



## 2. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

### Содержание теоретического материала

Электромагнитная природа света. Скорость света и ее изменение. Шкала электромагнитных волн. Дисперсия света. Когерентность. Интерференция света. Дифракционная решетка.

### Контрольные вопросы

2.1. Что представляет собой световое излучение с волновой точки зрения?

2.2. Из каких трех видов состоит световое излучение?

2.3. Объясните способы измерения скорости света: методы Ремера, Майкельсона, Физо.

2.4. Каким принимают округленное значение скорости света при решении задач?

2.5. Опишите шкалу электромагнитных волн. С какими физическими процессами связано появление электромагнитных волн разной длины волны?

2.6. Как меняются свойства электромагнитных волн в зависимости от длины волны?

2.7. Как рассчитать значение скорости света в различных средах? Приведите примеры.

2.8. В чем заключается явление дисперсии света?

2.9. Что представляет собой спектр белого света?

2.10. Чем объясняется явление дисперсии света?

2.11. Как связаны между собой скорость света, длина волны и частота? Как меняются эти величины при переходе света через границу раздела двух прозрачных веществ с различной оптической плотностью?

2.12. От чего зависит цвет непрозрачных тел?

2.13. От чего зависит цвет прозрачных тел?

- 2.14. Какие волны называются когерентными?
- 2.15. Каким образом можно получить когерентные источники света?
- 2.16. В чем сущность явления интерференции?
- 2.17. Какие существуют методы создания когерентных источников и получения интерференционных картин?
- 2.18. Сформулируйте условия для существования интерференционных максимумов и минимумов.
- 2.19. Какая величина называется оптической разностью хода волн?
- 2.20. Как выглядит интерференционная картина в следующих случаях: если имеется а) источник монохроматического света, б) источник белого света?
- 2.21. Как происходит интерференция в тонких пленках (или пластинках)?
- 2.22. Как происходит интерференция в пленках или пластинках переменной толщины? Как выглядит интерференционная картина на клиновидной пластинке? Когда возникают «кольца Ньютона»?
- 2.23. Для каких целей используется интерференция света в науке и технике?
- 2.24. В чем состоит явление дифракции света и при каких условиях наблюдается дифракция?
- 2.25. Объясните природу явления дифракции.
- 2.26. Что такое дифракционная решетка? Объясните принцип ее действия?

## Ответы

2.1. Световое излучение представляет собой электромагнитные волны с длиной волны от  $5 \cdot 10^{-2}$  см до  $1 \cdot 10^{-7}$  см. Они являются совокупностью переменных электрического и магнитного полей; векторы напряженности электрического поля и индукции магнитного поля взаимно перпендикулярны и перпендикулярны вектору скорости волны (т.е. световая волна является поперечной). Излучение световых волн веществом происходит благодаря внутриатомным и внутримолекулярным процессам.

**2.2.** В область световых волн входят три вида излучения: инфракрасное (длина волны от  $5 \cdot 10^{-2}$  до  $8 \cdot 10^{-5}$  см), видимый свет (длина волны от  $8 \cdot 10^{-5}$  до  $4 \cdot 10^{-5}$  см) и ультрафиолетовое (от  $4 \cdot 10^{-5}$  до  $10^{-7}$  см). Указанные границы условны. Инфракрасное излучение можно назвать тепловым, так как оно вызывает у живых организмов ощущение тепла, проникая в тело неглубоко — на 20–30 мм. Видимый свет воздействует на сетчатку глаза и вызывает зрительные ощущения.

Ультрафиолетовое излучение оказывает биохимическое действие на живые организмы. В частности, оно способствует образованию фотохимическим путем витамина D, который обладает противорахитичным и иммуностимулирующим действием. Малые дозы ультрафиолетового излучения используют для лечения кожных заболеваний и воспалительных процессов слизистых тканей. Бактерицидное действие ультрафиолета применяют для предотвращения распространения заразных болезней (стерилизация помещений и лечебных материалов). Ультрафиолетовое излучение большой интенсивности при длительном воздействии повреждает живые ткани, вызывает ожоги и может привести к необратимым патологическим изменениям.

Во всех случаях источником светового излучения являются нагретые тела. Инфракрасное излучение дают твердые и жидкие тела при температурах выше температуры окружающей среды. В зависимости от температуры тела изменяются интенсивность излучения и его частотный состав (спектр). При достаточно низких температурах (ниже  $50^\circ \text{C}$ ) излучение тел практически только инфракрасное. При повышении температуры помимо инфракрасного излучения появляется видимый свет. Интенсивность обоих видов излучения возрастает. При температурах выше  $\approx 2700^\circ \text{C}$  появляется ультрафиолетовое излучение. Кроме того, ультрафиолетовым является излучение газов и паров металлов в электрическом разряде. Такое излучение уже не является тепловым.

При излучении источник света теряет часть своей энергии и, наоборот, при поглощении света внутренняя энергия тел возрастает — световые волны переносят энергию.

**2.3.** Впервые значение скорости света было определено в 1676 г. датским астрономом Ремером. Он наблюдал затмения одного из спутников Юпитера. Время между двумя ближайшими затмениями равно половине земного года. Наблюдение двух-трех затмений позволяет точно вычислить время наступления всех последующих затмений и их продолжительность (рис. VIII.72).

