



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

И.Ю. Богачева
М.А. Лисовская
И.В. Рыскужина

ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия*

Издание 2-е

Магнитогорск
2019

УДК 535. 12(075)
ББК 22.343

Рецензенты:

Кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры физики, методов контроля и диагностики,
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет»

Ф.К. Шабиев

Кандидат педагогических наук, доцент кафедры прикладной
и теоретической физики, ФГБОУ ВО «Магнитогорский
государственный технический университет им. Г.И. Носова»

Н.А. Плугина

Богачева И.Ю.

Волновая оптика [Электронный ресурс] : учебное пособие / Ирина Юрьевна Богачева, Мария Александровна Лисовская, Ирина Владимировна Рыскужина ; ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». – Изд. 2-е, подгот. по печ. изд. 2018 г. – Электрон. текстовые дан. (1,41 Мб). – Магнитогорск : ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2019. – 1 электрон. опт. диск (CD-R). – Систем. требования : IBM PC, любой, более 1 GHz ; 512 Мб RAM ; 10 Мб HDD ; MS Windows XP и выше ; Adobe Reader 8.0 и выше ; CD/DVD-ROM дисковод ; мышь. – Загл. с титул. экрана.

Пособие составлено в соответствии с программой дисциплины «Физика» и отвечает требованиям ФГОС ВО. Содержит краткий теоретический материал по основным темам волновой оптики, примеры решения задач, тестовые задания и тестовые задачи.

Пособие предназначено для студентов всех форм обучения.

УДК 535. 12(075)
ББК 22.343

- © Богачева И.Ю., Лисовская М.А., Рыскужина И.В., 2018
- © ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», 2018

ВВЕДЕНИЕ

В разделе физики «Оптика» изучается природа света, закономерности его испускания, распространения и взаимодействия с веществом.

В данном учебном пособии рассматриваются оптические явления, в которых проявляется волновая природа света - интерференция, дифракция, поляризация и дисперсия света.

Пособие содержит теоретический материал, освещающий основные вопросы волновой оптики (интерференция, дифракция, дисперсия, поляризация света), примеры решения задач, сопровождаемые подробным решением, тестовые задания и задачи для самостоятельного решения.

Тестовые задания предлагаются студентам с целью лучшего усвоения теоретического материала лекционных занятий. Расчетные задачи систематизированы по темам курса и подобраны в соответствии с программой общего курса физики.

Рекомендуется для аудиторных занятий по физике, а так же для самостоятельной работы студентов при подготовке к практическим и лабораторным занятиям, к коллоквиумам и экзаменам.

1. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

Оптика – раздел физики, занимающийся изучением природы света, законов его распространения и взаимодействия с веществом.

В волновой оптике рассматриваются оптические явления, в которых проявляется волновая природа света:

1. Интерференция.
2. Дифракция.
3. Поляризация.
4. Дисперсия.

Свет представляет собой электромагнитные поперечные волны.

К видимой области света относится излучение в диапазоне длин волн 400 – 780 нм.

Интерференция света – сложение в пространстве двух или нескольких когерентных световых волн, при котором в разных его точках получается устойчивое во времени усиление или ослабление амплитуды результирующей волны.

Когерентностью называется согласованное протекание во времени и пространстве нескольких колебательных или волновых процессов.

Когерентными называются волны одного направления, с одинаковыми плоскостями колебаний светового вектора, с одинаковой частотой и с постоянной во времени разностью фаз.

Монохроматические волны – неограниченные в пространстве волны одной определенной и постоянной частоты – являются когерентными.

Условия максимума и минимума при интерференции света

Пусть в данной точке M две монохроматические волны с циклической частотой ω возбуждают два колебания, причем до точки наблюдения M одна волна проходит в среде с показателем преломления n_1 путь x_1 , а вторая – в среде n_2 путь x_2 :

$$\left. \begin{aligned} \xi_1(x, t) &= A_1 \cos(\omega t - kx) \\ \xi_2(x, t) &= A_2 \cos(\omega t - kx) \end{aligned} \right\}$$

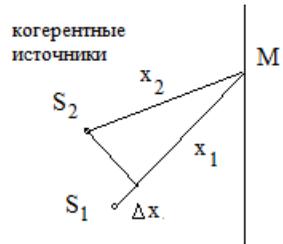
Амплитуда результирующего колебания:

$$A_{рез}^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \Delta\varphi$$

Интенсивность результирующего колебания ($I \sim A_{рез}^2$):

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2} \cos \Delta\varphi$$

Разность фаз $\Delta\varphi$ колебаний, возбуждаемых в точке M , равна $\Delta\varphi = (\omega t - kx_1) - (\omega t - kx_2)$, k -волновое число.



Связь между разностью хода и разностью фаз:

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

Условие наблюдения максимумов и минимумов интерференции света определяется разностью фаз складываемых колебаний:

$$\begin{cases} \Delta\varphi^{\max} = 2k\pi; \\ \Delta\varphi^{\min} = (2k+1)\pi \end{cases}$$

где $k = 0, 1, 2, \dots$ - порядок интерференции.

Оптической длиной пути называют произведение геометрической длины пути на коэффициент преломления среды, в которой распространяется волна:

$$L^{opt} = l \cdot n ,$$

где l – геометрическая длина пути световой волны в однородной среде с показателем преломления n .

При нахождении оптической длины пути L необходимо учитывать, что *при отражении света от оптически более плотной среды фаза волны изменяется на противоположную*, т.е. на π рад, что соответствует *потере полуволны* $\frac{\lambda}{2}$.

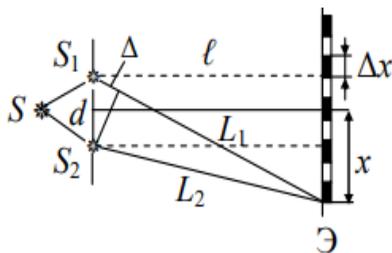
Оптической разностью хода называют разность оптических путей длин волн: $\Delta = L_1^{opt} - L_2^{opt}$.

Связь разности фаз с оптической разностью хода дает **общие условия наблюдения интерференционных максимумов и минимумов**:

$$\begin{cases} \Delta = \pm 2k \frac{\lambda}{2}; \\ \Delta = \pm (2k+1) \frac{\lambda}{2}, \end{cases}$$

где $k = 0, 1, 2, \dots$

Опыт Юнга (интерференция от двух щелей): интерференционная картина на экране представляет собой чередование светлых (или цветных) и тёмных полос равной ширины.



Оптическая разность хода: $\Delta = \frac{x \cdot d}{l}$

где x – расстояние от центра экрана до рассматриваемой точки;
 d – расстояние между щелями;
 l – расстояние от источников до экрана.

Положения (координаты) максимумов и минимумов:

$$x_{\max} = k \frac{l \cdot \lambda}{d};$$

$$x_{\min} = \left(k + \frac{1}{2}\right) \frac{l \cdot \lambda}{d},$$

где k – номер интерференционного максимума (или минимума);
 λ – длина волны падающего света.

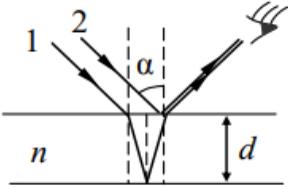
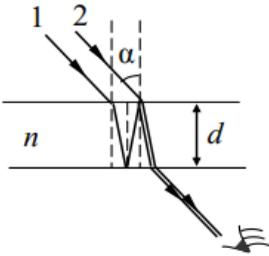
Ширина интерференционной полосы (расстояние между соседними максимумами или минимумами):

$$\Delta x = \frac{l}{d} \cdot \lambda.$$

Интерференция света в тонких пленках

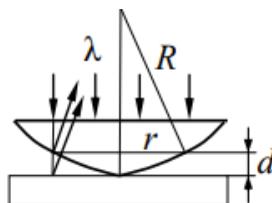
Полосы равного наклона наблюдаются в тех случаях, когда на пленку падает под различными углами расходящийся или сходящийся пучок света (солнечный свет). При этом показатель преломления пластины n и толщина пленки d всюду одинаковы, поэтому разность хода зависит от угла падения. Интерференционная картина наблюдается на экране, установленном фокальной плоскости собирающей линзы, так как, линза не создает дополнительной разности фаз между лучами, собираемыми

линзой в одной и той же точке изображения. Интерференционная картина имеет вид чередующихся криволинейных темных и светлых полос, каждой из полос соответствует определенное значение α .

Условия наблюдения	Оптическая разность хода при интерференции в тонких пленках
<p>В отраженном свете:</p> 	$\Delta = 2 \cdot d \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} \pm \frac{\lambda}{2},$ <p>где d - толщина пленки; n - показатель преломления пленки;</p> <p>α- угол падения;</p> <p>$\frac{\lambda}{2}$ - половина длины волны, которая учитывается при отражении от оптически более плотной среды.</p>
<p>В проходящем свете:</p> 	$\Delta = 2 \cdot d \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha},$ <p>где d - толщина пленки; n - показатель преломления пленки;</p> <p>α- угол падения.</p>

Полосы равной толщины наблюдаются в том случае, если свет падает на пластинку (клин), где толщина пластинки неодинакова в разных точках. Полосы равной толщины наблюдаются при отражении параллельного пучка лучей от тонкой прозрачной пленки, толщина которой не одинакова в разных местах. Частный случай полос равной толщины являются кольца Ньютона.

Кольца Ньютона – концентрические окружности, которые образуются при отражении света от двух поверхностей воздушного зазора, образованного между плоскопараллельной пластинкой и соприкасающейся с ней плоско-выпуклой линзой с большим радиусом кривизны R .



Радиус светлого кольца Ньютона в отраженном свете (или темного кольца в проходящем свете):

$$r_k = \sqrt{(2k+1) \frac{R\lambda}{2}} = \sqrt{2Rd} = \sqrt{(2k-1)R \frac{\lambda}{2n}},$$

где R - радиус кривизны линзы;
 d - толщина воздушного зазора в месте k -го кольца;
 λ - длина волны падающего света;
 n - показатель преломления среды между линзой и пластинкой (для воздуха $n=1$);
 k - номер кольца.

Радиус темного кольца Ньютона в отраженном свете (или светлого кольца в проходящем свете):

$$r_k = \sqrt{kR\lambda} = \sqrt{2Rd} = \sqrt{\frac{kR\lambda}{n}}.$$

Примеры решения задач по интерференции света

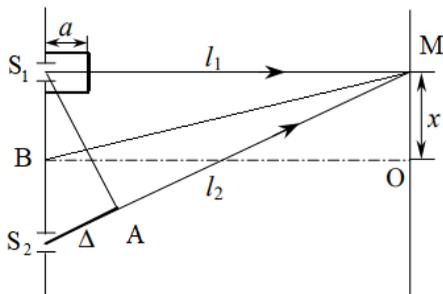
Задача 1. В схеме Юнга щели S_1 и S_2 освещались монохроматическим светом с длиной волны 632,8 нм. На пути одного из интерферирующих лучей поставили тонкую пластинку с показателем преломления 1,63, вследствие чего картина на экране сместилась на 10 полос. Чему равна толщина пластинки?

Дано: $\lambda = 632,8$ нм, $n = 1,63$, $\Delta k = 10$.

Найти: a .

Решение:

Пусть x – координата k -ой полосы на экране.



Результат интерференции в точке M экрана определяется оптической разностью хода лучей S_1M и S_2M :

$$\Delta_1 = l_2 - l_1.$$

Если на пути первого луча поставить пластинку с показателем преломления n и толщиной a , то его оптический путь станет равным:

$$l_1' = l_1 - a + na,$$

а оптическая разность хода изменится и станет равной

$$\Delta_2 = l_2 - l_1' = l_2 - l_1 + a - na.$$

Между лучами возникает дополнительная оптическая разность хода

$$\Delta_1 - \Delta_2 = a \cdot (n - 1).$$

Если произошло смещение на $\Delta k = 10$, то дополнительная оптическая разность хода:

$$a \cdot (n - 1) = \Delta \cdot k \lambda.$$

Отсюда толщина пластинки равна: $a = \frac{\Delta \cdot k \lambda}{n - 1}$

Произведем расчеты: $a = \frac{10 \cdot 632,8 \cdot 10^{-9}}{1,63 - 1} \text{ м} = 10 \text{ мкм}.$

Ответ: $a = 10 \text{ мкм}.$

Задача 2. На тонкую пластинку с показателем преломления 1,33 падает параллельный пучок белого света под углом 30° . Определить минимальную толщину пластинки, для которой она будет окрашена в желтый свет ($\lambda = 0,6 \text{ мкм}$), в отраженном свете.

Дано: $\lambda = 0,6 \text{ мкм}$, $i = 30^\circ$, $n = 1,33$.

Найти: $d_{\min}.$

Решение:

Пусть на пластинку падает параллельный пучок света. Лучи 1 и 2, образовавшиеся из луча I, при отражении света от верхней и нижней поверхностей пластинки, являются когерентными.

Проведем фронт волны СД и определим оптическую разность хода между лучами 1 и 2:

$$\Delta = (AB + BC) \cdot n - (AD \cdot 1 + \frac{\lambda}{2}) = 2AB \cdot n - AD - \frac{\lambda}{2}.$$

Или

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} - \frac{\lambda}{2},$$

где величина $\frac{\lambda}{2}$ обусловлена потерей полуволны в точке А при отражении луча 1 от оптически более плотной среды.

Интерференционный максимум наблюдается если в оптической разности хода лучей 1 и 2 укладывается четное число полуволн:

$$\Delta = 2k \frac{\lambda}{2},$$

где k - порядок максимума ($k = 1, 2, 3 \dots$).

Следовательно,

$$2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} - \frac{\lambda}{2} = 2k \frac{\lambda}{2}.$$

Из данной формулы следует, что толщина пластинки равна:

$$d = \frac{\frac{\lambda}{2}(2k+1)}{2\sqrt{n^2 - \sin^2 i}}.$$

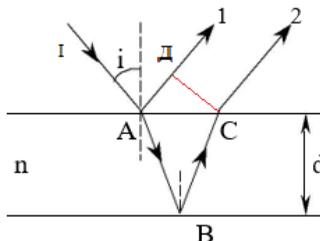
Наименьшая толщина пленки соответствует значению $k=0$ и равна

$$d_{\min} = \frac{\lambda}{4\sqrt{n^2 - \sin^2 i}}.$$

Произведем расчеты:

$$d_{\min} = \frac{0,6 \cdot 10^{-6}}{4\sqrt{1,77 - 0,25}} = 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

Ответ: $d_{\min} = 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$



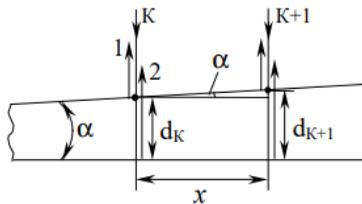
Дано: $\lambda = 0,6$ мкм, $x = 8,1$ мм, $n = 1,54$.

Найти: α .

Решение:

Параллельный пучок света, падающий нормально на клин, отражается от его верхней и нижней поверхностей.

Отраженные лучи 1 и 2 когерентны, и на поверхности клина будут наблюдаться интерференционные полосы параллельные ребру клина.



Так как преломляющий угол

клина α очень мал, то можно считать, что лучи 1 и 2 параллельные.

Оптическая разность хода лучей 1 и 2 равна:

$$\Delta_1 = 2d_k n + \frac{\lambda}{2},$$

где d_k - толщина клина в том месте, где образуется k -ая полоса;

$\frac{\lambda}{2}$ - добавочная разность хода, возникающая при отражении луча 1 от

оптически более плотной среды, то есть от верхней грани клина.

Оптическая разность хода Δ_1 соответствует максимуму, если

$$\Delta_1 = 2k \frac{\lambda}{2}.$$

Значит, $2d_k n + \frac{\lambda}{2} = 2k \frac{\lambda}{2}$. Отсюда, толщина клина в том месте, где образуется k -ая светлая полоса:

$$d_k = \frac{\frac{\lambda}{2}(2k-1)}{2n}$$

Толщина клина d_{k+1} в том месте, где образуется следующая $(k+1)$ светлая полоса равна:

$$d_{k+1} = \frac{\frac{\lambda}{2}(2(k+1)-1)}{2n} = \frac{\frac{\lambda}{2}(2k+1)}{2n}.$$

Вычитая из последнего уравнения предыдущее, получим, что

$$d_{k+1} - d_k = \frac{\lambda}{2n}.$$

Из рисунка следует, что

$$\operatorname{tga} = \frac{d_{k+1} - d_k}{x} = \frac{\lambda}{2nx}$$

Вследствие малости угла $\operatorname{tga} \approx \sin a \approx a = \frac{\lambda}{2nx}$.

