10^8$  м/с,  $2,85 \cdot 10^8$  м/с.

Задание 43. На рисунке показаны кривые зависимости спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела от длины волны при разных температурах. Если длина волны, соответствующая максимуму излучения, уменьшилась в 4 раза, то температура абсолютно черного тела ...



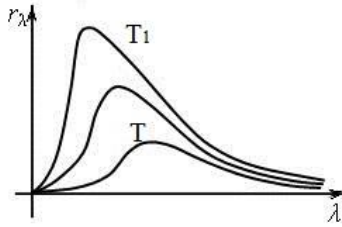
- 1) увеличилась в 4 раза;
- 2) увеличилась в 2 раза;
- 3) уменьшилась в 2 раза;
- 4) уменьшилась в 4 раза.

Задание 44. На рисунке показаны кривые зависимости спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела от длины волны при разных температурах. Если кривая 1 соответствует спектру излучения абсолютно черного тела при температуре 5800 К, то кривая 2 соответствует температуре (в К)...



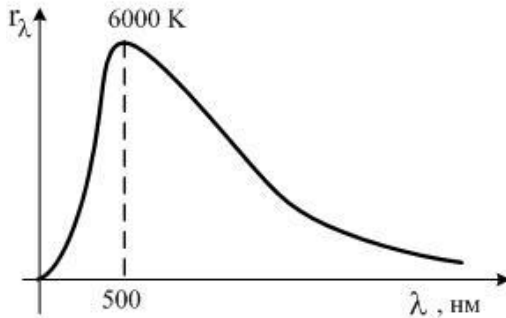
- 1) 1450;
- 2) 2900;
- 3) 1000;
- 4) 750.

Задание 45. На рисунке изображен спектр излучения абсолютно черного тела при температуре  $T$ . При температуре  $T_1$  площадь под кривой увеличилась в 81 раз. Температура  $T_1$  равна ....



- 1)  $3T$ ;
- 2)  $T/9$ ;
- 3)  $9T$ ;
- 4)  $T/3$ .

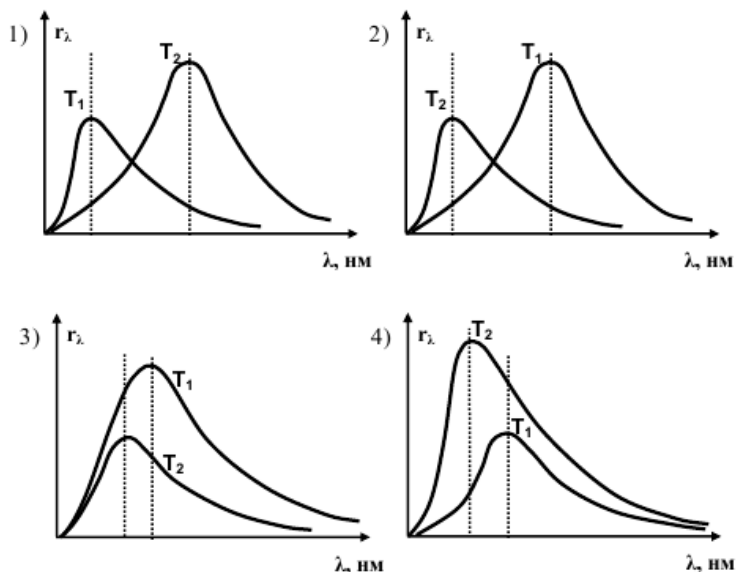
Задание 46. На рисунке показана кривая зависимости спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела от длины волны при  $T = 6000 \text{ K}$ , если температуру тела уменьшить в 4 раза, то длина волны, соответствующая максимуму излучения абсолютно черного тела,...



- 1) увеличится в 4 раза;
- 2) уменьшится в 2 раза;
- 3) уменьшится в 4 раза;
- 4) увеличится в 2 раза.