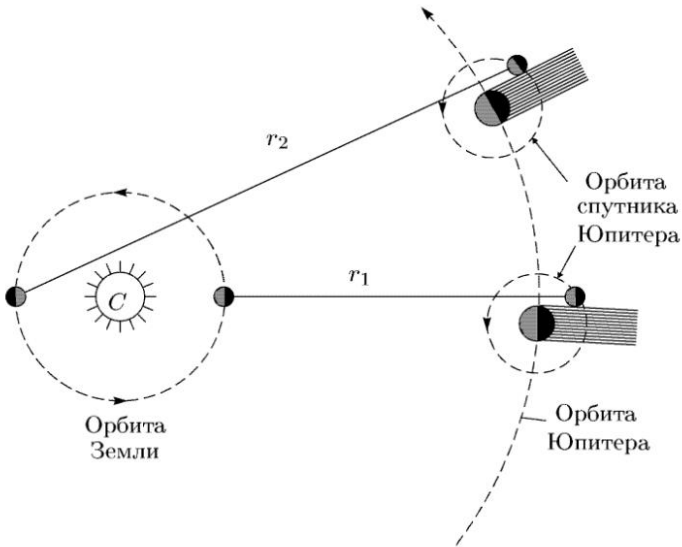


Рис. VIII.72

Первые измерения были проведены тогда, когда Земля подошла к Юпитеру максимально близко (на расстояние  $r_1$ ). Измерения, произведенные примерно через полгода, т.е. на противоположной стороне орбиты Земли, показали, что спутник Юпитера появляется после его затмения на 22 минуты позже расчетного времени. Это Ремер объяснил тем, что Земля оказалась при втором измерении в точке на противоположной стороне орбиты на расстоянии  $r_2$ , которое отличается от  $r_1$  на величину диаметра орбиты Земли. Таким образом, расстояние, равное диаметру орбиты Земли, свет от спутника Юпитера проходит за 22 минуты. При расчете скорость света оказалась очень большой величиной, равной примерно 300000 км/с.

Для определения скорости света на Земле необходимо преодолеть следующие трудности: точное измерение малых промежутков времени и больших расстояний. Впервые скорость света в земных условиях измерил в 1849 году французский физик Физо. Суть его метода в следующем (рис. VIII.73).

Свет от источника  $S$ , отразившись от зеркала  $Z_1$ , проходит между зубцами вращающегося колеса  $K$ , и через систему линз падает на находящееся на большом расстоянии ( $l = 8,6$  км) зеркало  $Z_2$ . После отражения от второго зеркала свет возвращается к наблюдателю по тому же пути. При небольшой скорости вращения колеса свет виден все время, так как успевает пройти путь к

зеркалу  $Z_2$  и обратно за время, меньшее, чем время, за которое на место прорези в колесе встанет зубец и закроет доступ света к наблюдателю.

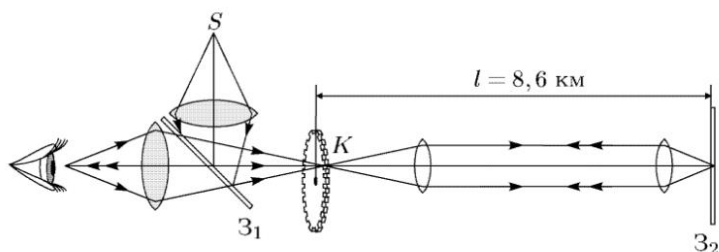


Рис. VIII.73

При увеличении скорости вращения свет сначала пропадает, а затем при возрастании скорости вращения свет появится вновь. Значит, на место зубца встала следующая прорезь.

Время распространения света от наблюдателя до зеркала  $Z_2$  и обратно равно  $t = 2l/c$ ,  $c$  — скорость света; время поворота колеса на угол  $\varphi$ , определяющий ширину зубца при известной угловой скорости вращения колеса  $\omega$ , равно

$$t = \varphi/\omega.$$

Так как по условию эксперимента это одно и то же время, то можно записать:

$$2l/c = \varphi/\omega; \quad c = 2l\omega/\varphi.$$

Угол  $\varphi = 2\pi/2n = \pi/n$ ,  $n$  — число зубцов (предполагается, что ширина зубца и прорези одинаковые),  $\omega = 2\pi\nu$  — угловая частота вращения. С учетом этого получим, что

$$c = 4l\nu n.$$

По результатам опыта Физо было получено значение скорости света  $c \approx 310000$  км/с.

Более точные результаты получены при проведении американским физиком Майкельсоном в 1926 г. опытов по определению скорости света с помощью вращающейся зеркальной восьмигранной призмы (рис. VIII.74).

Источник света, призма и наблюдатель находятся на вершине горы. Отразившись от зеркальной грани призмы, свет проходит расстояние 35,426 км до вершины другой горы, где установлена система отражающих зеркал. После отражения от другой грани зеркальной призмы свет попадает в зрительную трубу и наблюдатель его видит только при таком расположении призмы, как

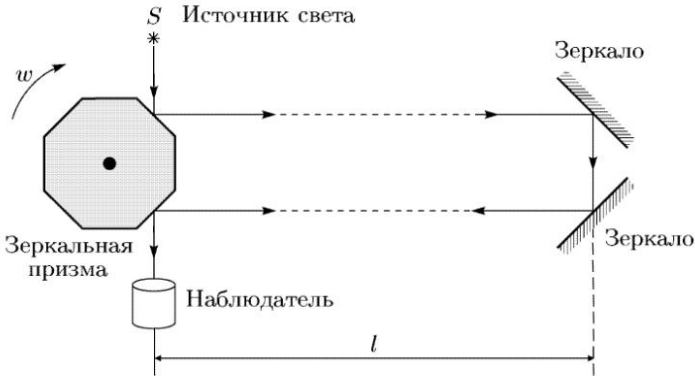


Рис. VIII.74

изображено на рис. VIII.74. Если же призма немного повернется, то свет, отраженный от нее, не попадает на отражающие зеркала, и его не увидит наблюдатель. При увеличении скорости вращения призмы можно найти такую скорость, при которой наблюдатель все время видит свет. Это будет в случае, если за время прохождения света от одной горы до другой и обратно призма совершит  $1/8$  оборота.