Подставив данные, получим: $a = \frac{0,6 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 1,54 \cdot 8,1 \cdot 10^{-3}} = 2,4 \cdot 10^{-5} \text{ рад}$.

Ответ: $a = 2,4 \cdot 10^{-5} \text{ рад}$.

Задача 4. Плоско-выпуклая линза ($n = 1,6$) выпуклой стороной прижата к стеклянной пластинке. Расстояние между первыми двумя темными кольцами Ньютона, наблюдаемыми в отраженном свете, равно 0,5 мм. Определить оптическую силу линзы, если освещение производится монохроматическим светом с длиной волны 550 нм, падающим нормально.

Дано: $\lambda = 550 \text{ нм}$, $r_2 - r_1 = 0,5 \text{ мм}$, $n = 1,6$.

Найти: D .

Решение:

Оптическая сила линзы в общем случае равна:

$$D = (n-1) \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

где n - показатель преломления линзы; R_1 и R_2 - радиусы кривизны поверхностей линзы.

Оптическая сила плосковыпуклой линзы:

$$D = \frac{n-1}{R}.$$

Для определения радиуса кривизны линзы воспользуемся выражением для радиуса темного кольца Ньютона в отраженном свете:

$$r_k = \sqrt{k\lambda R} \quad (k = 1, 2, \dots).$$

Разность радиусов первых двух темных колец

$$r_2 - r_1 = \sqrt{R\lambda} \cdot (\sqrt{2} - 1).$$

Откуда радиус кривизны линзы равен:

$$R = \frac{(r_2 - r_1)^2}{(\sqrt{2} - 1)^2 \lambda}.$$

Тогда искомая оптическая сила линзы:

$$D = (n-1) \frac{\lambda \cdot (\sqrt{2} - 1)^2}{(r_2 - r_1)^2}$$

Подставив численные данные, получим

$$D = (1,6 - 1) \frac{550 \cdot 10^{-9} \cdot (1,4 - 1)^2}{(0,5 \cdot 10^{-3})^2} = 0,21 \text{ дптр.}$$

Ответ: 0,21 дптр.

Тестовые задания по интерференции света

1. Оптический путь. Оптическая разность хода лучей при интерференции

1.1. Вставьте вместо точек пропущенный фрагмент. Интерференцией света называется явление пространственного перераспределения энергии светового излучения, приводящее к возникновению максимумов и минимумов интенсивности.

- 1) при наложении двух произвольных сферических световых волн;
- 2) при наложении двух и более световых волн с непрерывно меняющейся разностью фаз;
- 3) при наложении двух или более когерентных световых волн;
- 4) при наложении когерентных световых волн от непрерывного количества источников.

1.2. Какие световые волны называются когерентными?

- 1) если совпадают амплитуды;
- 2) если совпадают частоты;
- 3) если постоянен сдвиг фаз;
- 4) если совпадают частоты и постоянен сдвиг фаз.

1.3. Что будет наблюдаться в данной точке пространства, если оптическая разность хода интерферирующих в этой точке лучей равна $5\lambda/2$?

- 1) минимум интенсивности света;
- 2) максимум интенсивности света;
- 3) интенсивности лучей складываются;
- 4) интенсивности лучей вычитаются.

1.4. В каком случае оптическая длина пути луча при отражении изменится на $\lambda/2$?

- 1) от более плотной среды;
- 2) жидкой среды;
- 3) от менее плотной среды;

4) металлической среды.

1.5. Если разность фаз колебаний в точке 5π , то в данной точке наблюдается?

- 1) светлая точка;
- 2) максимум интенсивности света;
- 3) минимум интенсивности света;
- 4) темная точка.

1.6. Какое значение может принимать показатель преломления обычных сред?

- 1) $n=1$; 2) $n=2$; 3) $n=0$; 4) $n=4$.

1.7. При каком условии когерентные волны с начальными фазами φ_1 и φ_2 и разностью хода Δ при наложении максимально ослабляются? ($k = 0, 1, 2, \dots$)

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

1.8. Разность хода двух интерферирующих лучей монохроматического света равна $\lambda/4$. Чему при этом равна разность фаз?

- 1) $\pi/2$; 2) 2π ; 3) $\pi/4$; 4) π .

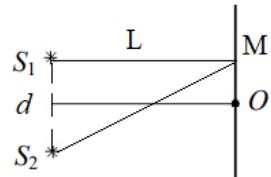
1.9. S_1 и S_2 – источники когерентных волн. Чему равна разность фаз колебаний, возбуждаемых этими волнами в точке O (центральный максимум)?

- 1) $\pi/2$; 2) 2π ; 3) 0; 4) π .



1.10. Чему равна геометрическая разность хода лучей в точке M?

- 1) $\Delta = S_2M - S_1M$; 2) $\Delta = S_2M + S_1M$;
3) $\Delta = S_2M - L$; 4) $\Delta = L - d$.



2. Интерференция света от точечных источников

2.1 Для интерференционной картины от двух когерентных световых волн установите соответствие между определением и его математическим выражением.

Определение	Математическое выражение
1) ширина полосы	а) $n \frac{xd}{l}$
2) оптическая разность хода	б) $m \frac{l}{d} \lambda$
3) координаты минимумов	в) $(m+1) \frac{l}{d} \lambda$
4) координаты максимумов	г) $\frac{l}{d} \lambda$

2.2. При интерференции двух когерентных волн с длиной волны 2 мкм наблюдается интерференционный минимум. Чему равна разность хода этих лучей?

- 1) 0 мкм; 2) 1 мкм; 3) 4 мкм; 4) 2 мкм.

2.3. Ширина интерференционной полосы какого цвета будет наименьшей?

- 1) фиолетового; 2) синего; 3) зеленого; 4) красного.

2.4. Чему равна разность хода оптических путей для максимума первого порядка при интерференции когерентных лучей с длиной волны $\lambda = 500$ нм?

- 1) 1000 нм; 2) 500 нм; 3) 250 нм; 4) 1200 нм.

2.5. Какое соотношение должно быть между расстоянием до экрана от источников когерентных волн L и расстоянием между источниками d , чтобы наблюдать визуально интерференционную картину?

- 1) $L = d$; 2) $L \gg d$; 3) $L \ll d$; 4) $d = 10 L$.

2.6 Ширина интерференционной полосы какого цвета будет наибольшей?

- 1) фиолетового; 2) синего; 3) зеленого; 4) красного.

2.7. Расстояние от источников до экрана уменьшили в 2 раза. Как при этом изменится ширина интерференционной полосы?

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

2.8. Расстояние от источников до экрана увеличили в 4 раза. Как при этом изменится ширина интерференционной полосы?

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

2.9. При наблюдении интерференции фиолетового света в опыте Юнга расстояние между соседними темными полосами на экране равно 2 мм. Если источник фиолетового света заменить источником красного света, длина волны которого в 1,5 раза больше, то это расстояние станет равным?

- 1) 3 мм; 2) 2 мм; 3) 1 мм; 4) 4 мм.

2.10. Длину волны падающего света уменьшили в 2 раза. Как изменится ширина интерференционной полосы?

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

3. Интерференция в тонких пленках

3.1. Пучок белого света падает нормально на пластинку, толщина которой $h=1$ мкм. Показатель преломления стекла $n = 1,5$. Какая область видимого спектра будет усиливаться в отраженном пучке?

- 1) красная; 2) желтая; 3) зеленая; 4) фиолетовая.

3.2. Чему равна оптическая разность хода лучей, отраженных от грани плоскопараллельной пластинки толщины h при нормальном падении монохроматического света?

- 1) hn ; 2) $2hn$; 3) $2hn + \lambda/2$; 4) $2hn + \lambda$.

3.3. Свет с длиной волны 600 нм падает нормально на пластинку ($n_1=1,5$), на которую нанесен слой жидкости ($n_2 = 1,6$) толщиной 1 мкм. Чему равна разность хода отраженных интерферирующих лучей?

- 1) 1,6 мкм; 2) 2,9 мкм; 3) 3,5 мкм; 4) 5,2 мкм.

3.4. На объектив ($n_1 = 1,5$) нанесена тонкая пленка ($n_2 = 1,2$) толщиной d (просветляющая пленка). Чему равна разность хода интерферирующих волн в отражённом свете?

- 1) $2dn_1 + \lambda/2$; 2) $2dn_2 + \lambda/2$; 3) $2dn_1$; 4) $2dn_2$.

3.5. Мыльный пузырь имеет зеленую окраску (540 нм) в области точки, ближайшей к наблюдателю. Если показатель преломления мыльной воды 1,35. Чему равна минимальная толщина пузыря в указанной области?

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

3.6. На пути плоской световой волны, распространяющейся в воздухе, поместили стеклянную пластинку толщиной 1 см. Показатель преломления стекла 1,5. На сколько изменится оптическая длина пути?

- 1) 10 мм; 2) 1 мм; 3) 5 мм; 4) 0,5 мм.

3.7. Тонкая пленка, освещенная белым светом, вследствие явления интерференции в отраженном свете имеет зеленый цвет. Как изменится цвет пленки при уменьшении ее толщины?

- 1) станет красным; 3) станет синим;
2) не изменится; 4) станет черным.

4.3. Плосковыпуклая линза выпуклой стороной лежит на стеклянной пластинке. Если на плоскую поверхность линзы падает нормально свет с длиной волны $\lambda = 0,6$ мкм. Чему равна толщина воздушного зазора в том месте, где в отраженном свете видно первое темное кольцо?

- 1) 200 нм; 2) 300 нм; 3) 600 нм; 4) 900 нм.

4.4. Установка для наблюдения колец Ньютона освещается монохроматическим светом. Выберите верные утверждения.

- 1) в отраженном свете будут наблюдаться чередующие темные и светлые кольца, в центре темное пятно;
2) в проходящем свете будут наблюдаться чередующие темные и светлые кольца, в центре темное пятно;
3) при увеличении радиуса кривизны линзы радиус колец Ньютона увеличивается прямо пропорционально радиусу линзы;
4) при замене красного цвета на фиолетовый радиус колец Ньютона уменьшается.

4.5. Как изменяются диаметры колец Ньютона, если источник монохроматического света с длиной волны 650 нм заменить источником монохроматического света с длиной волны 450 нм?

- 1) диаметры колец Ньютона не изменяются;
2) диаметры колец Ньютона увеличиваются в 1,4 раза;
3) диаметры колец Ньютона уменьшаются в 1,4 раза;
4) диаметры колец Ньютона уменьшаются в 1,15 раза.

4.6. В установке для наблюдения колец Ньютона заменили линзу, радиус кривизны которой будет в 4 раза меньше. Как при этом изменится радиус r темного k -го кольца в отраженном свете?

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

4.7. Плоско-выпуклая линза выпуклой стороной лежит на стеклянной пластинке (установка для наблюдения колец Ньютона). На плоскую поверхность линзы падает нормально свет с длиной волны $\lambda = 0,6$ мкм. Чему равна толщина воздушного зазора в том месте, где в отраженном свете видно первое темное кольцо?

- 1) 200 нм; 2) 300 нм; 3) 600 нм; 4) 900 нм.

4.8. Как изменяется расстояние между кольцами Ньютона с увеличением показателя преломления вещества n в зазоре между линзой и пластинкой?

- 1) не изменяется;
- 2) увеличивается прямо пропорционально n ;
- 3) уменьшается обратно пропорционально n ;
- 4) уменьшается обратно пропорционально \sqrt{n} .

4.9. Как изменится радиус наблюдаемых светлых колец Ньютона в отраженном свете, если радиус кривизны линзы увеличить в 2 раза, ширину зазора между линзой и пластиной уменьшить в 2 раза?

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

4.10. Длину волны падающего на линзу света увеличили в 2 раза. Как при этом изменится радиус светлого кольца в проходящем свете?

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

Расчетные задания по интерференции света

5.1. Свет от проекционного фонаря, пройдя через синее стекло, падал на картон с двумя маленькими отверстиями и далее направлялся на экран. Расстояние между интерференционными полосами на экране 0,8 мм; расстояние между отверстиями 1 мм; расстояние от отверстий до экрана 1,7 м. Найти длину световой волны. Ответ: $\lambda = 470$ нм.

5.2. В установке Юнга расстояние между щелями 1,5 мм, а экран расположен на расстоянии 2 м от щелей. Определить расстояние между интерференционными полосами на экране, если длина волны монохроматического света 670 нм. Ответ: $\ell = 0,9$ мм.

5.3. Два когерентных источника испускают монохроматический свет с длиной волны 0,6 мкм. Определить, на каком расстоянии от точки, расположенной на экране на равном расстоянии от источников, будет первый максимум освещенности. Экран удален от источников на 3 м, расстояние между источниками 0,5 мм. Ответ: $\ell = 3,6$ мм.

5.4. Расстояние d между щелями в опыте Юнга равно 1 мм. Экран располагается на расстоянии $R = 4$ м от щелей. Найдите длину волны

электромагнитного излучения, если первый максимум располагается на расстоянии $y_1 = 2,4$ мм от центра интерференционной картины. Ответ: $\lambda = 600$ нм.

5.5. Мыльный пузырь имеет зеленую окраску ($\lambda = 540$ нм) в области точки, ближайшей к наблюдателю. Если показатель преломления мыльной воды 1,35, то какова минимальная толщина пузыря в указанной области? Ответ: $\lambda = 100$ нм.

5.6. Зимой на стеклах трамваев и автобусов образуются пленки наледи, окрашивающие все видимое сквозь них в зеленоватый цвет. Оценить, какова наименьшая толщина этих пленок (показатель преломления наледи принять равным 1,33). Ответ: $d = 0,2$ мкм, принять $\lambda = 550$ нм.

5.7. На стеклянный клин нормально к его грани падает монохроматический свет с длиной волны 600 нм. Число интерференционных полос, приходящихся на 1 см, равно 10. Показатель преломления стекла 1,5. Найти преломляющий угол клина. Ответ: 41°

5.8. Интерференционные полосы равной толщины наблюдаются на воздушном клине между двумя стеклянными пластинками с углом при вершине $2'$. Полосы получаются в свете зеленой линии ртути с длиной волны $\lambda = 5461 \text{ \AA}$ и шириной $0,1 \text{ \AA}$. Определить: 1) расстояние Δx между двумя соседними полосами; 2) максимальное количество полос N , которые можно было бы видеть на клине, если бы его размеры не были ограничены; 3) расстояние x последней наблюдаемой полосы от вершины клина и толщину последнего h в этом месте. Ответ: $\Delta x = 0,47$ мм; $N = 2127$; $x = 0,58$ мм.

5.9. Свет с длиной волны $\lambda = 6000 \text{ \AA}$ падает на тонкую мыльную пленку под углом 30° . В отраженном свете на пленке наблюдаются интерференционные полосы. Расстояние между соседними полосами равно $\Delta x = 4$ мм. Показатель преломления мыльной пленки $n = 1,33$. Вычислить угол α между поверхностями пленки. Ответ: $\alpha = 21,6''$.

5.10. В очень тонкой клиновидной пластинке в отраженном свете при нормальном падении наблюдаются интерференционные полосы. Расстояние между соседними темными полосами $\Delta x = 5$ мм. Зная, что длина световой волны равна $\lambda = 5800 \text{ \AA}$, а показатель преломления пластинки $n = 1,5$, найти угол α между гранями пластинки. Ответ: $\alpha = 1,25'$.

5.11. Пучок параллельных лучей длиной волны $\lambda = 0,66$ мкм падает в воздухе под углом $\alpha = 60^\circ$ на тонкую пленку, находящуюся на материале, показатель преломления которого $n_2 = 1,10$. Наименьшая толщина пленки, при которой отраженные лучи будут максимально усилены интерференцией, $d_2 = 0,1347$ мкм. Найти показатель преломления пленки n_1 и наименьшую толщину пленки d_1 , при которой отраженные лучи будут максимально ослаблены интерференцией. Ответ: $n_1 = 2$, $d_1 = 0,09 \cdot 10^{-6}$ м.

5.12. В установке для получения колец Ньютона пространство между линзой и стеклянной пластинкой заполнено водой с показателем преломления $n=1,33$. Монохроматический свет с длиной волны $\lambda = 500$ нм распространяется по нормали к поверхности пластинки. Найдите толщину слоя воды в тех точках, где наблюдается третье светлое кольцо в отраженном свете. Ответ: $\alpha = 470$ нм.

5.13. Плосковыпуклая линза ($n = 1,5$) с оптической силой $0,5$ диоптрий выпуклой стороной лежит на стеклянной пластинке. Найдите радиус пятого темного кольца Ньютона в проходящем свете ($\lambda = 600$ нм). Ответ: $1,64$ мм.