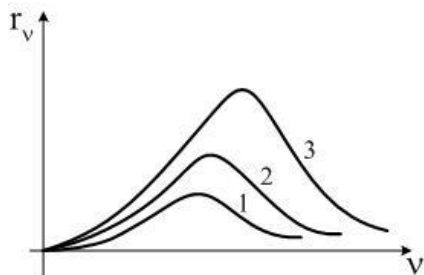
Задание 47. На рисунках по оси абсцисс отложена длина волны теплового излучения абсолютно чёрного тела, а по оси ординат отложена его излучатель-

ная способность. Кривые соответствуют двум температурам, причем  $T_1 < T_2$ . На качественном уровне правильно отражает законы излучения абсолютно чёрного тела рисунок



- 1) 1;
- 2) 1;
- 3) 3;
- 4) 4.

Задание 48. На рисунке представлены графики зависимости спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела от частоты при различных температурах. Наибольшей температуре соответствует график...

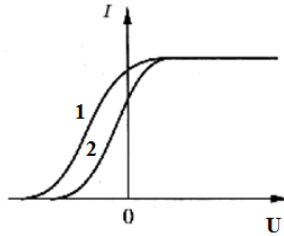


- 1) 3;
- 2) 1;
- 3) 2;
- 4) Нельзя определить.

Задание 49. Как изменится кинетическая энергия фотоэлектронов при фотоэффекте, если увеличить частоту излучения, падающего на поверхность, не изменяя освещённость поверхности?

- 1) Увеличится;
- 2) уменьшится;
- 3) не изменится;
- 4) кривая частотной зависимости кинетической энергии пройдёт через максимум;
- 5) ответ неоднозначен, так как кинетическая энергия зависит от работы выхода.

Задание 50. На рисунке изображены две вольтамперные характеристики вакуумного фотоэлемента. Если  $E$  - освещённость фотокатода,  $\nu$  - частота падающего на него света,  $I_{\phi}$  - сила фототока, то для данного случая справедливы соотношения ....



- 1)  $\nu_1 > \nu_2, E_1 = E_2$ ;
- 2)  $\nu_1 < \nu_2, E_1 = E_2$ ;
- 3)  $\nu_1 = \nu_2, E_1 > E_2$ ;
- 4)  $\nu_1 = \nu_2, E_1 < E_2$

Задание 51. Величина фототока насыщения при внешнем фотоэффекте зависит....

- 1) от интенсивности падающего света;
- 2) от величины задерживающего напряжения;
- 3) от частоты падающего света;
- 4) от работы выхода.

Задание 52. Катод вакуумного элемента освещается светом с энергией квантов 10 эВ. Если фототок прекращается при подаче на фотоэлемент задерживающего напряжения 4 В, то работа выхода электронов из катода равна ...

- 1) 6 эВ;
- 2) 7 эВ;
- 3) 2,5 эВ;
- 4) 14 эВ;
- 5) 0,4 эВ.

Задание 53. При изучении внешнего фотоэффекта увеличили освещённость катода. Это привело к ...

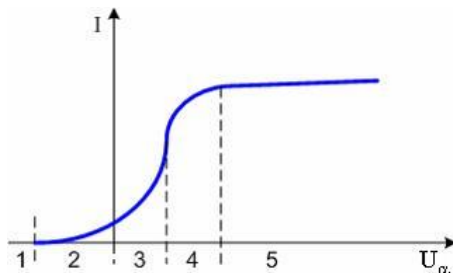
- 1) увеличению силы тока насыщения;

- 2) увеличению работы выхода электрона;
- 3) уменьшению работы выхода электрона;
- 4) увеличению значения задерживающего напряжения.

Задание 54. Кинетическая энергия электронов при внешнем фотоэффекте увеличивается, если...

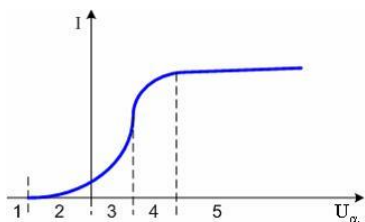
- 1) увеличивается энергия кванта падающего излучения;
- 2) уменьшается работа выхода электронов из металла;
- 3) увеличивается работа выхода электронов из металла;
- 4) увеличивается интенсивность светового потока;
- 5) уменьшается интенсивность светового потока.

Задание 55. Полному торможению всех вылетевших в результате фотоэмиссии электронов на графике вольт-амперной характеристики внешнего фотоэффекта соответствует область, отмеченная цифрой



- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 3;
- 4) 4;
- 5) 5.