Аналогично тому, как это было сделано при рассмотрении опыта Физо, в данном случае можно получить формулу, связывающую скорость света и частоту вращения призмы. Время прохождения света от призмы к зеркалам и обратно  $t = 2l/c$ ,  $c$  — скорость света. С другой стороны, за это же время  $t$  призма повернется на угол  $\varphi = 2\pi/8 = \pi/4$ , поэтому угловая скорость  $\omega = \varphi/t = \pi/(4t)$ . Отсюда  $t = \pi/(4\omega)$ . Так как время распространения света и поворота призмы по условию опыта одно и то же, можно записать:

$$2l/c = \pi/(4\omega);$$

откуда  $c = 8l\omega/\pi$  или  $c = 16l\nu$ , где  $\nu$  — частота вращения призмы ( $\omega = 2\pi\nu$ ).

По результатам опыта Майкельсона определена скорость света:

$$c = (299796 \pm 4) \text{ км/с.}$$

**2.4.** При решении задач можно пользоваться округленным значением скорости света, равным  $3 \cdot 10^8$  м/с.

**2.5.** Шкала электромагнитных волн представлена в табл. 2. Она охватывает диапазон длин волн от  $3 \cdot 10^3$  см (возникающих

при прохождении переменных токов в проводниках) до  $10^{-11}$  см (образующихся при ядерных процессах). Отдельные участки спектра частично перекрываются (границы обозначены условно).

Таблица 2

Диапазоны (в вакууме)		Длина волны $\lambda$ , см	Частота $\nu$ , Гц	Источники колебаний
Радиоволны		$3 \cdot 10^3 -$ $- 5 \cdot 10^{-3}$	$10^7 -$ $- 6 \cdot 10^{12}$	Переменные токи в проводниках и электронных потоках
Световые волны	Инфракрасные	$5 \cdot 10^{-2} -$ $- 8 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{11} -$ $- 3,75 \cdot 10^{14}$	Излучение быстрых заряженных частиц.
	Видимый свет	$8 \cdot 10^{-5} -$ $- 4 \cdot 10^{-5}$	$3,75 \cdot 10^{14} -$ $- 7,5 \cdot 10^{14}$	Атомные процессы, возбуждаемые тепловыми и электрическими воздействиями
	Ультрафиолетовые	$4 \cdot 10^{-5} -$ $- 10^{-7}$	$7,5 \cdot 10^{14} -$ $- 3 \cdot 10^{17}$	
Рентгеновские лучи		$2 \cdot 10^{-7} -$ $- 10^{-8}$	$1,5 \cdot 10^{17} -$ $- 3 \cdot 10^{18}$	Атомные процессы при воздействии электронов и ядерных частиц
$\gamma$ -излучение		$10^{-8} -$ $- 10^{-11}$	$3 \cdot 10^{18} -$ $- 3 \cdot 10^{21}$	Ядерные процессы

**2.6.** Электромагнитные волны обладают некоторыми общими для любого волнового процесса свойствами: отражаются, преломляются, частично поглощаются атомами вещества. Ниже рассмотрим общие для всех волн явления — дифракцию и интерференцию. Все электромагнитные волны поперечные. При уменьшении длины волны появляются и усиливаются следующие свойства волн: чем короче длина волны, тем большее биологическое действие они оказывают. Так, радиоволны и инфракрасные лучи бактерицидными свойствами не обладают, световые волны поражают уже многие виды бактерий, у ультрафиолетовых лучей это свойство выражено отчетливо, рентгеновские лучи губительно действуют не только на бактерии, но и на живые клетки животных и человека. Также с уменьшением длины волны увеличивается проникающая способность излучения.

**2.7.** Абсолютный показатель преломления вещества равен отношению скорости света в вакууме  $c$  к скорости света в данном веществе  $v$ :

$$n = c/v.$$

Отсюда, зная абсолютный показатель преломления вещества, можно найти скорость света в веществе. Например, для воды  $n = 1,33$ ; скорость света в воде

$$v = 3 \cdot 10^8 / 1,33 \simeq 2,26 \cdot 10^8 \text{ (м/с)}.$$

Таким образом, скорость света в любом веществе меньше, чем в воздухе: она обратно пропорциональна показателю преломления вещества:  $v = c/n$ ; в оптически более плотной среде скорость света меньше.

**2.8.** Зависимость показателя преломления вещества от частоты (длины волны) света называют дисперсией показателя преломления вещества (или дисперсией света).

**2.9.** Если тонкий луч белого света направлять на боковую грань треугольной призмы (рис. VIII.75), то после прохождения призмы на экране возникнет ряд цветных полос в известной последовательности: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый. Причем смена цвета происходит непрерывно и содержит множество полутонов.

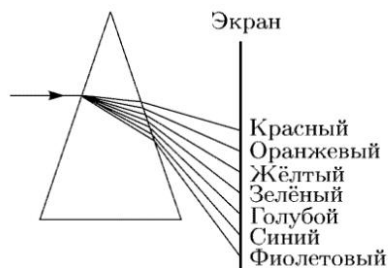


Рис. VIII.75

Следовательно, белый свет является сложным: он состоит из совокупности однородных цветных лучей (монохроматических), называемой спектром.