5.14. Для наблюдения колец Ньютона взята плосковыпуклая линза с главным фокусным расстоянием 25 см и показателем преломления $1,5$. Освещение производится монохроматическим светом с длиной волны 589 нм. Найдите радиус третьего светлого кольца в отраженном свете. Ответ: $0,043$ см.

5.15. Определить радиус 4-го светлого кольца Ньютона в проходящем свете, если между линзой с радиусом кривизны 5 м и плоской поверхностью, к которой она прижата, находится вода. Длина волны света 589 нм, показатель преломления воды $1,33$. Ответ: $2,98$ мм.

5.16. Определить радиус кривизны плосковыпуклой линзы, которая вместе с пластинкой позволяет наблюдать кольца Ньютона при освещении монохроматическим источником света с длиной волны 589 нм, причем в отраженном свете расстояние между первым и вторым светлыми кольцами будет равно $0,5$ мм. Ответ: $1,6$ м.

5.17. Найдите радиус r центрального темного пятна колец Ньютона, если между линзой и пластинкой налит бензол ($n=1,5$). Радиус кривизны линзы $R= 1$ м. Показатели преломления линзы и пластинки одинаковы. Наблюдение ведется в отраженном натриевом свете ($\lambda=5890$ Å). Ответ: $r= 0,44$ мм.

5.18. Определить толщину воздушной прослойки между линзой и стеклянной пластинкой там, где в отраженном свете ($\lambda = 600$ нм) видно третье темное кольцо Ньютона. Ответ: $0,9$ мкм.

5.19. Найдите фокусное расстояние плосковыпуклой линзы, примененной для получения колец Ньютона, если радиус третьего светлого кольца равен $1,1$ мм, $n=1,6$, $\lambda=5890$ Å. Кольца наблюдаются в отраженном свете. Ответ: $R= 1,6$ м; принять $f=2R$.

5.20. При наблюдении колец Ньютона в отраженном синем свете ($\lambda=4500$ Å) с помощью плосковыпуклой линзы, положенной на плоскую пластинку, радиус третьего светлого кольца оказался равным $1,06$ мм. После замены синего светофильтра на красный был измерен радиус пятого светлого кольца, оказавшийся равным $1,77$ мм. Найдите радиус кривизны линзы R и длину волны $\lambda_{кр}$ красного света. Ответ: $R= 1$ м; $\lambda=697$ нм.

5.21. Найти фокусное расстояние плосковыпуклой линзы, примененной для получения колец Ньютона, если радиус 3-го темного кольца в отраженном свете ($\lambda = 590$ нм) равен 1,1 мм. Показатель преломления линзы 1,6. Ответ: 1,14 м.

5.22. Плосковыпуклая линза с оптической силой две диоптрии выпуклой стороной лежит на стеклянной пластинке. Радиус 4-го темного кольца Ньютона в отраженном свете равен 0,7 мм. Показатель преломления стекла 1,5. Найти длину световой волны. Ответ: 490 нм.

5.23. Для опыта с кольцами Ньютона применена плосковыпуклая линза с показателем преломления 1,5. Радиус 2-го темного кольца Ньютона в проходящем свете 0,33 мм. Наблюдение ведется при освещении линзы светом с длиной волны 589 нм. Найти главное фокусное расстояние линзы. Ответ: 25 см.

2. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Дифракция света – совокупность явлений, наблюдаемых при распространении света в среде с резкими неоднородностями (края экранов, малые отверстия), и связанных с отклонениями от законов геометрической оптики.

Принцип Гюйгенса – Френеля: Каждый элемент волнового фронта Φ является центром (источником) вторичного возмущения, порождающего вторичные сферические волны, а результирующее световое поле в каждой точке пространства будет определяться интерференцией этих волн.

Волновой поверхностью называется геометрическое место точек, колеблющихся в одинаковой фазе.

Волновой фронт – геометрическое место точек, до которых доходят колебания к моменту времени t .

Зоны Френеля – это кольцевые зоны одинаковой площади, на которые разбит фронт волны Φ , такого размера, чтобы расстояния от краёв зоны до точки наблюдения M отличались на $\lambda/2$ (в точку M колебания от соседних зон приходят в противоположной фазе и при наложении эти колебания будут взаимно ослаблять друг друга).

Амплитуда результирующего колебания светового вектора в точке M , с учетом противофазы, описывается знакопеременным рядом:

$$A_M = A_1 - A_2 + A_3 - \dots$$

Интенсивность света в точке пропорциональна квадрату этой амплитуды: $I \sim A^2$.

Площади зоны Френеля:

$$S = \frac{\pi a b}{a+b} \lambda,$$

где a - расстояние от источника S до фронта волны,

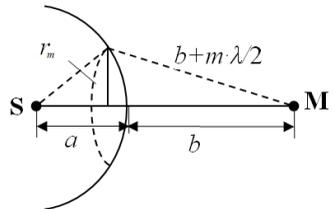
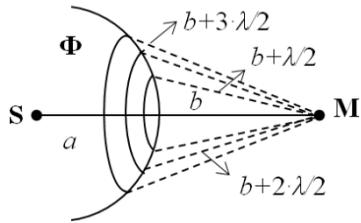
b - расстояние от фронта волны до точки наблюдения M .

Радиус внешней границы m -й зоны Френеля для сферической волны:

$$r_m = \sqrt{\frac{ab}{a+b} m \lambda},$$

a - расстояние от источника S до преграды,

b - расстояние от преграды до точки M .



Для плоской волны радиус m -ой зоны Френеля:

$$a \rightarrow \infty, r_m = \sqrt{\frac{b}{1 + \frac{b}{a}}} m \lambda = \sqrt{b m \lambda}$$

Два вида дифракции света:

- дифракцию в сходящихся лучах или дифракцию Френеля;
- дифракцию в параллельных лучах или дифракцию Фраунгофера.

Характер дифракции зависит от значения **параметра дифракции**:

$$\frac{b^2}{L\lambda} \begin{cases} \ll 1 & \text{– дифракция Фраунгофера,} \\ \approx 1 & \text{– дифракция Френеля,} \\ \gg 1 & \text{– свет распространяется по законам геометрической оптики,} \end{cases}$$

где b – размер препятствия, λ – длина световой волны, L – расстояние от препятствия до экрана наблюдения.

При **дифракции Френеля на круглом отверстии** дифракционная картина имеет вид чередующихся темных и светлых колец с темным центром в точке М, если отверстие открывает четное число зон Френеля, и светлым, если – нечетное число зон Френеля. Интенсивность в максимумах убывает с расстоянием от центра картины.

При **дифракции Френеля на непрозрачном диске** в точке М всегда наблюдается интерференционный максимум (светлое пятно Пуассона). Центральный максимум окружен концентрическими темными и светлыми кольцами, а интенсивность в максимумах убывает с расстоянием от центра картины.

Дифракция Фраунгофера на одной щели:

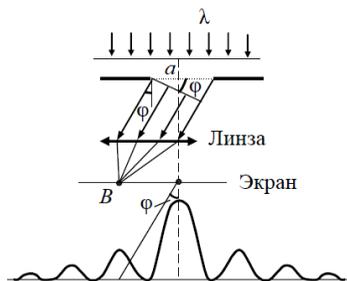
а) Условие дифракционного максимума:

$$a \cdot \sin \varphi = \pm (2k + 1) \frac{\lambda}{2},$$

где a – ширина щели, φ – угол дифракции, k – порядок максимума ($k = 0, 1, 2, 3, \dots$).

б) Условие дифракционного минимума:

$$a \cdot \sin \varphi = \pm 2k \frac{\lambda}{2}.$$



Дифракционная решётка – система параллельных щелей равной ширины, лежащих в одной плоскости и разделённых одинаковыми непрозрачными промежутками.

Период (постоянная) решётки d – сумма ширины прозрачной щели a и ширины непрозрачного промежутка b :

$$d = \frac{l}{N} = \frac{1}{n}$$

где l – ширина решетки; N – число щелей; n – число щелей, приходящихся на единицу длины.

Условие главных дифракционных максимумов при дифракции на решетке:

$$d \cdot \sin \varphi = \pm k \lambda \quad (k = 0, 1, 2, \dots).$$

Условие главного дифракционного минимума при дифракции на решетки:

$$a \cdot \sin \varphi = \pm m \lambda \quad (m = 1, 2, \dots)$$

Условие дополнительных минимумов при дифракции на решетки:

$$d \cdot \sin \varphi = \pm \frac{n}{N} \lambda \quad (n = 1, 2, \dots, N-1, N+1, \dots)$$

Между двумя главными максимумами располагаются $(N-1)$ дополнительных минимумов. Между дополнительными минимумами располагаются слабые дополнительные максимумы.

Наибольший порядок спектра дифракционной решетки: $k \leq \frac{d}{\lambda}$.

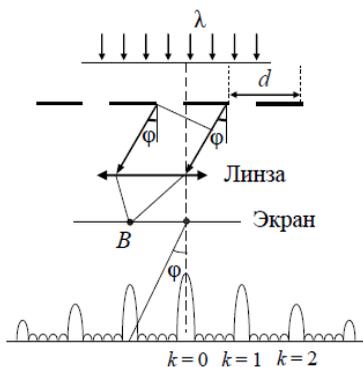
Наибольшее число главных максимумов дифракционной решетки:

$$m = 2k + 1.$$

Если решетка освещается белым светом, то наблюдаются **дифракционные спектры**, расположенные симметрично относительно центрального максимума, причем коротковолновая граница (фиолетовый цвет) будет обращена к центру дифракционной картины, красная – наружу (поскольку $\lambda_{\text{фиол}} < \lambda_{\text{кр}}$). При этом спектры разных порядков могут перекрываться.

Характеристики дифракционной решетки:

1) Угловая дисперсия дифракционной решетки характеризует угловое расстояние между близкими спектральными линиями. По определению:



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

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

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

2) Линейная дисперсия

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

где dl - линейное расстояние между спектральными линиями, отличающихся друг от друга на длину $d\lambda$.

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 m -ого порядка раздельно: $R = \frac{\lambda}{d\lambda} = mN$,

где N - число щелей, $d\lambda$ - минимальная разность длин волн двух спектральных линий, при которой эти линии воспринимаются раздельно.

Разрешающая способность решетки зависит от порядка m спектра и от общего числа N щелей той части решетки, через которую проходит исследуемое излучение и от которой зависит результирующая дифракционная картина.

Примеры решения задач по дифракции света

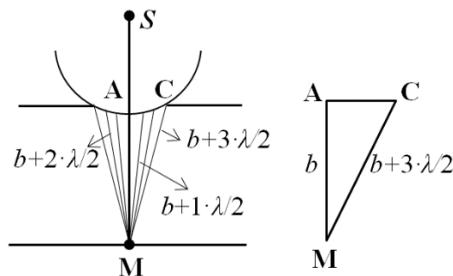
Задача 1. Между точечным источником света с длиной волны $\lambda=600$ нм и экраном поместили диафрагму с круглым отверстием, радиус которого $r=2,5$ мм. На каком расстоянии от точки наблюдения **М** до диафрагмы находится экран, если отверстие открывает первые три зоны Френеля?

Дано: $\lambda=600$ нм, $r=2,5$ мм, $m=3$.

Найти: b .

Решение:

При решении воспользуемся методом, основанным на построении зон Френеля. Волновую поверхность сферической волны от точечного источника **S** разобьем на зоны Френеля - кольцевые зоны, построенные так, что расстояние от точки наблюдения **М** до внешних границ этих зон увеличивается с шагом $\frac{\lambda}{2}$, начиная от минимального значения $b + \frac{\lambda}{2}$.



По условию задачи круглое отверстие открывает первые три зоны Френеля $m=3$. Радиус 3-ей зоны Френеля равен радиусу отверстия на экране, т.е. $r_3 = r = 2,5 \text{ мм}$.

Рассмотрим прямоугольный треугольник САМ. По теореме Пифагора:

$$\left(b + \frac{3\lambda}{2}\right)^2 = r^2 + b^2 \quad (1)$$

Упростим выражение (1), получим, $b^2 + b3\lambda + \left(3\frac{\lambda}{2}\right)^2 = r^2 + b^2$ (2).

Из формулы (2) выразим искомое расстояние b :

$$b3\lambda + \left(3\frac{\lambda}{2}\right)^2 = r^2 \Rightarrow b = \frac{r^2 - \left(3\frac{\lambda}{2}\right)^2}{3\lambda} = \frac{r^2}{3\lambda} - \frac{3\lambda}{4}$$

$$\text{Вычисления: } b = \frac{(2,5 \cdot 10^{-3})^2}{3 \cdot 600 \cdot 10^{-9}} - \frac{3 \cdot 600 \cdot 10^{-9}}{4} = 3,47 \text{ м}$$

Ответ: $b = 3,47 \text{ м}$.

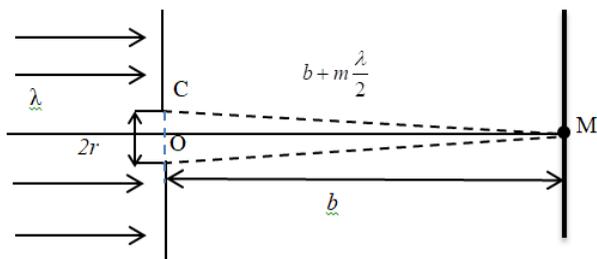
Задача 2. Плоская световая волна ($\lambda=600 \text{ нм}$) падает нормально на экран с круглым отверстием. Определить диаметр отверстия, при котором в точке наблюдения М, находящейся на расстоянии $b = 2 \text{ м}$ от экрана с круглым отверстием, будет наблюдаться максимальная освещенность света.

Дано: $\lambda=600 \text{ нм}$, $b = 2 \text{ м}$.

Найти: d .

Решение:

Максимальная освещенность в точке М будет наблюдаться при условии, когда в отверстии укладывается только первая зона Френеля (зоны Френеля имеют вид плоских колец, т.к. фронт волны плоский).



По условию падающая волна - плоская. Для плоской волны радиус m -ой зоны Френеля определяется по формуле:

$$a \rightarrow \infty, r_m = \sqrt{\frac{b}{1 + \frac{b}{a}}} m \lambda = \sqrt{b m \lambda} \cdot (1)$$

Для $m=1$ имеем $r_1 = \sqrt{b \lambda}$. Следовательно, диаметр отверстия равен:

$$d = 2r_1 = 2\sqrt{b \lambda}$$

Произведем расчеты: $d = 2\sqrt{2 \cdot 600 \cdot 10^{-9}} = 2,2 \text{ мм}$.

Ответ: $d = 2,2 \text{ мм}$.

Задача 3. Параллельный пучок монохроматического света с длиной волны $\lambda = 600 \text{ нм}$ нормально падает на диафрагму с круглым отверстием радиусом $R = 0,6 \text{ мм}$. В центре экрана, расположенного на расстоянии $b_1 = 18 \text{ см}$ от диафрагмы, наблюдается темное пятно. На какое минимальное расстояние Δb , измеряемое вдоль оси перпендикулярной отверстию, нужно удалить экран, чтобы в центре его вновь наблюдалось темное пятно?

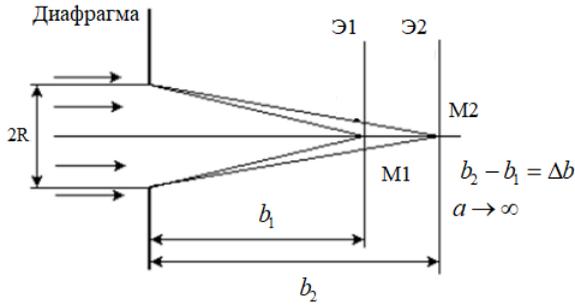
Дано: $\lambda = 600 \text{ нм}$, $R = 0,6 \text{ мм}$, $b_1 = 18 \text{ см}$.

Найти: Δb .

Решение:

Изобразим крайние лучи, формирующие дифракционную картину в точках M_1 и M_2 .

По условию задачи параллельный пучок света падает на диафрагму с круглым отверстием.



Радиус m -ой зоны Френеля для плоской волны определяется по формуле:

$$a \rightarrow \infty, r_m = \sqrt{\frac{b}{1 + \frac{b}{a}}} m \lambda = \sqrt{b m \lambda}.$$

Первоначально в центре экрана (в точке M_1) наблюдалось темное пятно (минимум при дифракции Френеля). Следовательно, в отверстии диафрагмы радиусом $r_1 = R$ укладываются четное число зон Френеля:

$$r_1^2 = b_1 m_1 \lambda,$$

где m_1 – четное число.