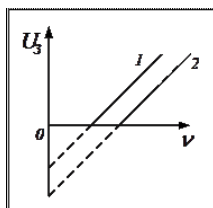
Задание 56. Какой области вольт-амперной характеристики для внешнего фотоэффекта соответствует утверждение: все электроны, вылетающие из катода в результате фотоэмиссии, достигают анода?



- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 3;
- 4) 4;
- 5) 5.

Задание 57. На рисунке представлены две зависимости задерживающего напряжения  $U_3$  от частоты  $\nu$  падающего света для внешнего фотоэффекта.

При этом справедливо утверждение:



- 1) зависимости получены для двух различных металлов;
- 2)  $A_2 < A_1$ , где  $A_1$  и  $A_2$  – значения работы выхода электронов из соответствующего металла;
- 3) с помощью этих зависимостей можно определить значение постоянной Планка.

## 2.2. Световое давление. Эффект Комптона.

### 2.2.1. Фотоны. Давление света.

#### Теоретическое введение.

Существование коротковолновой границы рентгеновского излучения, законы теплового излучения, явление фотоэффекта доказывали существование особых световых частиц – фотонов.



Энергия фотона прямо пропорциональна частоте:

$$E = h\nu = \hbar\omega.$$

Фотон – частица особого рода, так как масса покоя фотона равна 0, и фотон всегда движется со скоростью  $c$ . При движении фотонов в веществе время тратится на переизлучение фотона атомами.

Между импульсом фотона и его энергией существует соотношение:

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}, \quad p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda},$$

так как  $\frac{2\pi}{\lambda} = k$ , то  $\vec{p} = \hbar\vec{k}$ , где  $\vec{k}$  – волновой вектор.

Давление света на поглощающую поверхность может быть объяснено передачей импульса квантами света<sup>^</sup>

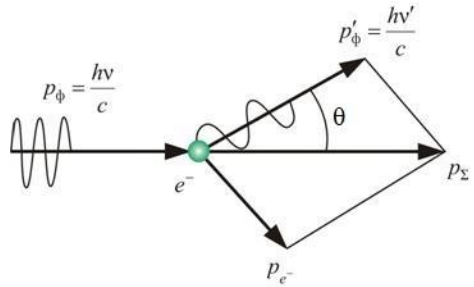
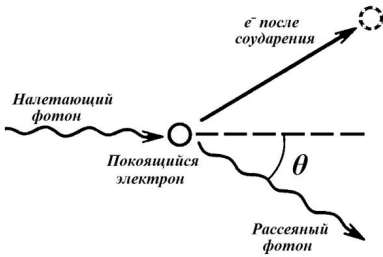
$$P = \frac{E}{c}nc = En = \omega,$$

$En$  – энергия фотонов в единице объема,  $\omega$  – объемная плотность электромагнитной энергии.

При отражении фотона от зеркальной поверхности, он передает ей импульс равный  $2P$ . Следовательно, давление для отражающей зеркальной поверхности  $P = 2\omega$ .

### 2.2.2. Эффект Комптона.

Доказательством корпускулярных свойств электромагнитного излучения явилось увеличение длины волны света, рассеянного веществом. Изучая рассеяние рентгеновских лучей различными веществами, Комптон обнаружил, что рассеянный свет имеет большую длину волны, чем падающее на вещество излучение.



Разность  $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$  зависит от угла  $\theta$  между первоначальным направлением рентгеновского луча и направлением рассеянного излучения. От длины волны и рода вещества  $\Delta\lambda$  не зависит.

Явление Комптона можно объяснить упругим столкновением рентгеновских фотонов со свободными (слабо связанными) с атомом электронами.