**2.10.** Рассматривая спектр белого света (рис. VIII.75), видим, что цветные пучки света преломляются неодинаково: наименьшее отклонение у красного цвета, наибольшее — у фиолетового. Следовательно, показатель преломления вещества, из которого изготовлена призма, различен для пучков различного цвета. В частности, если показатель преломления для красного света  $n_k$ , а для фиолетового —  $n_\phi$ , то  $n_\phi > n_k$ , можно записать, что  $c/v_\phi > c/v_k$  или  $v_k > v_\phi$ . Таким образом, красный свет распространяется внутри вещества с большей скоростью, чем фиолетовый. Скорости распространения световых волн всех других цветов лежат в промежутке от  $v_\phi$  до  $v_k$ . Следовательно,



дисперсия света определяется тем, что скорость света в одном и том же веществе неодинакова для разных длин волн.

**2.11.**  $v = \lambda\nu$ ,  $\lambda$  — длина волны,  $\nu$  — частота. При переходе света из одной среды в другую меняются скорость света и длина волны, а частота остается неизменной. Цвет лучей света, воспринимаемых глазом, зависит только от частоты колебаний световой волны, независимо от того, в каком бесцветном прозрачном веществе распространяется свет.

**2.12.** Белый свет, падающий на поверхность непрозрачного тела, частично поглощается, частично отражается. Если тело поглощает весь падающий свет, то видим его, как черное. Если поглощается часть составляющих белый свет волн, то отраженные лучи определяют цвет тела. Например, если поглощаются все лучи, кроме зеленых, то цвет тела — зеленый и т.п. В случае, если отражаются волны разной длины волны, то цвет тела зависит не только от цвета составляющих лучей, но и от того, в какой пропорции они отражаются. Этим определяется множество оттенков одинаковых цветов.

**2.13.** При прохождении в прозрачных телах часть падающего света поглощается, а часть проходит через них. Цвет прозрачного тела определяется теми лучами, которые проходят сквозь него. Так, красное стекло или пленка пропускает практически только красные лучи, синее стекло — только синие лучи и т.д. Прозрачные пластинки, применяемые для получения однородного по цвету света, называются светофильтрами.

**2.14.** Когерентными называются волны, частоты которых одинаковы и колебания происходят в одной плоскости. При этих условиях разность их фаз постоянна во времени.

**2.15.** Создание независимых источников когерентных волн, строго говоря, невозможно. Это объясняется тем, что в каждом источнике световые волны излучают множество атомов, у которых фаза излученных колебаний быстро и беспорядочно меняется. Когерентные световые волны получают следующим образом: излучение одного источника тем или иным способом делят на два отдельных пучка, которые идут по разным направлениям.

**2.16.** Явление интерференции состоит в наложении двух или нескольких когерентных волн, при котором амплитуды результирующих колебаний меняются от точки к точке: от значения амплитуды, равной или почти равной нулю, до значения, большего, чем амплитуда одиночного волнового процесса.

**2.17.** Как уже отмечалось выше, чтобы получить когерентные световые волны, надо разделить излучение от одного источника на две части. Чтобы произошла интерференция, следует соединить эти части излучения вместе. Рассмотрим некоторые способы получения когерентных волн.

1. Опыт Юнга. Свет от ярко освещенной щели  $S$  (рис. VIII.76)

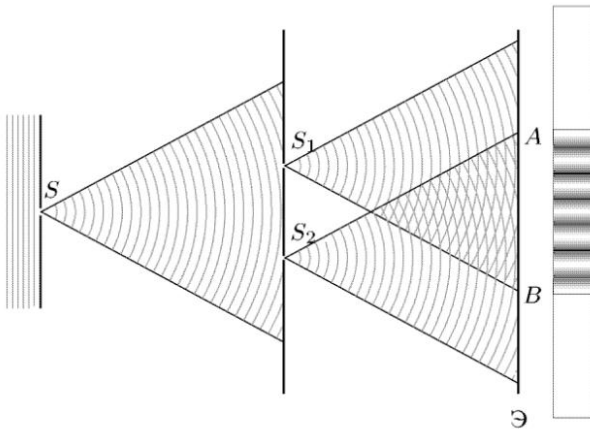


Рис. VIII.76

падает расходящимся пучком на две узкие щели  $S_1$  и  $S_2$ , которые становятся когерентными источниками света. Лучи от этих источников, достигая экрана  $\mathcal{E}$ , накладываются друг на друга и в промежутке  $AB$  возникает интерференционная картина: чередование светлых и черных полос, причем яркость светлых полос сильнее, чем за пределами области  $AB$ . В центре экрана всегда получается светлая полоса. Таким образом, в одних местах экрана световые волны при наложении усиливают друг друга, а в других местах наоборот, гасят друг друга.

2. Свет от источника  $S$  (рис. VIII.77) направлен к двум зеркалам  $MO$  и  $ON$ , плоскость которых образует двугранный угол, немного меньший  $180^\circ$  (зеркала Френеля). Зеркала дают два отраженных когерентных потока, которые накладываются друг на друга и интерферируют. Результат интерференции наблюдается на экране  $\mathcal{E}$  — чередование светлых и темных полос в области  $AB$ . Интерференционная картина получается такой же, какой была бы в результате наложения световых потоков от когерентных источников  $S_1$  и  $S_2$ , которые являются мнимыми изображениями в зеркалах одного источника света  $S$ .