Из этой формулы: $m_1 = \frac{R^2}{b_1 \lambda}.$

Чтобы после смещения экрана в положение 2 в его центре (в точке M_2) вновь наблюдалось бы темное пятно, число зон Френеля, укладываемых в отверстии, должно измениться на 2, т.е. $m_2 = m_1 - 2$ и

$$r_2^2 = b_2 m_2 \lambda \Rightarrow b_2 = \frac{R^2}{m_2 \lambda}.$$

Тогда

$$b_2 = \frac{R^2}{m_2 \lambda} = \frac{R^2}{\lambda_0 \left(\frac{R^2}{b_1 \lambda} - 2 \right)}$$

и минимальное расстояние Δb , измеряемое вдоль оси перпендикулярной отверстию, на которое нужно отодвинуть экран равно:

$$\Delta b = b_2 - b_1 = \frac{R^2}{\lambda_0 \left(\frac{R^2}{b_1 \lambda} - 2 \right)} - b_1.$$

Окончательно получаем, что искомое расстояние равно:

$$\Delta b = \frac{2b_1^2 \lambda}{R^2 - 2b_1 \lambda} = \frac{2 \cdot 0,18^2 \cdot 600 \cdot 10^{-9}}{(0,6 \cdot 10^{-3})^2 - 2 \cdot 0,18 \cdot 600 \cdot 10^{-9}} = 0,27 \text{ м.}$$

Ответ: $\Delta b = 0,27 \text{ м.}$

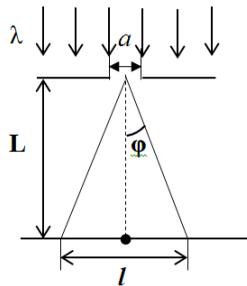
Задача 4. На щель шириной $a=0,1$ мм перпендикулярно ее плоскости падает свет с длиной волны $\lambda=600$ нм. Картину дифракции света наблюдают на экране, который расположен параллельно щели. На каком расстоянии L от щели находится экран, если ширина центрального максимума дифракции равна $l=1,2$ см? Считайте, что $a \ll L$.

Дано: $a=0,1$ мм, $\lambda=600$ нм, $l=1,2$ см.

Найти: L .

Решение:

Ширина центрального максимума интенсивности равна расстоянию между двумя минимумами интенсивности первого порядка.



Минимумы интенсивности света при дифракции от одной щели наблюдаются под углами φ , определенными условием:

$$a \cdot \sin \varphi = \pm 2k \frac{\lambda}{2}, \quad (1)$$

где k – порядок минимума, в нашем случае: $k = 1$.

Расстояние от щели до экрана L определим по рисунку:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{l}{2L} \Rightarrow L = \frac{l}{2 \operatorname{tg} \varphi}.$$

При малых углах $\operatorname{tg} \varphi = \sin \varphi$, тогда: $L = \frac{l}{2 \sin \varphi}$ (2).

Выразим $\sin \varphi$ из формулы (1) и подставим его в равенство (2):

$$L = \frac{l}{2\lambda} a \quad (3)$$

Произведем расчеты по формуле (3):

$$L = \frac{1,2 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 600 \cdot 10^{-9}} 0,1 \cdot 10^{-3} = 1 \text{ м.}$$

Ответ: $L=1 \text{ м.}$

Задача 5. На дифракционную решетку падает перпендикулярно ее плоскости свет с длиной волны равной $\lambda = 600 \text{ нм}$. На расстоянии $L = 1 \text{ м}$ от решетки находится экран, на котором с помощью собирающей линзы формируется дифракционная картина. Расстояние между двумя максимумами первого порядка, наблюдаемыми на экране равно $l = 20,2 \text{ см}$. Определить: 1) постоянную d дифракционной решётки; 2) число n штрихов на 1 мм ; 3) наибольший порядок спектра; 4) φ_{\max} максимальный угол отклонения лучей, соответствующих последнему дифракционному максимуму; 5) общее число максимумов, наблюдаемых на экране.

Дано: $\lambda = 600 \text{ нм}$, $L = 1 \text{ м}$, $l = 20,2 \text{ см}$.

Найти: d , n , k_{\max} , φ_{\max} , N .

Решение:

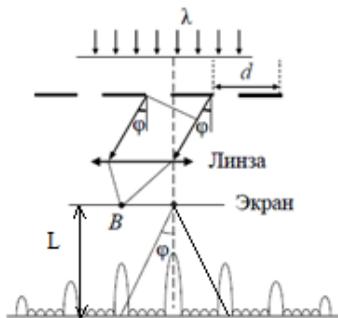
Постоянная дифракционной решётки d , длина волны λ и угол отклонения лучей, соответствующий k -му дифракционному максимуму, связаны соотношением:

$$d \cdot \sin \varphi = k\lambda, \quad (1)$$

где k – порядок спектра, или в случае монохроматического света порядок максимума.

В данном случае $k = 1$, $\text{tg} \varphi = \sin \varphi$ (так как, что $\frac{l}{2} \ll L$).

Из рисунка следует, что $\text{tg} \varphi = \frac{l}{2L}$. С учётом последних трёх равенств соотношение (1) примет вид: $d \frac{l}{2L} = \lambda \Rightarrow d = \frac{\lambda \cdot 2L}{l}$.



Подставив числовые данные, получим, что период решетки равен

$$d = \frac{600 \cdot 10^{-9} \cdot 2 \cdot 1}{20,2 \cdot 10^{-2}} = 5,94 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

Период решетки d и длина решетки l связаны соотношением: $d = \frac{l}{N}$.

Значит, число штрихов, приходящихся на 1 мм равно $n = \frac{1}{d}$.

Произведем расчеты:

$$n = \frac{1}{5,94 \cdot 10^{-6}} = 1,7 \cdot 10^5 \text{ м}^{-1} = 168 \text{ м}^{-1}.$$

Наибольший порядок спектра определим из условия $\sin \varphi_{\max} = \frac{k_{\max} \lambda}{d} \leq 1 \Rightarrow k_{\max} \leq \frac{d}{\lambda}$ (наибольшее возможное значение угла $\varphi_{\max} = \frac{\pi}{2}$, так как больше, чем на 90° , лучи от первоначального направления отклониться не могут). Следовательно,

$$k_{\max} \leq \frac{5,94 \cdot 10^{-6}}{600 \cdot 10^{-9}} = 9,9.$$

Порядок спектра является целым числом, следовательно, $k_{\max} = 9$. Следующий максимум $k = 10$ не наблюдается, так как значение $\sin \varphi$ при $k = 10$ будет больше единицы.

Найдем угол отклонения лучей φ_{\max} :

$$d \cdot \sin \varphi_{\max} = k_{\max} \lambda \Rightarrow \sin \varphi_{\max} = \frac{9 \cdot 600 \cdot 10^{-9}}{5,94 \cdot 10^{-6}} = 0,91 \Rightarrow \varphi_{\max} = 65,4^\circ$$

Определим общее число максимумов дифракционной картины. Влево и вправо от центрального максимума будет наблюдаться по одинаковому числу максимумов, равному, $k_{\max} = 9$ т.е. всего $2k_{\max} = 18$.

Если учесть так же центральный максимум нулевого порядка, получим общее число максимумов $N = 2k_{\max} + 1 = 19$.

Ответ: $d = 5,94 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, $n = 168 \text{ м}^{-1}$, $k_{\max} = 9$, $\varphi_{\max} = 65,4^\circ$, $N = 19$

Задача 6. Свет с длиной волны $\lambda = 550 \text{ нм}$ падает нормально на дифракционную решетку. Определить угловую дисперсию решетки под углом дифракции $\varphi = 60^\circ$.

Дано: $\lambda = 550$ нм, $\varphi = 60^\circ$.

Найти: D_φ .

Решение:

Угловой дисперсией называется величина, равная $D_\varphi = \frac{d\varphi}{d\lambda}$, где $d\varphi$ - угловое расстояние между двумя линиями, отличающимися по длине волны на $d\lambda$:

$$D_\varphi = \frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{k}{d \cos \varphi}.$$

Из условия главного максимума $d \cdot \sin \varphi = k\lambda$ для дифракционной решетки выразим период решетки: $d = \frac{k\lambda}{\sin \varphi}$.

Получаем, что угловая дисперсия дифракционной решетки равна:

$$D_\varphi = \frac{\sin \varphi}{\lambda \cos \varphi} = \operatorname{tg} \varphi \cdot \frac{1}{\lambda}.$$

Произведем расчеты:

$$D_\varphi = \operatorname{tg} 60^\circ \cdot \frac{1}{550 \cdot 10^{-9}} = 0,0032 \frac{\text{рад}}{\text{нм}}.$$

Ответ: $D_\varphi = 0,0032 \frac{\text{рад}}{\text{нм}}$.

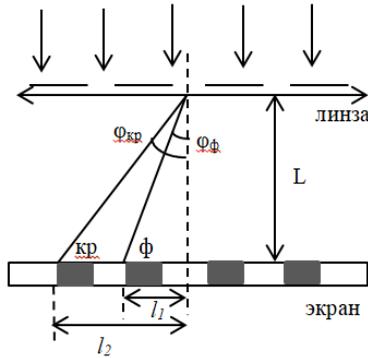
Задача 7. На дифракционную решетку, содержащую $n = 200$ штрихов на каждый мм, нормально падает пучок света. Определить ширину Δl спектра первого порядка, полученного на экране. Экран находится на расстоянии $L = 1$ м от решетки. Принять, что видимый спектр имеет границы от $\lambda_{\text{ф}} = 0,4$ мкм до $\lambda_{\text{кр}} = 0,7$ мкм. Чему равно общее число наблюдаемых главных максимумов N для длины волны $\lambda_{\text{кр}}$?

Дано: $n = 200$ на 1 мм, $L = 1$ м, $\lambda_{\text{ф}} = 0,4$ мкм, $\lambda_{\text{кр}} = 0,7$ мкм.

Найти: Δl , N .

Решение:

1. Так как решетка освещается белым светом, то все максимумы, кроме центрального, разлагаются в спектр, причем, фиолетовая область спектра обращена к центру дифракционной картины, а красная – наружу(рис.).



Согласно условию главных максимумов при дифракции:

$$d \cdot \sin \varphi = \pm k \lambda \quad (k = 0, 1, 2, \dots), \quad (1)$$

Из условия (1) следует, что для спектра одного и того же порядка $k=1$ максимумы разных цветов наблюдаются под разными углами дифракции φ (по отношению к центру). Так как углы φ очень малы, то можно считать, что $\sin \varphi = \operatorname{tg} \varphi$ (2).

Из рисунка определим $\operatorname{tg} \varphi$: $\operatorname{tg} \varphi = \frac{l}{L}$ (3), где l – расстояние от центра экрана до точки наблюдения первого максимума, а L – расстояние от решетки до экрана.

Запишем условие (1) для λ_{ϕ} фиолетового и λ_{kp} красного цветов первого порядка $k=1$:

$$\sin \varphi_{kp} = \frac{\lambda_{kp}}{d} \quad (4) \quad \text{и} \quad \sin \varphi_{\phi} = \frac{\lambda_{\phi}}{d}. \quad (5)$$

Учитывая соотношения (3) и (4), (5) получим, что

$$\operatorname{tg} \varphi_{\phi} = \frac{l_1}{L} = \frac{\lambda_{\phi}}{d} \quad (6)$$

и

$$\operatorname{tg} \varphi_{kp} = \frac{l_2}{L} = \frac{\lambda_{kp}}{d} \quad (7).$$

Из (6) и (7) выразим расстояния l_1 и l_2 . Тогда ширина Δl спектра первого порядка равна:

$$\Delta l = l_2 - l_1 = \frac{L}{d} (\lambda_{kp} - \lambda_{\phi}) \quad (8).$$

Число штрихов n , приходящихся на единицу длины решетки, связано с периодом решетки d соотношением

$$d = \frac{1}{n} \Rightarrow d = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{200} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

Подставим в формулу (8) численные значения и определим ширину спектра:

$$\Delta l = \frac{1}{5 \cdot 10^{-6}} (0,7 \cdot 10^{-6} - 0,4 \cdot 10^{-6}) = 0,06 \text{ м}$$

2. Общее число максимумов, разрешаемых данной решеткой для $\lambda_{кр}$, найдем из условия: $\sin \varphi_{max} = \frac{k_{max} \lambda}{d} \leq 1 \Rightarrow k_{max} \leq \frac{d}{\lambda}$.

При расчете получаем: $k_{max} \leq \frac{5 \cdot 10^{-6}}{700 \cdot 10^{-9}} = 7$.

Столько же максимумов разрешается и с другой стороны решетки. Учитывая это, а также центральный максимум получим, что общее число максимумов, даваемых решеткой для $\lambda_{кр}$ равно $N = 2 \cdot k_{max} + 1 = 15$.

Ответ: $\Delta l = 0,06 \text{ м}, N = 15$.

Задача 8. Свет, проходящий через зеленый светофильтр ($\lambda_3 = 0,54 \text{ мкм}$) падает на дифракционную решетку ($n = 100$ штрихов на $\Delta l = 1 \text{ мм}$). Дифракционная картина наблюдается на экране, отстоящем от нее на расстоянии $L = 1,5 \text{ м}$. На какую величину Δx сместится спектр первого порядка, если зеленый светофильтр заменить красным ($\lambda_{кр} = 0,7 \text{ мкм}$)?

Дано: $\lambda_3 = 0,54 \text{ мкм}, n = 100, \Delta l = 1 \text{ мм}, L = 1,5 \text{ м}, \lambda_{кр} = 0,7 \text{ мкм}$

Найти: Δx .

Решение:

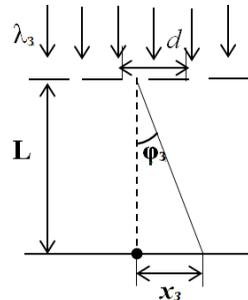
Согласно условию главных максимумов при дифракции:

$$d \cdot \sin \varphi = \pm k \lambda \quad (k = 0, 1, 2, \dots), \quad (1)$$

где $d = \frac{\Delta l}{N}$ - постоянная дифракционной решетки; $k = 1, 2, \dots$ - порядок спектра.

Постоянная дифракционной решетки равен: $d = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{100} = 10,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}$. Для $k = 1$ в случае

зеленого цвета: $\sin \varphi_1 = \frac{\lambda_3}{d}$, а для красного цвета $\sin \varphi_2 = \frac{\lambda_{кр}}{d}$.



Положение спектра на экране (рис.) для зеленого цвета определим по рисунку:

$$x_3 = L \cdot \operatorname{tg} \varphi_1 .$$

При малых углах $\operatorname{tg} \varphi = \sin \varphi$,

и соответственно, на расстоянии $x_3 = L \cdot \sin \varphi_1 = L \frac{\lambda_3}{d}$ от центра экрана наблюдается первый максимум для λ_3 .

Аналогично, первый максимум для красного цвета с длиной волны $\lambda_{\text{кр}}$ будет наблюдаться на экране на расстоянии $x_{\text{кр}} = L \frac{\lambda_{\text{кр}}}{d}$. Если зеленый светофильтр заменить красным, то спектр первого порядка сместится Δx на величину:

$$\Delta x = x_{\text{кр}} - x_3 = \frac{L}{d} (\lambda_{\text{кр}} - \lambda_3).$$

Произведем расчеты:

$$\Delta x = \frac{1,5}{10 \cdot 10^{-6}} (0,7 \cdot 10^{-6} - 0,54 \cdot 10^{-6}) = 0,024 \text{ м} = 24 \text{ мм} .$$

Ответ: $\Delta x = 24 \text{ мм}$.

Задача 9. Определить, при каком минимальном числе штрихов дифракционной решетки, имеющей 200 штрихов на 1 мм, можно разрешить две желтые линии натрия с длинами волн $\lambda_1 = 589,0 \text{ нм}$ и $\lambda_2 = 589,59 \text{ нм}$?

Дано: $n=200$, $\Delta l=1 \text{ мм}$, $d=2,9 \text{ мкм}$, $\lambda_1=589,0 \text{ нм}$, $\lambda_2=589,59 \text{ нм}$.

Найти: N_{min} .

Решение: Разрешающая способность дифракционной решетки R и число ее штрихов N связаны соотношением $R = mN$, где m - порядок спектра.