Пусть на первоначально неподвижный свободный электрон падает фотон с энергией  $\hbar\omega$  и импульсом  $\hbar\vec{k}$ . После столкновения с электроном импульс и энергия фотона станут соответственно  $\hbar\vec{k}'$  и  $\hbar\omega'$ . Электрон будет иметь импульс  $P$  и энергию:

$$E = c\sqrt{p^2 + m^2c^2}.$$

Согласно законам сохранения импульса и закона сохранения энергии получим

$$\hbar\vec{k} = \vec{p} + \hbar\vec{k}',$$

$$\hbar\omega + mc^2 = \hbar\omega' + c\sqrt{p^2 + m^2c^2}.$$

Из этих соотношений можно получить:

$$\lambda' - \lambda = \Delta\lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta),$$

где  $\lambda = \frac{h}{mc}$  - комптоновская длина волны;  $\theta$  - угол рассеяния фотона;  $m$  - масса покоя электрона или той частицы, на которой происходит рассеяние.

Задания к теме.

Задание 58. В результате эффекта Комптона фотон при соударении с электроном был рассеян на угол  $\theta = 90^\circ$ . Энергия рассеянного фотона  $\varepsilon_2 = 0,4$  МэВ, энергия фотона  $\varepsilon_1$  до рассеяния ....

- 1) 1,85 МэВ;
- 2) 0,98 МэВ;
- 3) 3,70 МэВ;
- 4) 0.25 МэВ.

Задание 59. Пучок монохроматического света с длиной волны  $\lambda = 663$  нм падает на зеркальную плоскую поверхность. Поток излучения  $\Phi_e = 0,6$  Вт, 1) сила давления  $F$ , испытываемая этой поверхностью; 2) число фотонов ежесекундно падающих на поверхность ....

- 1) 4 нН,  $2 \cdot 10^{18} \text{ с}^{-1}$ ;
- 2) 1 нН,  $6 \cdot 10^{18} \text{ с}^{-1}$ ;
- 3) 2 нН,  $4 \cdot 10^{18} \text{ с}^{-1}$ ;
- 4) 12 нН,  $8 \cdot 10^{18} \text{ с}^{-1}$ .

Задание 60. Изменение длины волны рентгеновского излучения ( $\Delta\lambda$ ) при комптоновском рассеянии зависит ...

- 1) от угла рассеяния излучения;
- 2) от свойств рассеивающего вещества;
- 3) от энергии падающего фотона.

Задание 61. Рентгеновский фотон, падающий на мишень ( $\gamma$ ), рассеянный фотон ( $\gamma'$ ) и электрон отдачи ( $e$ ). Угол рассеяния  $90^\circ$ , направление движения электрона отдачи составляет с направлением падающего фотона угол  $\varphi = 30^\circ$ . Если импульс падающего фотона  $P_\gamma$ , то импульс электрона отдачи равен ....

1)  $\frac{2}{\sqrt{3}} P_{\Phi}$ ;

2)  $1,5\sqrt{3} P_{\Phi}$ ;

3)  $1,5 P_{\Phi}$ ;

4)  $\sqrt{3} P_{\Phi}$ .

Задание 62. Рентгеновский фот, падающий на мишень ( $\gamma$ ), рассеянный фот ( $\gamma'$ ) и электрон отдачи ( $e$ ). Угол рассеяния  $90^{\circ}$ , направление движения электрона отдачи составляет с направлением падающего фотона угол  $\varphi = 30^{\circ}$ , если импульс падающего фотона равен  $3$  (МэВ·с)/м, то импульс рассеянного фотона (в тех же единицах) равен...

1)  $\sqrt{3}$ ;

2)  $2\cdot\sqrt{3}$ ;

3)  $1,5$ ;

4)  $1,5\cdot\sqrt{3}$ .

Задание 63. Если зеркальную пластинку, на которую падает свет, заменить на зачерненную той же площади, то световое давление....

1) уменьшится в 2 раза;

2) увеличится в 2 раза;

3) останется неизменным;

4) увеличится в 4 раза.

Задание 64. Если параллельный пучок  $N$  фотонов с частотой  $\nu$  падает каждую секунду на абсолютно черную поверхность площадью  $S$ , то он производит на нее давление, равное ....

1)  $h\nu\cdot N/Sc$ ;

2)  $2h\nu\cdot N/c$ ;

- 3)  $h\nu \cdot N S / c$ ;
- 4)  $2h\nu \cdot N / S c$ .

Задание 65. На черную пластинку падает поток света. Если объемную плотность энергии падающего излучения увеличить в 2 раза, а площадь пластинки уменьшить в 2 раза, то световое давление ....