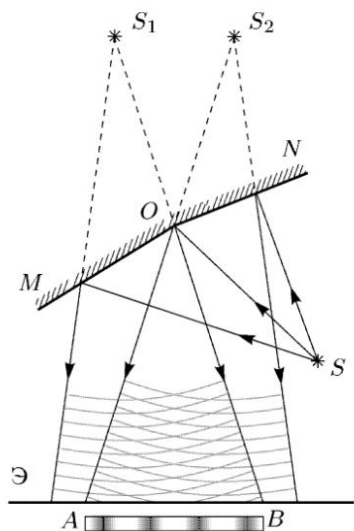


Рис. VIII.77

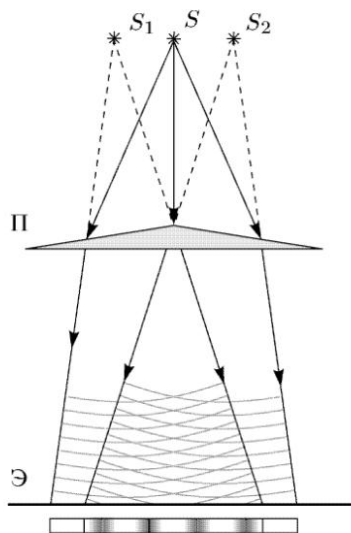


Рис. VIII.78

3. Аналогично предыдущему случаю, два мнимых когерентных источника  $S_1$  и  $S_2$  можно получить с помощью так называемой бипризмы Френеля (рис. VIII.78).

Бипризмой называют изготовленные из одного куска стекла две призмы с равными малыми преломляющими углами, имеющими общее основание. Лучи от источника  $S$  после преломления в бипризме создают два когерентных потока световых волн, которые при наложении интерферируют.

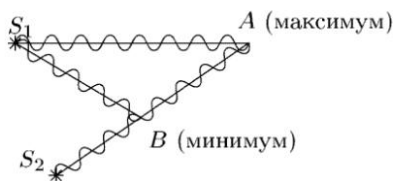


Рис. VIII.79

распространяются по всем направлениям. Если в некоторой точке  $A$  складываются колебания в одинаковых фазах, то, следовательно, сдвиг по фазе между ними

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = 2k\pi \quad (a)$$

( $k = 0, 1, 2, \dots$ ). В этом случае происходит усиление колебаний, образуется максимум. При интерференции в этом месте будет

**2.18.** Результат наложения волн зависит от того, в каких фазах волны приходят в ту или иную точку (или, точнее, какова разность фаз). Допустим, два источника когерентных волн находятся в точках  $S_1$  и  $S_2$  (рис. VIII.79). Колебания

светлая точка. Если же в некоторой точке  $B$  сдвиг по фазе

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = (2k + 1)\pi, \quad (6)$$

то колебания в эту точку приходят в противофазе и происходит ослабление колебаний. При интерференции света в этом месте будет минимум световой интенсивности (в случае равенства амплитуд составляющих колебаний будет полное затемнение).

Рассмотрим общий случай сложения в пространстве колебаний независимо от природы волнового процесса. На рис. VIII.80 изображены два источника когерентных колебаний  $S_1$  и  $S_2$ .

Они создают гармонические колебания, меняющиеся по

закону  $x_1 = x_2 = A \cos \omega t$  (для простоты возьмем амплитуды  $A$  обоих колебаний одинаковыми). Точка  $O$  находится на расстоянии  $r_1$  от источника  $S_1$  и на расстоянии  $r_2$  от  $S_2$ .

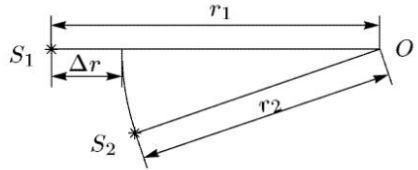


Рис. VIII.80

Волна имеет конечную скорость распространения  $v$ , и поэтому колебания в точку  $O$  приходят с запаздыванием на время  $\Delta t_1 = r_1/v$  из точки  $S_1$  и на время  $\Delta t_2 = r_2/v$  из точки  $S_2$ . Так как скорость волны связана с длиной волны и частотой формулой  $v = \lambda\nu$ , то можно записать закон колебаний в точке  $O$  от источников  $S_1$  и  $S_2$  в виде

$$x_1 = A \cos[\omega(t - \Delta t_1)] = A \cos[\omega(t - r_1/(\lambda\nu))],$$

$$x_2 = A \cos[\omega(t - \Delta t_2)] = A \cos[\omega(t - r_2/(\lambda\nu))].$$

Фазы обоих колебаний определяются аргументом косинуса:

$$\varphi_1 = \omega(t - r_1/(\lambda\nu)), \quad \varphi_2 = \omega(t - r_2/(\lambda\nu)).$$

Сдвиг по фазе колебаний в точке  $O$  от источников  $S_1$  и  $S_2$  равен

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \omega(r_1 - r_2)/(\lambda\nu) = \omega\Delta r/(\lambda\nu),$$

$\Delta r$  называется геометрической разностью хода волн. Так как  $\omega = 2\pi\nu$ , то

$$\Delta\varphi = 2\pi\Delta r/\lambda.$$

Совместим условия (а) для максимальных колебаний и (б) для минимальных колебаний с последним выражением для  $\Delta\varphi$ . Для интерференционного максимума

$$2k\pi = 2\pi\Delta r/\lambda.$$

Отсюда получим, что

$$\Delta r = k\lambda = (2k)\lambda/2, \quad (k = 0, 1, 2, \dots).$$

Это означает, что если разность хода двух когерентных волн в некоторой точке пространства окажется равной четному числу полуволен (или целому числу длин волн), то в этой точке образуется интерференционный максимум.

Аналогично получим условия минимума:

$$(2k + 1)\pi = 2\pi\Delta r/\lambda,$$

$$\Delta r = (2k + 1)\lambda/2.$$

Последнее означает, что если геометрическая разность хода двух когерентных волн в некоторой точке пространства равна нечетному числу полуволен, то в этой точке образуется интерференционный минимум.