Минимальному значению N_{min} будет соответствовать минимальное значение разрешающей способности R_{min} и максимальное число m_{max} :

$$N_{\text{min}} = \frac{R_{\text{min}}}{m_{\text{max}}} (1).$$

Минимальная разрешающая способность R_{min} , необходимая для разрешения двух близких линий натрия, выражается через длины волн λ_1 и λ_2 по формуле:

$$R_{\text{min}} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} .$$

Максимальный порядок спектра m_{\max} определим из формулы главного максимума дифракционной решетки: $d \cdot \sin \varphi = \pm k \lambda$. Учтем, что $\sin \varphi_{\max} = \frac{k_{\max} \lambda}{d} \leq 1 \Rightarrow k_{\max} \leq \frac{d}{\lambda}$ и $\lambda_1 = \lambda_2$ (это условие гарантирует, что обе линии с порядковым номером k_{\max} будут разрешимы).

Период дифракционной решетки равен: $d = \frac{\Delta l}{n} = \frac{1 \cdot 10^{-3} \text{ м}}{200} = 5,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}$.

Произведем расчеты:

$$k_{\max} \leq \frac{d}{\lambda_1} = \frac{5,0 \cdot 10^{-6}}{589,0 \cdot 10^{-9}} = 8.$$

Подставив значения R_{\min} и k_{\max} в формулу (1), найдем

$$N_{\min} = \frac{\lambda_1}{8(\lambda_1 - \lambda_2)} = \frac{589,0 \cdot 10^{-9}}{8 \cdot 0,6 \cdot 10^{-9}} = 123.$$

Ответ: $N_{\min} = 123$.

Тестовые задания по дифракции света

6. Общие вопросы

6.1. Выберите правильный ответ. Дифракцией света называется:

- 1) перераспределение интенсивности света в результате суперпозиции двух или нескольких когерентных световых волн;
- 2) огибание волной препятствий и попадание света в область геометрической тени;
- 3) зависимость показателя преломления среды от длины волны света;
- 4) сложение когерентных волн.

6.2. Укажите правильные высказывания:

- 1) наблюдение дифракции света возможно, если размеры неоднородностей среды во много раз больше длины волны света;
- 2) если на дифракционную решетку падает белый свет, то главные максимумы раскладываются в спектр;
- 3) согласно принципу Гюйгенса-Френеля, вторичные источники являются когерентными;
- 4) дифракционные явления присущи только волновым процессам.

6.3. Укажите правильные высказывания:

- 1) если на дифракционную решетку падает монохроматический свет, то главные максимумы раскладываются в спектр;
- 2) дифракция Френеля осуществляется в том случае, когда дифракционная картина наблюдается на конечном расстоянии от препятствия, вызвавшего дифракцию;
- 3) дифракция Фраунгофера наблюдается в том случае, когда источник света и точка наблюдения бесконечно удалены от препятствия, вызвавшего дифракцию;
- 4) при дифракции Френеля на круглом отверстии дифракционная картина на экране представляет собой темные и светлые полосы.

6.4. Укажите правильные высказывания:

- 1) наблюдение дифракции света возможно, если размеры неоднородностей среды больше длины волны света;
- 2) волновой фронт - геометрическое место точек, испытывающих возмущение обобщенной координаты в одинаковой фазе;
- 3) волновой поверхностью для плоской волны - плоскость;
- 4) образование дифракционного спектра обусловлено дисперсией света на дифракционной решетке.

6.5. Укажите правильные высказывания:

- 1) угловая дисперсия дифракционной решетки уменьшается с увеличением порядка спектра;
- 2) если на щели укладывается нечетное число зон Френеля, то наблюдается минимум интенсивности света;
- 3) при уменьшении периода решетки угловая дисперсия уменьшается;
- 4) по принципу Гюйгенса-Френеля, вторичные источники поляризованы.

6.6. Выберите правильный ответ. Метод зон Френеля

- 1) подтверждает закон прямолинейного распространения света в однородной среде;
- 2) противоречит закону прямолинейного распространения света в однородной среде;
- 3) позволяет оценить амплитуду колебаний в любой точке дифракционной картины;
- 4) позволяет оценить амплитуду колебаний в центре дифракционной картины.

6.7. Между точечным источником света и экраном помещен небольшой непрозрачный диск. Что наблюдается на экране?

- 1) во всех точках экрана интенсивность нулевая;

- 2) на экране видны чередующиеся светлые и темные кольца, а в центре колец – темное пятно;
 3) экран освещен, при этом к его краям интенсивность света возрастает;
 4) на экране наблюдаются чередующиеся светлые и темные кольца, а в центре – светлое пятно.

6.8. Какое явление отражает картинка, изображенная на рисунке?

- 1) интерференцию света в тонких пленках;
 2) дифракцию света от круглого отверстия, открывающего четное число зон Френеля;
 3) дифракцию света от круглого отверстия, открывающего нечетное число зон Френеля;
 4) ничего сказать определенного нельзя.



6.9. Какое явление отражает картинка, изображенная на рисунке?

- 1) интерференцию света в тонких пленках;
 2) дифракцию света от круглого диска;
 3) дифракцию света от круглого отверстия, открывающего нечетное число зон Френеля;
 4) ничего сказать определенного нельзя.



6.10. Какое явление отражает картинка, изображенная на рисунке?

- 1) интерференцию света в тонких пленках;
 2) дифракцию света от круглого отверстия, открывающего четное число зон Френеля;
 3) дифракцию света от круглого отверстия, открывающего нечетное число зон Френеля;
 4) ничего сказать определенного нельзя.

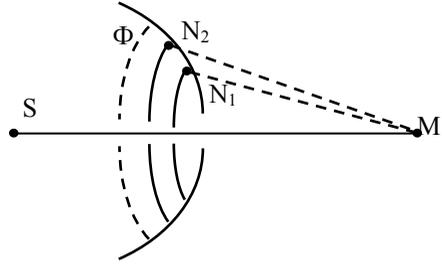


6.11. Установите соответствия:

1	$a \cdot \sin \varphi = \pm k \lambda$	A	Угловая дисперсия дифракционной решетки
2	$d \cdot \sin \varphi = \pm k \lambda \ (k = 0, 1, 2, \dots)$	B	Линейная дисперсия дифракционной решетки
3	$D_e = \frac{dl}{d\lambda}$	C	Разрешающая способность дифракционной решетки
4	$D_\varphi = \frac{m}{d \cos \varphi}$	D	Условие минимума на щели шириной a
5	$R = kN$	F	Условие главного максимума при дифракции света на дифракционной решетки

7. Зоны Френеля

7.1. На рисунке изображены зоны Френеля для сферической световой волны. S – точечный источник света, M – точка наблюдения. Укажите правильные утверждения.



1) фазы колебаний волн, приходящих в точку M от двух соседних зон Френеля, отличаются на $\lambda/2$;

2) площади зон Френеля примерно одинаковы, а вклад каждой зоны в суммарную интенсивность в точке M убывает с увеличением номера зоны;

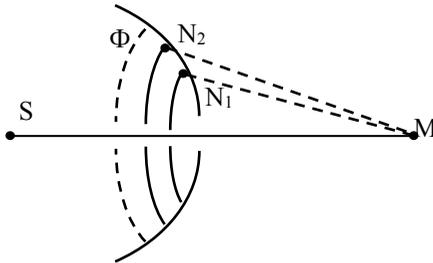
3) фазы колебаний волн, приходящих в точку M от двух соседних зон Френеля, отличаются на λ ;

4) площади зон Френеля примерно одинаковы, а вклад каждой зоны в суммарную интенсивность в точке M увеличивается с увеличением номера зоны.

7.2. Колебания, приходящие в точку M от двух краёв соседних зон Френеля отличаются на фазу, равную:

- 1) 2π ; 2) π ; 3) $\pi/2$; 4) $3\pi/2$.

7.3. На рисунке представлена схема разбиения волновой поверхности Φ на зоны Френеля. Чему равна разность хода между лучами N_1M и N_2M равна?



- 1) $\frac{\lambda}{4}$; 2) $\frac{\lambda}{2}$; 3) λ ; 4) $\frac{3\lambda}{4}$.

7.4. На диафрагму с круглым отверстием радиусом $r=1$ мм падает нормально параллельный пучок света длиной волны $\lambda=0,5$ мкм. За диафрагмой на расстоянии $b=1$ м от нее находится экран. Что будет наблюдаться в центре экрана?

- 1) темное пятно, так как в отверстии укладываются 2 зоны Френеля;
- 2) светлое пятно, так как в отверстии укладываются 5 зон Френеля;
- 3) светлое пятно, так как в отверстии укладываются 3 зоны Френеля;
- 4) темное пятно, так как в отверстии укладываются 4 зоны Френеля.

7.5. На диафрагму с круглым отверстием, радиус которого равен $r=1,73$ мм падает плоская волна с $\lambda=0,6$ мкм. За диафрагмой на расстоянии $b=1$ м от нее находится экран. Что будет наблюдаться в центре экрана?

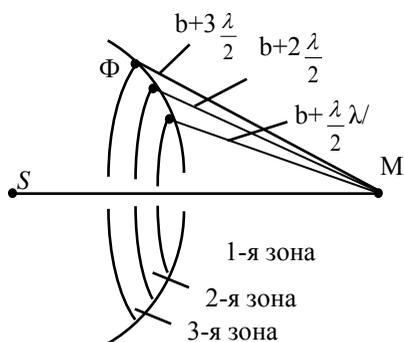
- 1) темное пятно, так как в отверстии укладываются 2 зоны Френеля;
- 2) светлое пятно, так как в отверстии укладываются 5 зон Френеля;
- 3) светлое пятно, так как в отверстии укладываются 3 зоны Френеля;
- 4) темное пятно, так как в отверстии укладываются 4 зоны Френеля.

7.6. Плоская световая волна $\lambda=600$ нм падает нормально на диафрагму с круглым отверстием, радиус которого равен $0,6$ мм. На каком расстоянии от диафрагмы помещают экран, если в отверстие укладывается 1 зоны Френеля? Ответ представить в см.

- 1) 30 см; 2) 10 см; 3) 60 см; 4) 100 см.

7.7. На рисунке представлена схема разбиения волновой поверхности Φ на зоны Френеля. Амплитуды колебаний, возбуждаемых в точке M 1-й, 2-й, 3-й и т.д. зонами, обозначим A_1, A_2, A_3 и т.д. Чему равна амплитуда A результирующего колебания в точке M определяется выражением?

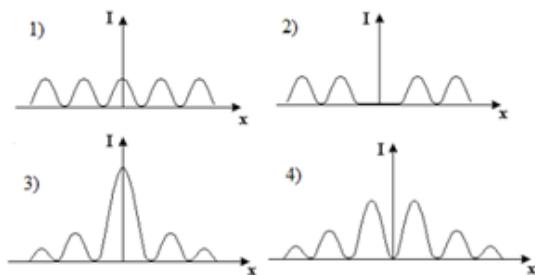
- 1) $A = A_1 - A_2 + A_3 - A_4 + \dots$;
- 2) $A = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + \dots$;
- 3) $A = A_1 + A_3 + A_5 + A_7 + \dots$;
- 4) $A = A_2 + A_4 + A_6 + A_8 + \dots$;
- 5) $A = A_1 - A_2 - A_3 - A_4 - \dots$



7.8. На диафрагму с круглым отверстием радиусом 2 мм падает нормально параллельный пучок света длиной волны 0,5 мкм. За диафрагмой на расстоянии 1 м от нее находится экран. Какое число m зон Френеля укладывается в отверстие диафрагмы?

- 1) 8; 2) 16; 3) 7; 4) 5.

7.9. Между точечным источником света и экраном помещен диск. На каком рисунке правильно изображено распределение интенсивности света I на экране?



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

7.10. На диафрагму с круглым отверстием радиусом 1 мм падает нормально параллельный пучок света с длиной волны 500 нм. На каком расстоянии от диафрагмы помещают экран, если в отверстие укладывается 2 зоны Френеля?

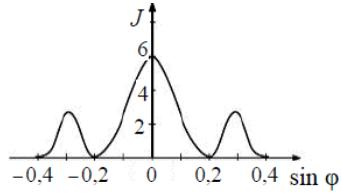
- 1) 1,4; 2) 1; 3) 0,6; 4) 0,8.

7.11. На диафрагму с круглым отверстием радиусом $r=2$ мм падает нормально параллельный пучок света с длиной волны $\lambda=500$ нм. На каком расстоянии от диафрагмы находится экран, если круглое отверстие открывает первые 8 зон Френеля (в см)?

- 1) 100; 2) 50; 3) 10; 4) 200.

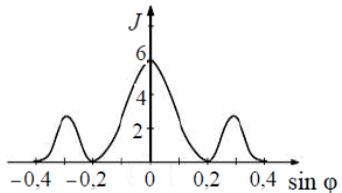
8. Дифракция Френеля на щели

8.1. На щель шириной a падает нормально плоская световая волна длиной волны λ . На рисунке представлен график зависимости интенсивности света I от синуса угла дифракции φ . Расстояние от щели до экрана составляет 0,5 м. Чему равна ширина центрального максимума(в см)? Принять, что $\sin \varphi = tg \varphi$.



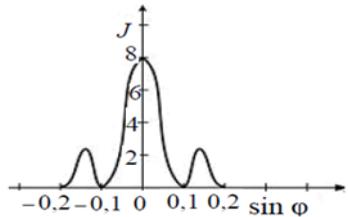
- 1) 40; 2) 30; 3) 80; 4) 20.

8.2. На щель шириной a падает нормально плоская световая волна длиной волны λ . На рисунке представлен график зависимости интенсивности света I от синуса угла дифракции. Чему равно отношение $\frac{a}{\lambda}$?



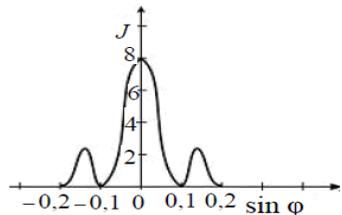
- 1) 5; 2) 2,5; 3) 1; 4) 3.

8.3. На щель шириной a падает нормально плоская световая волна длиной волны λ . На рисунке представлен график зависимости интенсивности света I от синуса угла дифракции. Чему равно отношение $\frac{a}{\lambda}$?



- 1) 2; 2) 4; 3) 6; 4) 5.

8.4. На узкую щель шириной a падает нормально плоская световая волна длиной волны $\lambda=500$ нм. На рисунке представлен график зависимости интенсивности света I от синуса угла дифракции. Чему равна ширина щели a ?



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

8.5. На узкую щель шириной a падает нормально монохроматический свет с длиной света λ . Угол φ отклонения лучей света, соответствующих второй светлой дифракционной полосе, равен 30° . Чему равно отношение $\frac{a}{\lambda}$?

- 1) 2; 2) 4; 3) 6; 4) 5.

8.6. На щель шириной $a = 6\lambda$ падает нормально параллельный пучок монохроматического света с длиной волны λ . Под каким углом наблюдается третий дифракционный минимум света?

- 1) 30° ; 2) 60° ; 3) 45° ; 4) 20° .

8.7. На щель шириной $a = 3\lambda$ падает нормально параллельный пучок монохроматического света с длиной волны λ . Под каким углом наблюдается третий дифракционный максимум света?

- 1) 30° ; 2) 60° ; 3) 45° ; 4) 20° .

8.8. На узкую щель шириной a падает нормально монохроматический свет с длиной волны λ . Под каким углом наблюдается второй дифракционный максимум?

- 1) $\sin \varphi = \frac{3\lambda}{2a}$; 2) $\sin \varphi = \frac{5\lambda}{2a}$; 3) $\sin \varphi = \frac{\lambda}{2a}$; 4) $\sin \varphi = \frac{\lambda}{a}$.

8.9. На узкую щель шириной a падает нормально монохроматический свет с длиной волны λ . Под каким углом наблюдается второй дифракционный максимум?

- 1) $\sin \varphi = \frac{3\lambda}{2a}$ 2) $\sin \varphi = \frac{5\lambda}{2a}$ 3) $\sin \varphi = \frac{\lambda}{2a}$ 4) $\sin \varphi = \frac{\lambda}{a}$

8.10. На узкую щель шириной a падает нормально монохроматический свет с длиной волны λ . Под каким углом наблюдается первый дифракционный максимум?

- 1) $\sin \varphi = \frac{\lambda}{a}$ 2) $\sin \varphi = \frac{5\lambda}{a}$ 3) $\sin \varphi = \frac{\lambda}{2a}$ 4) $\sin \varphi = \frac{4\lambda}{a}$

9. Дифракционная решетка

9.1. Установите соответствия:

1	$R = \frac{\lambda}{d\lambda}$	А	Угловая дисперсия дифракционной решетки
2	$d \cdot \sin \varphi = \pm k\lambda \ (k = 0, 1, 2, \dots)$	В	Линейная дисперсия дифракционной решетки
3	$D_e = \frac{dl}{d\lambda}$	С	Разрешающая способность дифракционной решетки
4	$D_\varphi = \frac{m}{d \cos \varphi}$	D	Условие главного максимума при дифракции света на дифракционной решетке

9.2. На дифракционную решетку, содержащую $n = 400$ штрихов на 1 мм, падает нормально монохроматический свет ($\lambda = 0,5$ мкм). Найти общее число дифракционных максимумов, которое дает эта решетка.