- 1) увеличится в 2 раза;
- 2) останется неизменным;
- 3) уменьшится в 2 раза;
- 4) увеличится в 4 раза.

Задание 66. На зеркальную пластинку падает поток света. Если число фотонов, падающих на единицу поверхности в единицу времени, уменьшить в 2 раза, а зеркальную пластинку заменить черной, то световое давление ....

- 1) уменьшится в 4 раза;
- 2) останется неизменным;
- 3) уменьшится в 2 раза;
- 4) увеличится в 2 раза.

Задание 67. Одинаковое количество фотонов с длиной волны  $\lambda$  нормально падает на непрозрачную поверхность. Наибольшее давление свет будет оказывать в случае ...

- 1)  $\lambda = 400 \text{ нм}$ , поверхность – идеальное зеркало;
- 2)  $\lambda = 700 \text{ нм}$ , поверхность – идеальное зеркало;
- 3)  $\lambda = 700 \text{ нм}$ , поверхность – абсолютно чёрная;
- 4)  $\lambda = 400 \text{ нм}$ , поверхность – абсолютно чёрная.

Задание 68. Если зачерненную пластинку, на которую падает свет, заменить на зеркало той же площади, то световое давление ....

- 1) увеличится в 2 раза;
- 2) уменьшится в 2 раза;
- 3) останется неизменным.

Задание 69. На непрозрачную поверхность направляют поочерёдно поток одинаковой интенсивности фиолетовых, зелёных, красных лучей. Давление света на эту поверхность будет наибольшим для лучей ...

- 1) фиолетового цвета;
- 2) красного цвета;
- 3) зелёного цвета.

Задание 70. На чёрную пластинку падает поток света. Если число фотонов, падающих на единицу поверхности за одну секунду уменьшить в 2 раза, а чёрную пластинку заменить зеркальной, то световое давление ...

- 1) останется неизменным;
- 2) уменьшится в 4 раза;
- 3) увеличиться в 2 раза;
- 4) уменьшится в 2 раза.

Задание 71. Два источника излучают свет с длинами волн 375 нм и 750 нм. Отношение импульсов фотонов, излучаемых первым и вторым источником равно ....

- 1) 2;
- 2) 4;
- 3) 1/4;
- 4) 1/2.

Задание 72. Если увеличить в 2 раза объёмную плотность световой энергии, то давление света ....

- 1) увеличится в 2 раза;

- 2) останется неизменным;
- 3) увеличится в 4 раза;
- 4) увеличится в 16 раз.

Задание 73. Давление света зависит от такой физической величины как...

- 1) энергии фотона, падающего на поверхность;
- 2) показателя преломления вещества, на которое падает свет;
- 3) степени поляризованности света;
- 4) скорости света в среде.

Задание 74. Отношение импульсов двух фотонов  $P_1/P_2 = 2$ . Отношение длин соответствующих им электромагнитных волн  $\lambda_1/\lambda_2$  равно:

- 1) 0,5;
- 2) 0,25;
- 3) 2;
- 4) 4.

Задание 75. Отношение импульсов двух фотонов  $P_1/P_2 = 2$ . Отношение частот соответствующих им электромагнитных волн  $\nu_1/\nu_2$  равно:

- 1) 2;
- 2) 0,25;
- 3) 0,5;
- 4) 4.

Задание 76. Отношение импульсов двух фотонов  $P_1/P_2 = 2$ . Отношение периодов колебаний соответствующих им электромагнитных волн  $T_1/T_2$  равно:

- 1) 0,5;
- 2) 0,25;
- 3) 2;
- 4) 4.

Задание 77. Отношение импульсов двух фотонов  $P_1/P_2 = 2$ . Отношение их энергий  $\epsilon_1/\epsilon_2$  равно:

- 1) 2;
- 2) 0,25;
- 3) 0,5;
- 4) 4.

Задание 78. Для импульсов двух фотонов  $P_k$  и  $P_\phi$ , соответствующих волнам красной и фиолетовой областей видимой части спектра, справедливо соотношение:

- 1)  $P_k < P_\phi$ ;
- 2)  $P_k = P_\phi$ ;
- 3)  $P_k > P_\phi$ .