**2.19.** Если свет проходит в среде с показателем преломления  $n$ , то используют понятие оптической разности хода лучей. Она равна геометрической разности хода (выше обозначенной  $\Delta r$ ), умноженной на показатель преломления среды  $n$ . Этим учитывается изменение скорости света (или длины волны) в веществе:

$$\delta = n\Delta r.$$

**2.20.** Если источник  $S$  на рис. VIII.76–78 посылает монохроматический свет, то на экране получаются одноцветные светлые полосы, расположенные на одинаковом расстоянии одна от другой и разделенные темными полосами. Самая светлая полоса — центральная.

Если же источник дает белый свет, то вместо одноцветных полос получают спектры, разделенные темными промежутками. Это объясняется тем, что разность хода, при которой интерферирующие волны усиливаются, различна для волн разной длины. Лишь центральный максимум будет белым, так как здесь происходит наложение светлых полос всех цветов, которые и дают белый свет.

**2.21.** Интерференция света происходит при наложении световых волн от одного и того же источника, отраженных от двух поверхностей тонкой прозрачной пленки или пластинки (рис. VIII.81).

Пусть в каждую точку поверхности  $MN$  тонкой пластинки падает под некоторым углом  $\alpha$  пучок параллельных монохроматических лучей. Рассмотрим два из них. Луч  $I$  в точке падения частично отражается по направлению  $AE$ , частично преломля-

ется, проходя внутрь пластинки (луч  $AB$ ). Далее он на границе раздела  $KL$  частично отражается по направлению  $BC$  и частично преломляется, выходя за пределы вещества пластинки. Луч  $BC$  преломляется в точке  $C$  (луч  $I'$ ) и выходит по направлению  $CF$  в первую среду. В точку  $C$  также падает луч 2, который (также как и луч 1), частично преломляется в пластинку (луч  $CD$ ), частично отражается (луч  $2'$ ). Нетрудно показать, что лучи  $I'$  и  $2'$  параллельны. В точке  $C$  происходит наложение этих лучей и их интерференция.

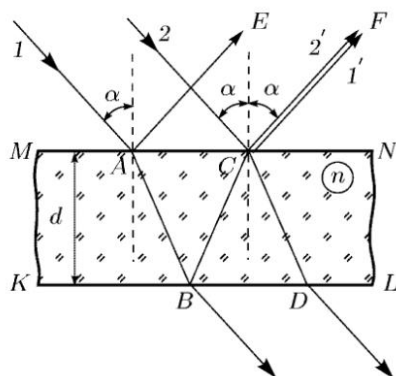


Рис. VIII.81

Результат интерференции зависит от разности хода лучей 1 и 2: до наложения луч 1 проходит в веществе с показателем преломления  $n$  больший путь, чем луч 2. Ниже в «Методике решения задач» будет показано, как разность хода зависит от угла падения лучей на пластинку  $\alpha$ , показателя преломления вещества пластинки  $n$  и ее толщины  $d$ .

Если пластинка (или пленка) освещена монохроматическим светом, причем углы падения лучей разные, то каждому углу падения  $\alpha$  будет соответствовать своя разность хода (т.е. лучи, имеющие один и тот же наклон к пластинке дадут одну и ту же разность хода). Таким образом, интерференционные максимумы и минимумы будут располагаться по направлениям, соответствующим одинаковому наклону лучей. Для наблюдения интерференционной картины на экране надо с помощью собирающей линзы соединить параллельные лучи, соответствующие одному наклону. На экране получится совокупность светлых и темных полос, называемых линиями равного наклона.

Если же пластинка освещена белым светом, то условие максимума будет выполняться для разных монохроматических составляющих при разных углах наклона. При изменении угла зрения цвет пластинки будет меняться.

Рассмотренный случай представляет собой интерференцию отраженных от пластинки (или пленки) световых волн. Для преломленных лучей также происходит интерференция, хотя яркость картины меньше в результате поглощения света внутри пластинки и двукратного отражения от ее поверхностей.

Очень хорошо видна интерференция на тонкой пленке мыльных пузырей и пленках бензина, керосина, разлитых на поверхности воды.

**2.22.** Как следует из рассмотрения вопроса о тонких пластинках, разность хода отраженных лучей зависит от толщины пластинки. Каждому значению толщины соответствует свое условие интерференционных максимумов и минимумов, и пластинка с переменной толщиной будет пересечена светлыми и темными линиями, которые называются линиями равной толщины. Например, если имеется клиновидная пластинка (рис. VIII.82), то оптическая разность хода лучей, отраженных от поверхности пластинки и лучей, прошедших внутрь пластинки и отраженных затем от ее основания, возрастает с увеличением толщины пластинки. В этом случае наблюдается система параллельных линий.



Рис. VIII.82

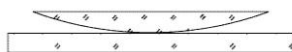


Рис. VIII.83

Линии равной толщины наблюдаются в случае, если на хорошо отполированную плоскопараллельную пластинку из стекла положить выпуклую линзу (рис. VIII.83). Вблизи области соприкосновения выпуклой поверхности с плоскостью происходит интерференция лучей, отраженных от верхней и нижней границ тонкого воздушного зазора, ширина которого увеличивается от точки соприкосновения к краям. При этом наблюдается совокупность концентрических светлых и темных колец (так называемых колец Ньютона).

**2.23.** При незначительных изменениях разности хода лучей возникают значительные изменения в расположении интерференционных полос. Благодаря этому интерференция применяется для особо точных измерений, которые производятся с помощью специальных приборов — интерферометров. По характеру ис-

кривления интерференционных полос можно судить о дефектах поверхностей, к качеству которых предъявляются высокие требования (например, зеркал, многих оптических инструментов и оптических приборов).