- 1) 5; 2) 10; 3) 11; 4) 13.

9.3. Монохроматический свет падает нормально на дифракционную решетку. В спектре второго порядка красная линия ($\lambda_{кр} = 700$ нм) наблюдается под углом $\varphi_2 = 30^\circ$. Под каким углом φ_3 расположена фиолетовая линия ($\lambda_{ф} = 400$ нм) в спектре третьего порядка? Каков наибольший порядок m спектра для красного света? Укажите правильные номера ответов.

- 1) $\varphi_3 = 48^\circ$; 2) $\varphi_3 = 25^\circ$; 3) $\varphi_3 = 18^\circ$;
 4) $m = 4$; 5) $m = 4$; 6) $m = 3$.

9.4. На поверхность дифракционной решетки нормально падает монохроматический свет. Постоянная дифракционной решетки в 4,6 раза больше световой волны. Чему равно общее число дифракционных максимумов, которое теоретически возможно наблюдать в данном случае?

- 1) 4; 2) 9; 3) 8; 4) 5.

9.5. Длина решетки $l = 15$ мм, период $d = 5$ мкм. В спектре какого наименьшего порядка возможно разрешение двух спектральных линий с разностью длин волн $\Delta\lambda = 1 \text{ \AA}$, если эти линии лежат в красной части спектра (от 7800 до 7000 \AA)?

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

9.6. На дифракционную решетку падает нормально параллельный пучок лучей белого света. Спектры третьего и четвертого порядков частично накладываются друг на друга. На какую длину волны в спектре четвертого порядка накладывается граница ($\lambda = 780$ нм) спектра третьего порядка?

- 1) 620 нм; 2) 292 нм; 3) 390 нм; 4) 585 нм.

9.7. На дифракционную решетку, содержащую 500 штрихов на миллиметр, падает нормально синий свет ($\lambda = 4,4 \cdot 10^{-7}$ м). Определите общее число N дифракционных максимумов и угол φ , под которым наблюдается максимум наибольшего порядка. Укажите правильные номера ответов

- 1) $N = 11$; 2) $N = 9$; 3) $N = 7$;
4) $\varphi_3 = 62^\circ$; 5) $\varphi_3 = 90^\circ$; 6) $\varphi_3 = 32^\circ$.

9.8. Постоянная дифракционной решетки $d = 4$ мкм. На решетку падает нормально свет с длиной волны $\lambda = 0,59$ мкм. Максимумы какого наибольшего порядка дает эта решетка?

- 1) 3; 2) 4; 3) 7; 4) 6.

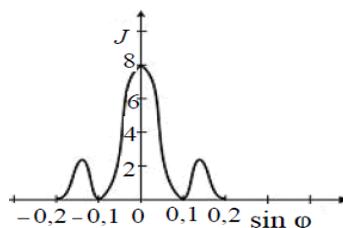
9.10. При нормальном падении света на дифракционную решетку шириной $l = 10$ мм обнаружено, что две желтые линии натрия с длинами волн $\lambda_1 = 589,0$ нм и $\lambda_2 = 589,6$ нм разрешены с пятого порядка спектра. Чему равна ширина дифракционной решетки с этим же периодом, чтобы можно было разрешить две линии с длинами волн $\lambda_1 = 460,0$ нм и $\lambda_2 = 460,13$ нм в третьем порядке?

- 1) 8 см; 2) 6 см; 3) 4 см; 4) 3 см.

9.11. Какое наименьшее число штрихов должна содержать решетка, чтобы в спектре второго порядка можно было видеть раздельно две желтые линии натрия с длинами волн $\lambda_1 = 589,0$ нм и $\lambda_2 = 589,6$ нм?

- 1) 982; 2) 600; 3) 700; 4) 491.

9.12. При дифракции на дифракционной решетке с периодом $d = 0,004$ мм наблюдается зависимость интенсивности I монохроматического света от синуса угла дифракции, представленная на рисунке (изображены только главные максимумы). Чему равна длина волны света?



- 1) 400 нм; 2) 500 нм; 3) 600 нм; 4) 560 нм.

9.13. На дифракционную решетку нормально падает пучок света от разрядной трубки, наполненной гелием. На какую длину волны в спектре третьего порядка накладывается красная линия гелия $\lambda=670$ нм спектра второго порядка?

- 1) 447 нм; 2) 600 нм; 3) 565 нм; 4) 547 нм.

9.14. Какое наименьшее число штрихов должна содержать дифракционная решетка, чтобы две составляющие желтой линии натрия с длинами волн 588,0 нм и 588,6 нм можно было наблюдать раздельно в спектре первого порядка?

- 1) 982; 2) 600; 3) 700; 4) 491.

9.15. Монохроматический свет нормально падает на дифракционную решетку период которой в 12 раз больше длины. Какое количество дифракционных максимумов можно наблюдать в этом случае?

- 1) 12; 2) 4; 3) 25; 4) 144.

9.20. Дифракционная решетка содержит 200 штрихов на каждый миллиметр. На решетку нормально падает монохроматический свет с длиной волны 575 нм. Чему равно число наблюдаемых главных максимумов в дифракционной картине?

- 1) 9; 2) 8; 3) 7; 4) 6;

9.21. Желтый свет натрия ($\lambda=589$ нм) падает на дифракционную решетку, имеющую 7500 штрихов на 1 мм. Чему равна угловая дисперсия дифракционной решетки? Ответ выразить в $\frac{\text{град}}{\text{нм}}$.

- 1) 0,23; 2) 0,86; 3) 0,186; 4) 0,0186.

9.22. Желтый свет натрия, которому соответствуют длины волн 589,0 нм и 589,59 нм, падает на дифракционную решетку, имеющую 7500 штрихов на 1 мм. Чему равна разрешающая способность дифракционной решетки в этом случае?

- 1) 500; 2) 10000; 3) 1000; 4) 1500.

10. Расчетные задания по дифракции света

10.1. На преграду с отверстием диаметра $d=2,0$ мм падает монохроматическая плоская волна. Когда расстояние от преграды до за ней экрана равно $b_1=0,833$ м, в центре дифракционной картины наблюдается минимум интенсивности света. При уменьшении расстояния до значения $b_2=0,556$ м минимум интенсивности сменяется максимумом. Чему равна длина волны падающего света λ ? Ответ: $\lambda=600$ нм.

10.2. Свет от монохроматического источника с длиной волны $\lambda=600$ нм падает нормально на диафрагму с круглым отверстием радиусом $r=0,6$ мм. Каким (темным или светлым) будет центр дифракционной картины на экране, находящемся на расстоянии $b=0,3$ м от диафрагмы? На сколько минимально необходимо увеличить радиус отверстия, чтобы освещенность в центре картины изменилась на противоположную? Ответ: Темный; $0,13$ мм.

10.3. Между точечным источником света и экраном поместили диафрагму с круглым отверстием, радиус которого r можно менять в процессе опыта. Расстояние от диафрагмы до источника и экрана равны $a = 100$ см и $b=125$ см. Чему равна длина волны света, если максимум освещенности в центре дифракционной картины на экране наблюдается при $r_1=1,00$ мм и следующий максимум при $r_2= 1,29$ мм. Ответ: $\lambda=0,6$ мкм.

10.4. На щель шириной $b=0,02$ мм нормально падает параллельный пучок света с длиной волны $\lambda = 600$ нм. Чему равно расстояние между первыми дифракционными минимумами, расположенными по обе стороны от центра экрана? Экран удален от щели на расстоянии $\ell = 1$ м. Ответ: 6 см.

10.5. На щель шириной $b_1=1,0$ мм, установленную на расстоянии $\ell = 1$ м от экрана, падает по нормали плоская световая волна с длиной $\lambda= 500$ нм. Чему равно расстояние между максимумами первого и второго порядком (в см)? Как изменится это расстояние, если ширину щели увеличить до $b_2=2,0$ мм? Ответ: $0,1$ см.

10.6. Дифракционная решетка освещается нормально падающим монохроматическим светом с длиной волны $\lambda=650$ нм. В дифракционной картине максимум второго порядка наблюдается под углом $\varphi_1 = 14^\circ$. Под каким углом φ_2 наблюдается максимум третьего порядка? Чему равен максимальный порядок спектра этой решетки, если ее период равен $2,0$ мкм? Ответ: $\varphi_2 = 21^\circ; 2$.

10.7. При освещении дифракционной решетки белым светом спектры второго и третьего порядков отчасти перекрывают друг друга. На какую длину волны в спектре второго порядка накладывается фиолетовая граница ($\lambda = 0,4$ мкм) спектра третьего порядка? Ответ: $\lambda= 0,6$ мкм.

10.8. На дифракционную решетку, содержащую $n = 400$ штрихов на 1 мм, падает нормально монохроматический свет ($\lambda = 0,6$ мкм). Найти общее число дифракционных максимумов, которые дает эта решетка. Под каким углом наблюдается последний дифракционный максимум? Ответ: $N = 9$.

10.9. На дифракционную решетку нормально падает пучок света. При повороте трубы гониометра на угол φ в поле зрения видна линия $\lambda_1 = 440$ нм в спектре третьего порядка. Будут ли видны под этим же углом φ другие спектральные линии λ_2 , соответствующие длинам волн в пределах видимого спектра (от 400 до 700 нм)? Ответ: будет $\lambda = 660$ нм при $k = 2$.

10.10. Постоянная дифракционной решетки $d = 2$ мкм. Какую разность длин волн $\Delta\lambda$ может разрешить эта решетка в области желтых лучей ($\lambda = 600$ нм) в спектре второго порядка? Ширина решетки $l = 2,5$ см. Ответ: $\Delta\lambda = 0,06$ нм.

10.11. Дифракционная картина получена с помощью дифракционной решетки длиной 1,5 см и периодом $d = 5$ мкм. Определить, в спектре какого наименьшего порядка этой картины получатся отдельные изображения двух спектральных линий с разностью длин волн $\Delta\lambda = 0,1$ нм, если линии лежат в красной части спектра ($\lambda = 760$ нм). Ответ: $k = 3$.

10.12. Какова должна быть постоянная d дифракционной решетки, чтобы в первом порядке был разрешен дублет натрия $\lambda_1 = 589$ нм и $\lambda_2 = 589,6$ нм? Ширина решетки $l = 2,5$ см. Ответ: $d = 25$ мкм.

10.13. Какой наименьшей разрешающей силой R_{\min} должна обладать дифракционная решетка, чтобы с ее помощью можно было разрешить две спектральные линии калия ($\lambda_1 = 578$ нм; $\lambda_2 = 580$ нм)? Какое наименьшее число N_{\min} штрихов должна иметь эта решетка, чтобы разрешение было возможно в спектре второго порядка? Ответ: $R = 290$; $N = R/k$.

10.14. На дифракционную решетку, содержащую $n = 500$ штрихов на 1 мм, падает нормально монохроматический свет с длиной волны $\lambda = 700$ нм. За решеткой помещена собирающая линза с главным фокусным расстоянием $F = 50$ см. В фокальной плоскости линзы расположен экран. Определить линейную дисперсию D такой системы для максимума третьего порядка. Ответ: $D = 1$ мм/нм.

10.15. Две дифракционные решетки имеют одинаковую ширину 3 мм, но разные периоды: $d_1 = 3 \cdot 10^{-3}$ мм и $d_2 = 6 \cdot 10^{-3}$ мм. Определить их наибольшую разрешающую способность для желтой линии натрия ($\lambda = 5896 \text{ \AA}$). Ответ: $R = 5000$.

10.16. На дифракционную решетку нормально падает пучок света. Натриевая линия ($\lambda_1 = 589$ нм) дает в спектре первого порядка наблюдается под углом дифракции $\varphi_1 = 17^\circ 8'$. Некоторая линия наблюдается в спектре второго порядка под углом дифракции $\varphi_2 = 24^\circ 12'$. Чему равна

длина волны λ_2 этой линии и число штрихов N_0 на единицу длины решетки. Ответ: $\lambda_2 = 409,9$ нм, $N_0 = 500$ мм⁻¹.

10.17. На дифракционную решетку направлен белый свет. На экране в одном из спектров фиолетовая граница с $\lambda_1=0,4$ мкм образуется под углом $\varphi_1= 18,7^\circ$, а в спектре следующего порядка красная граница с $\lambda_2=0,7$ мкм образуется под углом $\varphi_2=57,1^\circ$. Сколько полных спектров укладывается на экране? Ответ: 6.

10.18. Нормально к поверхности дифракционной решетки падает монохроматический свет. Постоянная дифракционной решетки в $n=3,5$ раза больше длины световой волны. Чему равно общее число максимумов, которые теоретически можно наблюдать в данном случае. Определить угол дифракции, соответствующий последнему максимуму. Ответ: $7, 59^\circ$.

10.19. На дифракционную решетку, имеющую 800 штрихов на 1 мм, падает параллельный пучок белого света. Какова разность углов отклонения конца первого и начала второго спектров? Видимым считать свет в диапазоне 400 - 760 нм. Ответ: $2,4^\circ$.

10.20. На дифракционную решетку нормально падает пучок монохроматического света. Максимум третьего порядка наблюдается под углом дифракции $\varphi= 36,5^\circ$. Определить постоянную d дифракционной решетки, выраженную в длинах волн падающего света. Сколько главных максимумов наблюдается на экране? Ответ: $d = 5\lambda$.

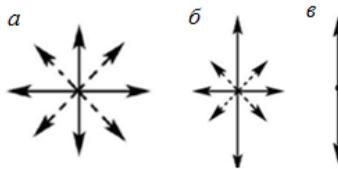
3. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

Естественный свет – свет, в котором световой вектор (вектор напряженности \vec{E} электрического поля) колеблется во всех направлениях (рис. а).

Частично поляризованный свет – свет, в котором есть преимущественное направление светового вектора (рис. б).

Поляризованный свет – свет, в котором направления колебаний светового вектора каким-либо образом упорядочены.

Плоско-поляризованный (линейно-поляризованный) свет – свет, в котором световой вектор \vec{E} колеблется только в одном направлении, перпендикулярном лучу (рис. в).



Степень поляризации:

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

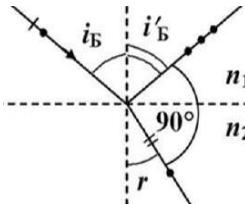
где I_{\max} и I_{\min} – максимальная и минимальная интенсивности света в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Для естественного света $I_{\max} = I_{\min}$ и $P = 0$, для плоско-поляризованного света $I_{\min} = 0$ и $P = 1$.

Закон Брюстера (поляризация света на границе двух диэлектриков): отражённый луч максимально поляризован при угле падения i_B (угол Брюстера), определяемым соотношением:

$$\operatorname{tg} i_B = n_{21} = \frac{n_2}{n_1},$$

где n_{21} – относительный показатель преломления, n_1 и n_2 – показатели преломлений сред.



Преломлённый луч поляризуется частично, при этом отражённый и преломлённый лучи взаимно перпендикулярны.

Закон Малюса (для плоско-поляризованного света):

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

где I_0 – интенсивность плоско-поляризованного света;

φ - угол между плоскостью колебаний светового вектора падающей волны и плоскостью поляризатора.

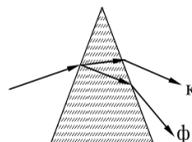
Интенсивность естественного света прошедшего поляризатор:

$$I = \frac{1}{2} I_{ест}.$$

Устройства, позволяющие получать поляризованный свет, называются *поляризаторами* (П). Для обнаружения поляризованного света применяются *анализаторы* (А).

Дисперсия – зависимость показателя преломления от частоты (длины волны) света (или зависимость фазовой скорости световых волн от его частоты).

Следствием дисперсии является разложение в спектр луча белого света при прохождении его через призму.



Для всех прозрачных веществ показатель преломления уменьшается с увеличением длины волны (уменьшении частоты). Такая дисперсия называется **нормальной**.

Если показатель преломления вещества увеличивается с увеличением длины волны (уменьшении частоты), такая дисперсия называется **аномальной**. При аномальной дисперсии групповая скорость света в веществе больше фазовой скорости.