Задание 79. Летящий фотон имеет массу  $m$ . Его масса покоя  $m_0$  ...

- 1)  $m_0 = 0$ ;
- 2)  $m_0 = m$ ;
- 3)  $m_0 > m$ ;
- 4)  $0 < m_0 < m$ .

Задание 80. В пространстве летит фотон с импульсом  $P$ . В соответствующей ему электромагнитной волне расстояние между ближайшими точками, колебания в которых противofазны, составляет (где  $h$  – постоянная Планка) ....

- 1)  $\frac{h}{2P}$ ;
- 2)  $\frac{h}{P}$ ;
- 3)  $\frac{P}{2h}$ ;



$$4) \frac{P}{h}.$$

Задание 81. В пространстве летит фотон. В соответствующей ему электромагнитной волне расстояние между ближайшими точками, колебания в которых противофазны, равно  $L$ . Импульс фотона равен (где  $h$  – постоянная Планка,  $c$  – скорость света в вакууме) ....

$$1) \frac{h}{2L};$$

$$2) \frac{h}{L};$$

$$3) \frac{L}{h};$$

$$4) \frac{2L}{h}.$$

Задание 82. В пространстве летит фотон с импульсом  $P$ . В некоторой точке пространства фаза колебаний соответствующей ему электромагнитной волны меняется на  $\pi$  радиан за время (где  $h$  – постоянная Планка,  $c$  – скорость света)

$$1) \frac{h}{2cP};$$

$$2) \frac{h}{cP};$$

$$3) \frac{hc}{P};$$

$$4) \frac{2hc}{P}.$$

Задание 83. В пространстве летит фотон. В некоторой точке пространства фаза колебаний соответствующей ему электромагнитной волны меняется на  $\pi$

радиан за время  $t$ . Импульс фотона равен (где  $h$  – постоянная Планка,  $c$  – скорость света) ....

1)  $\frac{h}{2ct}$ ;

2)  $\frac{ct}{h}$ ;

3)  $\frac{2ct}{h}$ ;

4)  $\frac{2hc}{t}$ .

Задание 84. Если  $P$  – импульс фотонов, соответствующих когерентным волнам, то условие максимумов при интерференции имеет вид (где  $\Delta$  – разность хода,  $h$  – постоянная Планка) ....

1)  $\Delta = k \frac{h}{P}$ ;

2)  $\Delta = k \frac{P}{h}$ ;

3)  $\Delta = (2k + 1) \frac{h}{P}$ ;

4)  $\Delta = (2k + 1) \frac{P}{h}$ .

Задание 85. Если  $P$  – импульс фотонов, соответствующих когерентным волнам, то условие минимумов при интерференции имеет вид (где  $\Delta$  – разность хода,  $h$  – постоянная Планка) ...

1)  $\Delta = (2k + 1) \frac{h}{2P}$ ;

2)  $\Delta = (2k + 1) \frac{2P}{h}$ ;

$$3) \Delta = k \frac{h}{P};$$

$$4) \Delta = k \frac{P}{h}.$$

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.

1. Савельев, И. В. Курс физики т.3: учеб. Пособие / И. В. Савельев; СПб: Изд. «Лань», 2006. 320 с.
2. Ландсберг, Г. С. Оптика: учеб. Пособие для вузов / Г. С. Ландсберг; М.: Физматлит, 2006. 928 с.
3. Трофимова, Т. И. Курс физики: учеб. Пособие / Т. И. Трофимова; М.: Высш. шк., 2003. 542 с.: ил.
4. Детлаф, А. А. Курс физики: учеб. Пособие / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский; М.: Наука, 2001. 718 с.

*Учебное издание*

Составитель  
Костенков  
Сергей Николаевич

# ВОЛНОВАЯ И КВАНТОВАЯ ОПТИКА

СБОРНИК  
тестовых заданий по общей физике

*Авторская редакция*

Подписано в печать 28.01.2022. Формат 60x84/16.

Усл. печ. л. 3,5. Уч.-изд. л. 1,3.

Тираж 10 экз. Заказ № 151.

Типография  
Издательского центра «Удмуртский университет»  
426034, Ижевск, ул. Университетская, 1, корп. 2.  
Тел. 68-57-18