Интерференционные методы применяют для определения с высокой точностью коэффициентов линейного и объемного расширения, показателей преломления газов и паров. Основанные на этом принципе приборы применяют для контроля за составом воздуха в шахтах, производственных помещениях. Этот же метод используют в медицине для исследования изменений в составе крови при некоторых труднораспознаваемых заболеваниях.

Интерференционные микроскопы используют в медицине для измерения показателей преломления, концентрации сухого вещества и толщины прозрачных микрообъектов.

На интерференции света основан способ получения объемного изображения предметов — голография. В частности, в медицине используется голографический гастроскоп.

Интерферометрические наблюдения используются в астрономии, в частности, для оценки малых угловых расстояний между двойными звездами, для определения углового диаметра звезд. Эта же методика позволяет оценивать размеры субмикроскопических частиц, которые нельзя различить в оптический микроскоп.

Интерференционные методы позволяют с большой точностью определять длину волны, а также служить для очень тонких спектроскопических исследований.

Широко применяется явление интерференции света в тонких пленках для так называемой просветленной оптики. В сложных оптических системах происходит большая потеря света в результате отражения от поверхности линз. Чтобы этого не происходило, линзы покрываются тонкой пленкой. Толщина и показатель преломления вещества пленки подбираются так, чтобы интерференция лучей, отражённых от передней и задней ее поверхностей, приводила к их взаимному «гашению» и, следовательно, к усилению проходящего света.

**2.24.** В геометрической оптике основным положением является принцип прямолинейности распространения света. Это объясняет образование теней за препятствиями.

Однако при распространении света в среде с резкими неоднородностями (например, вблизи границ непрозрачных тел или при прохождении сквозь малые отверстия) наблюдаются отклонения от прямолинейности распространения: световая волна проникает



в область геометрической тени. Явление отклонения от прямолинейного распространения света в среде с резкими неоднородностями называется дифракцией. Дифракция наблюдается в случаях, когда размеры неоднородностей сравнимы с длиной волны.

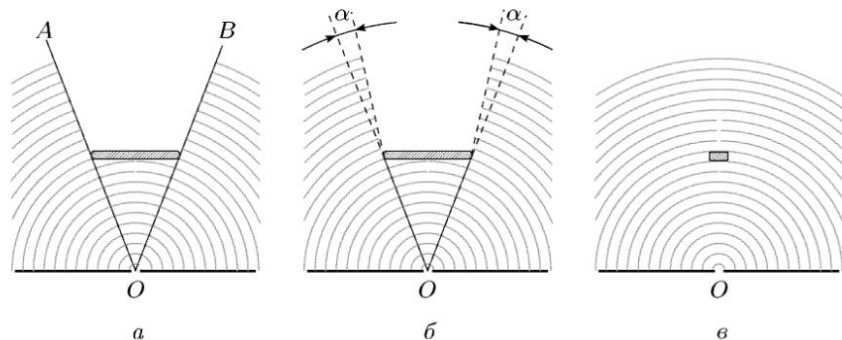


Рис. VIII.84

Например, если на пути волны (сферической или плоской) поместить достаточно широкое препятствие, то сзади него образуется тень, куда не проникает свет (рис. VIII.84 *a*). Края тени ограничены лучами *OA* и *OB*, проведенными от точечного источника колебаний к краям препятствия. Если уменьшить размеры препятствия, то волна начинает огибать его края и заходить в область тени на некоторый угол  $\alpha$  (рис. VIII.84 *б*). Величина этого угла увеличивается при уменьшении ширины препятствия. Когда размеры преграды станут близки к длине волны, то тень исчезнет и волны, огибая препятствие, будут замыкаться за ним (рис. VIII.84 *в*).

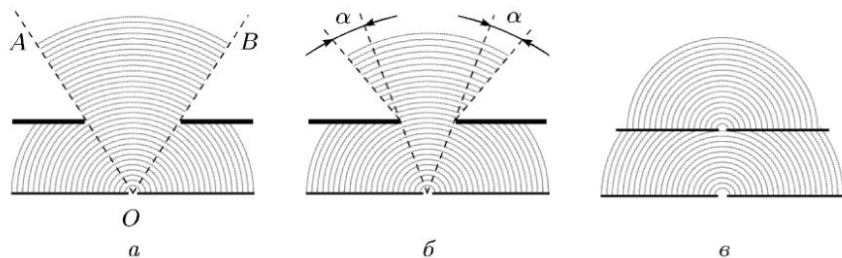


Рис. VIII.85

Подобное явление происходит, если на пути волны поставить экран с щелью. Если щель достаточно широка, то часть волны проходит через нее в область, ограниченную краями щели (в

пределах угла  $AOB$ ) (рис. VIII.85 *a*). При уменьшении размеров щели волна начинает огибать ее края тем заметнее, чем уже щель (рис. VIII.85 *б*). Если ширина щели станет сравнима с длиной волны, за ней будет распространяться волна, хотя и более слабая, чем основная (рис. VIII.85 *в*).

**2.25.** Для того, чтобы понять, почему происходит дифракция, надо использовать принцип Гюйгенса: каждая точка, до которой доходит световая волна, является в свою очередь центром вторичных волн; поверхность, огибающая в некоторый момент времени эти вторичные волны, определяет положение к тому моменту фронта распространяющейся волны.