Оптически активные вещества (кварц, сахар, киноварь, винная кислота, скипидар) способны вращать плоскость поляризации проходящего через них линейно-поляризованного света. Вращение плоскости поляризации обусловлено наличием асимметрии молекул среды или самого раствора. Явление вращения плоскости поляризации лежит в основе метода определения концентрации растворов оптически активных веществ с помощью приборов – поляриметров или сахариметров.

В кристаллах **угол поворота** плоскости поляризации:

$$\varphi = \alpha \cdot l,$$

где α – постоянная вращения;

l - расстояние, пройденное светом в оптически активном веществе.

Для оптически активных растворов:

$$\varphi = \alpha_0 Cl,$$

где α_0 – удельная постоянная вращения;
 C – концентрация вещества.

Примеры решения задач по поляризации и дисперсии света

Задача 1. Отношение максимальной интенсивности света, пропускаемого анализатором, к минимальной равно 5. Определить степень поляризации частично поляризованного света.

Дано: $\frac{I_{\max}}{I_{\min}} = 5.$

Найти: P -?

Решение:

Степень поляризации поляризованного света определяется по формуле:

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

где I_{\max} и I_{\min} – соответственно максимальная и минимальная интенсивности частично поляризованного света, пропускаемого анализатором.

Преобразуем формулу, разделив числитель и знаменатель на I_{\min} :

$$P = \frac{\frac{I_{\max}}{I_{\min}} - 1}{\frac{I_{\max}}{I_{\min}} + 1}.$$

По условию задачи отношение максимальной интенсивности света, пропускаемого анализатором, к минимальной равно 5, тогда степень поляризации света равна:

$$P = \frac{5 - 1}{5 + 1} = 0,67.$$

Ответ: 0,67.

Задача 2. Найти угол i_B полной поляризации при отражении света от стекла ($n_{\text{ст}}=1,57$), помещенного в воду ($n_{\text{в}}=1,33$). Определить скорость света в воде.

Дано: $n_{\text{ст}}=1,57, n_{\text{в}}=1,33.$

Найти: $i_B, V.$

Решение:

Согласно закону Брюстера:

$$\operatorname{tg} i_B = n_{21} = \frac{n_{cm}}{n_e}.$$

Тогда

$$i_B = \operatorname{arctg} \left(\frac{n_{cm}}{n_e} \right) = \operatorname{arctg} \left(\frac{1,57}{1,33} \right) \approx 50^\circ.$$

Абсолютный показатель преломления среды: $n = \frac{c}{V}$, где c - скорость света.

Произведем расчеты:

$$V = \frac{c}{n_e} = \frac{3 \cdot 10^8}{1,33} = 2,2 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Ответ: $50^\circ, 2,2 \cdot 10^8 \text{ м/с}$.

Задача 3. Пучок естественного света падает на полированную поверхность стеклянной пластины, погруженной в жидкость. Отраженный от пластины пучок света образует угол $\varphi = 97^\circ$ с падающим пучком. Определить показатель преломления жидкости, если отраженный свет максимально поляризован. Абсолютный показатель преломления стекла $n_{ст} = 1,5$.

Дано: $\varphi = 97^\circ, n_{ст} = 1,5$.

Найти: $n_{ж}$.

Решение:

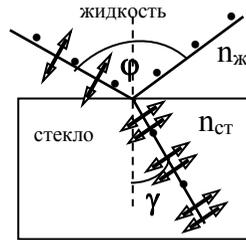
Согласно закону Брюстера, пучок света, отраженный от диэлектрика, максимально поляризован в том случае, если тангенс угла падения численно равен относительному показателю преломления, т.е. $\operatorname{tg} i_B = n_{21}$, где n_{21} - показатель преломления второй среды (стекла) относительно первой (жидкости). Относительный показатель преломления равен отношению абсолютных показателей преломления. Следовательно,

$$\operatorname{tg} i_B = n_{21} = \frac{n_{cm}}{n_{жс}}.$$

Так как угол падения равен углу отражения, то $i_B = \frac{\varphi}{2} = \frac{97^\circ}{2} = 48,5^\circ$.

Произведем расчеты: $n_{жс} = \frac{n_{cm}}{\operatorname{tg} 48,5^\circ} = \frac{1,5}{1,13} = 1,33$.

Ответ: $n_{жс} = 1,33$.



Задача 4. Два николя N_1 и N_2 расположены так, что угол между их плоскостями пропускания составляет 60° . Определить, во сколько раз уменьшится интенсивность I_0 естественного света: 1) при прохождении через один николю N_1 ; 2) при прохождении через оба николя (коэффициент поглощения света в николе $k=0,05$). Потери на отражение света не учитывать.

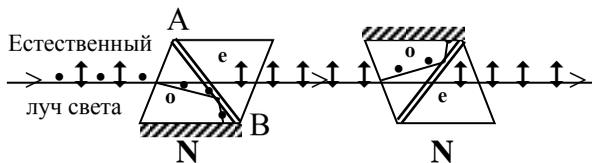
Дано: $I_0, \varphi = 60^\circ, k = 0,05$.

Найти: $\frac{I_0}{I_1}, \frac{I_0}{I_2}$.

Решение:

1. Естественный луч света, падающий на входную грань призмы Николя (см. рисунок), расщепляется в результате двойного лучепреломления на два пучка: обыкновенный и необыкновенный.

Оба пучка одинаковы по интенсивности и полностью поляризованы. Плоскость колебаний необыкновенного пучка лежит в плоскости чертежа (главного сечения). Плоскость колебаний обыкновенного пучка перпендикулярна плоскости чертежа. Обыкновенный пучок света (о) в результате полного отражения от границы АВ отбрасывается на зачерненную поверхность призмы и поглощается ею. Необыкновенный пучок (е) проходит через призму, уменьшая свою интенсивность вследствие поглощения.



Таким образом, интенсивность света, прошедшего через первую призму Николя, равна

$$I_1 = \frac{1}{2} I_0 (1 - k).$$

Относительное уменьшение интенсивности света получим, разделив интенсивность I_0 естественного света, падающего на первый николю, на интенсивность I_1 поляризованного света, вышедшего из первого николя. Произведем расчеты:

$$\frac{I_0}{I_1} = \frac{2I_0}{I_0(1-k)} = \frac{2}{(1-k)} = \frac{2}{0,95} = 2,1.$$

Таким образом, интенсивность уменьшится в 2,1 раза.

2. Плоско-поляризованный пучок света интенсивности I_1 падает на второй николю N_2 и также расщепляется на два пучка различной интенсивности: (о) и (е). Обыкновенный пучок полностью поглощается призмой, поэтому интенсивность его нас не интересует.

Интенсивность I_2 необыкновенного пучка, вышедшего из призмы N_2 , определяется законом Малюса (без учета поглощения света во втором николе):

$$I_2 = I_1 \cos^2 \varphi,$$

где φ - угол между плоскостью колебаний в поляризованном пучке I_1 и плоскостью пропускания николя N_2 .

Учитывая потери интенсивности света при поглощении во втором николе, получаем

$$I_2 = I_1(1-k) \cos^2 \varphi.$$

Искомое уменьшение интенсивности при прохождении света через оба николя найдем, разделив интенсивность I_0 естественного света на интенсивность I_2 света, прошедшего систему из двух николей:

$$\frac{I_0}{I_2} = \frac{I_0}{I_1(1-k) \cos^2 \varphi} = \frac{I_0}{\frac{1}{2} I_0 (1-k)^2 \cos^2 \varphi} = \frac{2}{(1-k)^2 \cos^2 \varphi}$$

Произведем расчеты:

$$\frac{I_0}{I_2} = \frac{2}{(1-0,05)^2 \cos^2 60^\circ} = 8,86$$

Таким образом, после прохождения света через два николя интенсивность его уменьшится в 8,86 раза.

Ответ: 2,1; 8,86.

Задача 5. Естественный свет с интенсивностью I_0 падает на вход устройства, состоящего из двух скрещенных идеальных поляроидов. Между поляроидами поместили третий идеальный поляроид, ось которого составляет с осью первого угол α . Определить отношение интенсивности света, прошедшего через эту систему, к интенсивности света падающего на систему.

Дано: I_0, α .

Найти: $\frac{I_3}{I_0}$.

Решение:

Первый поляроид пропускает только половину интенсивности падающего естественного света, без учета поглощения, так как поляризаторы идеальны. Свет становится поляризованным с интенсивностью:

$$I_1 = \frac{1}{2} I_0.$$

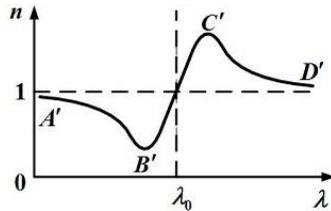
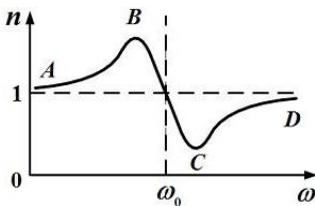
После прохождения следующего поляроида получим по закону Малюса интенсивность: $I_2 = I_1 \cos^2 \alpha = \frac{1}{2} I_0 \cos^2 \alpha$.

После прохождения светом третьего поляроида получим интенсивность: $I_3 = I_2 \cos^2 \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) = \frac{1}{2} I_1 \cos^2 \alpha \cos^2 \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) = \frac{1}{8} I_0 \sin^2 2\alpha$.

Отношение интенсивности прошедшего света к интенсивности падающего света равно: $\frac{I_3}{I_0} = \frac{1}{8} \sin^2 2\alpha$.

Ответ: $\frac{I_3}{I_0} = \frac{1}{8} \sin^2 2\alpha$.

Задача 6. График дисперсионных кривых зависимостей показателей преломления среды n от частоты ω и длины волны λ света имеют вид представленный на рисунках. Какой дисперсии (нормальной или аномальной) соответствуют участки кривых AB и $C'D'$?



Дано: $\omega(n)$, $\lambda(n)$.

Найти: AB , $C'D'$.

Решение:

Дисперсию света в среде называют нормальной, если с ростом частоты ω абсолютный показатель преломления n среды также возрастает

$\left(\frac{dn}{d\omega} > 0\right)$ или с ростом длины волны λ абсолютный показатель преломления n уменьшается $\left(\frac{dn}{d\lambda} < 0\right)$. Наоборот, если $\frac{dn}{d\omega} < 0$ и соответственно $\frac{dn}{d\lambda} > 0$, то дисперсия света в среде называется аномальной. На участках AB и $C'D'$ дисперсионных кривых показатель преломления n возрастает с ростом частоты ω $\left(\frac{dn}{d\omega} > 0\right)$, и уменьшается с ростом длины волны λ $\left(\frac{dn}{d\lambda} < 0\right)$. Следовательно, оба участка AB и $C'D'$ дисперсионных кривых соответствуют нормальной дисперсии

Ответ: AB – нормальная дисперсия; $C'D'$ – нормальная дисперсия.

Задача 7. Линейно-поляризованный свет, прошедший через поляризатор, оказывается полностью погашенным. Если же на пути света поместить кварцевую пластинку, то интенсивность прошедшего через поляризатор света уменьшается в 3 раза (по сравнению с интенсивностью света, падающего на поляризатор). Принимая удельное вращение в кварце $\alpha = 0,52$ рад/мм и пренебрегая потерями света, определить минимальную толщину кварцевой пластинки.

Дано: $\frac{I_0}{I} = 3$, $\alpha = 0,52$ рад/мм.

Найти: d .

Решение:

Так как Линейно-поляризованный свет гасится поляризатором, то это означает, что плоскость пропускания поляризатора перпендикулярна плоскости колебаний поляризованного света.

Кварц – это оптически активное вещество, и при введении кварцевой пластинки происходит поворот плоскости поляризации на угол

$$\varphi = \alpha \cdot d,$$

где d – толщина кварцевой пластинки, где α – постоянная вращения.

Это приводит к тому, что угол между плоскостью пропускания и новой плоскостью колебаний падающего на поляризатор поляризованного света станет равным $\delta = \frac{\pi}{2} - \varphi$.

Тогда, по закону Малюса:

$$I = I_0 \cos^2 \delta = I_0 \cos^2 \left(\frac{\pi}{2} - \varphi \right),$$

где I_0 -интенсивность падающего линейно-поляризованного света, а I -интенсивность прошедшего через кварцевую пластину света.

По условию задачи прошедшего через поляризатор света уменьшается в 3 раза, значит

$$\begin{aligned} \frac{I_0}{I} &= 3, \cos^2 \left(\frac{\pi}{2} - \varphi \right) = \frac{1}{3}, \\ \cos \left(\frac{\pi}{2} - \varphi \right) &= \frac{1}{\sqrt{3}}, \quad \cos \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \cdot d \right) = \frac{1}{\sqrt{3}}, \\ \frac{\pi}{2} - \alpha \cdot d &= \arccos \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \right), \quad d = \frac{\frac{\pi}{2} - \arccos \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \right)}{\alpha}. \end{aligned}$$

Произведем расчеты:

$$d = \frac{\frac{\pi}{2} - \arccos \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \right)}{0,52 \frac{\text{рад}}{\text{мм}}} = 1,18 \text{ мм.}$$

Ответ: $d = 1,18$ мм.

Тестовые задания по поляризации и дисперсии света

11. Степень поляризации. Угол Брюстера

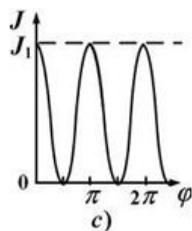
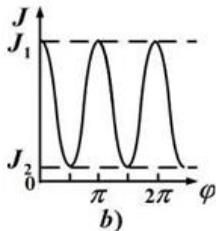
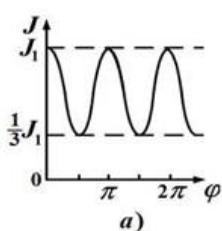
11.1. Степень поляризации частично поляризованного света равна 0,5. Во сколько раз отличается максимальная интенсивность света, пропускаемого через анализатор, от минимальной?

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

11.2. Чему равна степень поляризации плоско-поляризованного света?

- 1) 0; 2) 1; 3) 0,5; 4) ∞ .

11.3. На рисунке представлены графики зависимости интенсивности света, прошедшего через поляризатор, от угла поворота поляризатора для трех разных световых пучков. Для данных графиков верным соотношением степеней поляризации падающих на поляризатор световых волн всех трех пучков будет?



- 1) $P_a > P_b > P_c$; 2) $P_a < P_b < P_c$; 3) $P_a = P_b > P_c$; 4) $P_a = P_b = P_c$.

11.4. Естественный свет падает на поверхность стекла под углом Брюстера. Чему равна степень поляризации отраженных лучей?

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

11.5. На стеклянное зеркало под углом Брюстера падает луч естественного света. На пути отраженного луча расположена призма Николя (николь). Интенсивность отраженного луча равна I_1 . Если плоскость пропускания николя параллельна плоскости, в которой лежат падающий и отраженный лучи, то интенсивность луча прошедшего николя I_2 равна?

- 1) $I_2 = I_1$; 2) $I_2 = 0,5I_1$; 3) $I_2 = 2I_1$; 4) $I_2 = 0$.

11.6. При падении света из воздуха на диэлектрик отраженный луч полностью поляризован при угле падения 60° . Чему при этом равен угол преломления?

- 1) 30° ; 2) 45° ; 3) 60° ; 4) 90° .

11.7. На диэлектрическое зеркало под углом Брюстера падает луч естественного света. Какое утверждение справедливо?

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

11.8. Угол преломления луча в жидкости равен 30° , а отраженный луч полностью поляризован. Чему равен показатель преломления жидкости?

- 1) 1,33; 2) 1,73; 3) 0,58; 4) 1,52.

дующего поляроида образует угол 30° с плоскостью пропускания предыдущего. Каким соотношением связаны интенсивность I света на выходе из системы с интенсивностью I_0 света на входе?

- 1) $I = \left(\frac{3}{4}\right)^5 I_0$; 3) $I = \frac{1}{2} \left(\frac{3}{4}\right)^4 I_0$;
 2) $I = \frac{1}{2} \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^4 I_0$; 4) $I = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^5 I_0$.

12.5. Чему равен угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора, если интенсивность естественного света, прошедшего через поляризатор и анализатор уменьшается в 4 раза?

- 1) π ; 2) $\pi/3$; 3) $\pi/4$; 4) $\pi/2$.

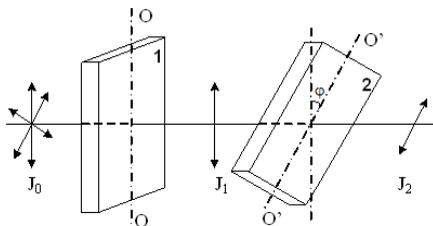
12.6. Естественный свет проходит последовательно через два совершенных поляризатора, угол между главными плоскостями которых равен 30° . Во сколько раз уменьшится интенсивность света после второго поляризатора?

- 1) 1,3 раза; 2) 2 раза; 3) 4 раза; 4) 8 раз.

12.7. Угол между плоскостями пропускания двух поляризаторов равен 45° . Если угол увеличить в 2 раза, то интенсивность света, прошедшего через оба поляризатора?

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

12.8. На пути естественного света помещены две пластинки турмалина. После прохождения пластинки 1 свет полностью поляризован. Если J_0 – интенсивность естественного света, а J_1 и J_2 – интенсивности света, прошедшего пластинки соответственно 1 и 2. Каким соотношением связаны J_2 и J_0 при угле между направлениями OO и $O'O'$, равном 30° ?



$$1) J_2 = \frac{3}{8} J_0;$$

$$3) J_2 = \frac{1}{8} J_0;$$

$$2) J_2 = \frac{1}{4} J_0;$$

$$4) J_2 = \frac{3}{4} J_0.$$

12.9. На идеальный поляризатор падает свет интенсивности $J_{\text{ест}}$ от обычного источника. Как изменяется при вращении поляризатора вокруг направления распространения луча интенсивность света за поляризатором?

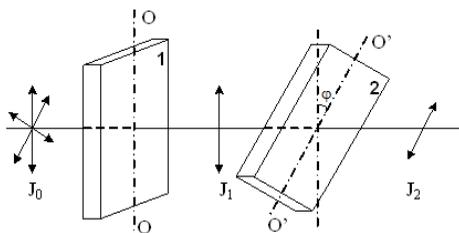
1) меняется от J_{min} до J_{max} ;

3) не меняется и равна $J_{\text{ест}}/2$;

2) меняется от $J_{\text{ест}}$ до J_{max} ;

4) не меняется и равна $J_{\text{ест}}$.

12.10. На пути естественного света помещены две пластинки турмалина. После прохождения пластинки 1 свет полностью поляризован. Если J_0 – интенсивность естественного света, а J_1 и J_2 – интенсивности света, прошедшего пластинки соответственно 1 и 2. Каким соотношением связаны J_2 и J_0 при угле между направлениями OO и $O'O'$, равном 60° ?



$$1) J_2 = \frac{3}{8} J_0;$$

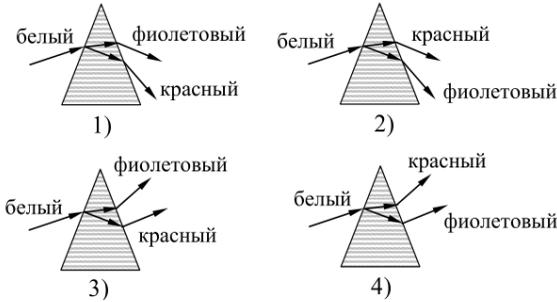
$$3) J_2 = \frac{1}{8} J_0;$$

$$2) J_2 = \frac{1}{4} J_0;$$

$$4) J_2 = \frac{3}{4} J_0.$$

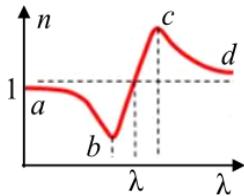
13. Дисперсия

13.1. В стеклянной призме происходит разложение белого света в спектр, обусловленное дисперсией света. На рисунках представлен ход лучей в призме. На каком рисунке правильно отражен ход лучей?



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

13.2. Кривая дисперсии в области одной из полос поглощения имеет вид, показанный на рисунке. Каким соотношением связаны фазовая v и групповая u скорости на участке bc ?



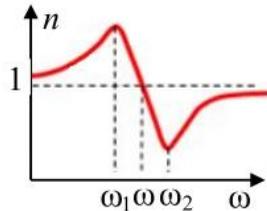
- 1) $v > u$; 2) $v < u$; 3) $v = u$; 4) $u > v > c$.

13.3. Показатель преломления воды для красного света равен 1,329, а для голубого – 1,337. Что в этом случае наблюдается при прохождении лучей в воде?

- 1) нормальная дисперсия; 3) оптическая активность;
2) аномальная дисперсия; 4) поляризация.

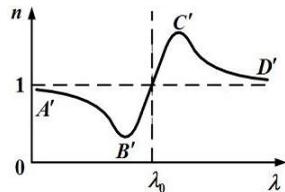
13.4. На рисунке изображена дисперсионная кривая. На каком интервале частот наблюдается нормальная дисперсия?

- 1) от ω до ω_2 ; 3) от ω_1 до ω_2 ;
2) от ω_1 до ω ; 4) от 0 до ω и от ω_2 до ∞ .



13.5. На рисунке изображена дисперсионная кривая. Какие участки дисперсионной кривой соответствуют нормальной дисперсии?

- 1) A'C'; 2) C'D'; 3) B'D'; 4) B'C'.

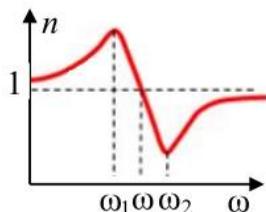


13.6. На переднюю грань прозрачной стеклянной призмы падают параллельные друг другу зеленый и красный лучи. Как будут идти эти лучи после прохождения призмы?

- 1) они останутся параллельными;
- 2) они разойдутся так, что не будут пересекаться;
- 3) они пересекутся;
- 4) ответ зависит от сорта стекла.

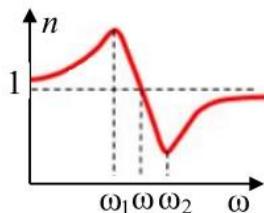
13.7. На рисунке изображена дисперсионная кривая. На каком интервале частот наблюдается аномальная дисперсия?

- 1) от ω до ω_2 ; 3) от ω_1 до ω_2 ;
- 2) от ω_1 до ω ; 4) от 0 до ω и от ω_2 до ∞ .



13.8. Для какой области частот дисперсионной кривой групповая скорость света в веществе больше фазовой скорости?

- 1) $\omega > \omega_2$; 3) $\omega_1 < \omega < \omega_2$;
- 2) $\omega < \omega_1$; 4) $\omega > \omega_2$ и $\omega < \omega_1$.



13.9. Чем обусловлено разложение белого света в спектр при прохождении через призму?

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

13.10. Световой пучок после прохождения через прозрачную призму дает на экране спектр. Укажите правильную последовательность цветов в спектре в порядке увеличения угла отклонения.

- 1) желтый, синий, зеленый; 3) синий, зеленый, желтый;
- 2) желтый, зеленый, синий 4) синий, желтый, зеленый.

14. Оптически активные вещества

14.1. Угол поворота плоскости поляризации при прохождении света в оптически активных растворах можно найти по формуле?

- 1) $\varphi = \alpha d$; 2) $\varphi = \alpha_0 c l$; 3) $\varphi = \alpha l$; 4) $\varphi = c l$.

14.2. Чему равна толщина кварцевой пластинки, для которой угол поворота плоскости поляризации света с длиной волны $\lambda = 509 \text{ нм}$ равен $\alpha = 180^\circ$, а постоянная вращения $\alpha_0 = 29,7 \text{ град/мм}$?

- 1) 1; 2) 4; 3) 6; 4) 10.

14.3. Что происходит при прохождении поляризованного света в оптически активных веществах?

- 1) вращение плоскости поляризации; 3) двойное лучепреломление;
2) изменение состояния поляризации; 4) преломление.

14.4. Раствор сахара с удельной вращения $6,67 \text{ град}\cdot\text{см}^2/\text{г}$, налитый в трубку длиной 20 см, поворачивает плоскость поляризации света ($\lambda = 0,5 \text{ мкм}$) на угол 30° . Концентрация сахара в растворе равна? ($\text{г}/\text{см}^3$)

- 1) 0,550; 2) 0,225; 3) 0,750; 4) 0,950.

14.5. Какое явление лежит в основе устройства сахариметра?

- 1) отражения; 3) двойного лучепреломления;
2) преломления; 4) вращения плоскости поляризации.

14.6. Раствор глюкозы с концентрацией $0,28 \text{ г}/\text{см}^3$, налитый в кювету сахариметра, поворачивает плоскость поляризации света на угол 32° . Концентрация глюкозы в кювете той же длины, если раствор вращает плоскость поляризации на угол 24° , будет равна? ($\text{г}/\text{см}^3$)

- 1) 0,21; 2) 0,14; 3) 0,32; 4) 0,55.

14.7. Основным свойством в оптически активных веществах является?

- 1) отражение; 3) вращение плоскости поляризации;
2) преломление; 4) двойное лучепреломление.

14.8. Пластинку из оптически активного вещества толщиной 2 мм поместили между параллельными николями, в результате чего плоскость поляризации монохроматического света повернулась на угол 30° . Чему равна минимальная толщина пластинки (в мм) при которой поле зрения поляриметра станет совершенно темным?

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

14.9. Раствор сахара с концентрацией $0,25 \text{ г/см}^3$ толщиной 20 см поворачивает плоскость поляризации монохроматического света на $30^{\circ}20'$. Другой раствор толщиной 15 см поворачивает плоскость поляризации на 20° . Чему равна концентрация сахара во втором растворе? (г/см^3)

- 1) 0,11 2) 0,22 3) 0,33 4) 0,44

14.10. Чему равна постоянная вращения (град/мм) кварцевой пластинки, толщиной 6 мм, для которой угол поворота плоскости поляризации света с длиной волны $\lambda = 509 \text{ нм}$ равен $\alpha = 180^{\circ}$, а постоянная вращения $\alpha_0 = 29,7$?

- 1) 11; 2) 29,7; 3) 3,6; 4) 40,3.

15. Расчетные задания по поляризации света

15.1. Степень поляризации частично поляризованного света составляет 0,75. Определите соотношение максимальной интенсивности света, пропускаемого анализатором, к минимальной. Ответ: 7.

15.2. Определите степень поляризации света, который представляет собой смесь естественного света с плоско-поляризованным, если интенсивность поляризованного света в 5 раз больше интенсивности естественного. Ответ: 0,83.

15.3. Под каким углом к горизонту должно находиться солнце, чтобы его лучи, отраженные от поверхности озера, были наиболее полно поляризованы? Ответ: 37° .

15.4. Найти угол полной поляризации при отражении света от стекла, показатель преломления которого $n = 1,57$. ($57,5^{\circ}$)

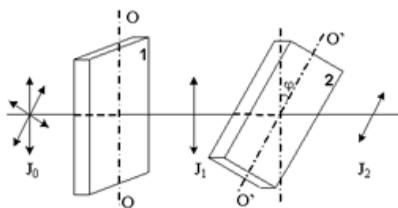
15.5. Найти показатель преломления n стекла, если при отражении от него света отраженный луч будет полностью поляризован при угле преломления равен 30° . Ответ: 1,73.

15.6. Угол Брюстера при падении света из воздуха на кристалл каменной соли равен 57° . Определите скорость света в этом кристалле. Ответ: 194 Мм/с.

15.7. Предельный угол полного внутреннего отражения для пучка света на границе кристалла каменной соли с воздухом равен $40,5^\circ$. Найдите угол Брюстера при падении света из воздуха на поверхность этого кристалла. Как меняется скорость света в веществе? Ответ: 57° ; уменьшится в 1,5 раза.

15.8. Стеклянную пластину установили так, что падающий на нее сверху в вертикальной плоскости под углом Брюстера узкий луч естественного света после отражения распространяется горизонтально. На пути отраженного луча установили поляризатор. Как нужно ориентировать этот поляризатор (плоскостью пропускания относительно вертикали), чтобы поляризатор изменил интенсивность света в 4 раза? Ответ: 30° .

15.9. На пути естественного света интенсивностью J_0 помещены две пластинки турмалина. После прохождения пластинки 1 свет полностью поляризован. Если интенсивность J_2 света, прошедшего через обе пластинки, связана с J_0 соотношением $J_2 = J_0/8$, то угол φ равен? Ответ: 60° .



15.10. Определите, во сколько раз ослабится интенсивность света, прошедшего через два поляризатора, угол между главными плоскостями которых 60° , а в каждом поляризаторе теряется 8 % интенсивности падающего на него света. Ответ: 9,45.

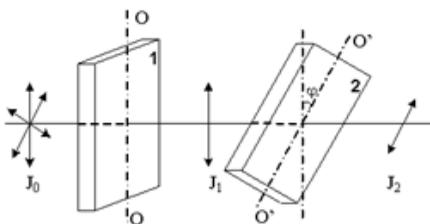
15.11. Естественный свет падает на систему из трех последовательно расположенных поляризаторов, причем плоскость пропускания среднего поляризатора составляет угол 60° с такими же плоскостями двух других поляризаторов. Каждый поляризатор обладает поглощением таким, что при падении на него поляризованного света коэффициент пропускания составляет 0,81. Во сколько раз уменьшится интенсивность света после прохождения такой системы? Ответ: 60.

15.12. Угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора составляет 30° . Определите изменение интенсивности прошедшего через них света, если угол между главными плоскостями станет равным 45° . Ответ: уменьшится в 1,5 раза.

15.13. Интенсивность естественного света, прошедшего через два николя, уменьшилась в 8 раз. Пренебрегая поглощением света, определить угол между главными плоскостями николей. Ответ: 45° .

15.14. Пучок естественного света падает на систему из $N=6$ николей, плоскость пропускания каждого из которых повернута на угол 30° относительно плоскости пропускания предыдущего николя. Какая часть светового потока проходит через эту систему? Ответ: 0,12.

15.15. На пути естественного света интенсивностью J_0 помещены две пластинки турмалина. После прохождения пластинки 1 свет полностью поляризован, если угол $\varphi = 45^\circ$, то интенсивность J_2 света, прошедшего через обе пластинки, связана с J_0 соотношением? Ответ: $J_2 = J_0/4$.



15.16. Определить, во сколько раз уменьшится интенсивность естественного света, прошедшего через два поляризатора, расположенные так, что угол между их главными плоскостями равен 45° , а в каждом из николей теряется 5 % интенсивности падающего на него света. Ответ: 4,43 раза.

15.17. Пластинку кварца толщиной 2 мм, вырезанную перпендикулярно оптической оси, поместили между параллельными николями, в результате чего плоскость поляризации света повернулась на угол 53° . Определить толщину пластинки, при которой данный монохроматический свет не проходит анализатор. Ответ: 3,4 мм.

15.18. Угол поворота плоскости поляризации желтого света натрия при прохождении через трубку с раствором сахара равен 40° . Длина трубки 15 см, удельная постоянная вращения для сахара равна $0,0117 \text{ рад} \cdot \text{м}^3 / (\text{м} \cdot \text{кг})$. Определить плотность раствора. Ответ: $0,4 \text{ г/см}^3$.

15.19. Естественный свет падает на систему из двух поляризаторов, угол между плоскостями которых составляет 20° . Потери света на поглощение в каждом поляризаторе составляют 11%. Во сколько раз изменится интенсивность света, вышедшего из второго поляризатора, если между ними поместить кварцевую пластинку толщиной 0,5 мм. Постоянная вращения кварца 40 град/мм . Считать, что пластинка поворачивает плоскость поляризации света в сторону, противоположную повороту второго поляризатора. Ответ: 1,13.

15.20. Поляризатор и анализатор установлены так, что их плоскости пропускания параллельны. На поляризатор падает естественный свет. Во сколько раз такая система ослабляет интенсивность света? Во сколько раз будет ослабляться интенсивность света, если между поляризатором и анализатором установить трубку длиной 30 см, содержащую водный раствор сахара с концентрацией 20%? Удельное вращение раствора $6,6 \text{ град/м} \cdot \%$. Поглощением света пренебречь. Ответ: 2; 3,37.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА	4
Примеры решения задач по интерференции света	8
Тестовые задания по интерференции света	13
Расчетные задачи по интерференции света	20
2. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА	24
Примеры решения задач по дифракции света	27
Тестовые задания по дифракции света	38
Расчетные задачи по дифракции света	49
3. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА	52
Примеры решения задач по поляризации и дисперсии света	54
Тестовые задания по поляризации и дисперсии света	60
Расчетные задачи по поляризации света	68

Учебное текстовое электронное издание

**Богачева Ирина Юрьевна
Лисовская Мария Александровна
Рыскужина Ирина Владимировна**

ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

Учебное пособие

Издание 2-е

1,41 Мб

1 электрон. опт. диск

г. Магнитогорск, 2019 год
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»
Адрес: 455000, Россия, Челябинская область, г. Магнитогорск,
пр. Ленина 38

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»
Кафедра физики
Центр электронных образовательных ресурсов и
дистанционных образовательных технологий
e-mail: ceor_dot@mail.ru