Так как все вторичные волны возбуждаются одним источником света, то они являются когерентными. В соответствии с этим принцип Гюйгенса был дополнен в начале XIX века французским ученым Френелем. Он показал, что волновой фронт в данный момент времени является не только поверхностью, огибающей вторичные волны, но и представляет собой результат интерференции этих вторичных волн (принцип Гюйгенса – Френеля).

Результат интерференции вторичных волн приводит к тому, что при пропускании монохроматического света через прокол в непрозрачном экране, на другом экране, расположенном за отверстие, получится освещенный круг, окруженный чередующимися темными и светлыми кольцами. Если же в первом экране сделана узкая прорезь, то на втором будет чередование светлых и темных полос. Если же на пути монохроматического света перед экраном расположить тонкую проволоку, то на экране получится темная полоса, по бокам которой расположены чередующиеся более узкие светлые и темные полосы.

Если же в этих опытах использовать белый свет, то каждая полоса окажется окрашенной в цвета спектра.

**2.26.** Если свет проходит через одиночную узкую щель, то она пропускает мало света и создаваемая ею дифракционная картина недостаточно четкая и имеет слабую интенсивность.

Если же свет будет проходить чрез несколько таких узких параллельных щелей, то прошедшие через них световые пучки будут усиливать друг друга и картина станет более резкой и яркой. Для этого используются так называемые дифракционные решетки. Они представляют собой совокупность правильно чередующихся прозрачных и непрозрачных полос, поперечные размеры которых сравнимы с длиной волны (рис. VIII.86). Общее число источников, наносимых на 1 мм по длине поверхности,

составляет от 500 и более. Пусть ширина каждой щели  $a$ , ширина непрозрачной части —  $b$ . Расстояние  $d = a + b$  называется периодом или постоянной дифракционной решетки.

Направим на дифракционную решетку пучок перпендикулярно падающих монохроматических лучей от одного источника (рис. VIII.87). В соответствии с принципом Гюйгенса вторичные волны в каждой точке щелей распространяются по всем направлениям. Эти волны когерентны, так как они исходят от одного источника и, накладываясь друг на друга, интерферируют.

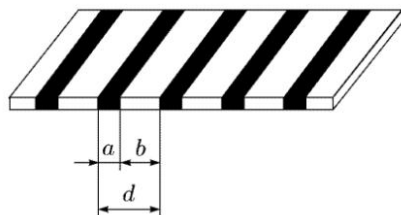


Рис. VIII.86

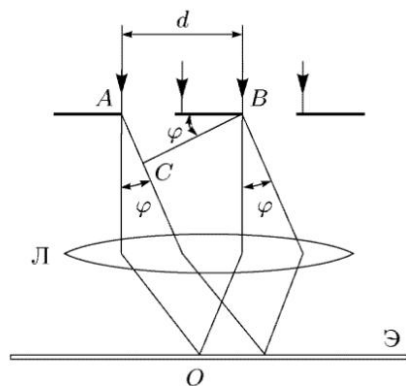


Рис. VIII.87

За дифракционной решеткой помещают собирающую линзу  $Л$ , в фокальной плоскости которой расположен экран  $Э$ . Лучи, падающие на линзу параллельно, фокусируются на экране в точку.

В центре экрана (точка  $O$ ) собираются лучи, падающие на дифракционную решетку перпендикулярно и имеющие разность хода волн, равную нулю. Поэтому в центре экрана будет светлое пятно, называемое центральным максимумом.

При увеличении угла  $\varphi$  наклона лучей вторичных волн разность хода  $AC$  увеличивается от 0 до  $\lambda/2$ , затем до  $\lambda$  и т.д. В соответствии с этим яркость центрального пятна уменьшается. При разности хода  $\Delta r = AC = \lambda/2$  получается первая темная полоса, затем при  $\Delta r_1 = 2\lambda/2 = \lambda$  на экране опять появляется светлая полоса, называется максимумом первого порядка. Следующая светлая полоса будет соответствовать условию  $\Delta r_2 = 4\lambda/2 = 2\lambda$  (максимум второго порядка) и т.д. Подобная картина будет наблюдаться в обе стороны от центрального максимума.

Таким образом, максимум яркости будут давать те лучи, геометрическая разность хода которых равна  $\Delta r = (2k)\lambda/2$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots$

Возьмем два луча, проходящих симметрично в каждой из двух соседних щелей, отклонившихся на угол  $\varphi$ . Геометрическая разность их хода  $AC$  найдем из  $\triangle ABC$  (каждому другому лучу с таким же углом наклона в одной щели находятся соответствующие лучи на расстоянии  $d$  в соседних щелях):

$$|AC| = \Delta r = |AB| \sin \varphi, \quad \text{или} \quad \Delta r = d \sin \varphi.$$

Поэтому можно записать, что для полос с максимальной яркостью справедлива формула

$$d \sin \varphi = (2k)\lambda/2, \quad \text{или} \quad d \sin \varphi = k\lambda, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

Последнее соотношение называется формулой дифракционной решетки. В ней  $k$  определяет порядок максимума света на экране.

### Основные формулы

Связь относительного показателя преломления со скоростями света в первой и второй среде:

$$n_{21} = v_1/v_2. \quad (2.1)$$

Связь скорости волны с ее длиной и частотой:

$$v = \lambda\nu. \quad (2.2)$$

Условие интерференционного максимума:

$$\Delta r = k\lambda = (2k)\frac{\lambda}{2}; \quad (2.3)$$

условие интерференционного минимума:

$$\Delta r = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}; \quad (2.4)$$

$k = 0, 1, 2, \dots$

Оптическая разность хода в среде с показателем преломления  $n$ :

$$\delta = n\Delta r, \quad (2.5)$$

$\Delta r$  — геометрическая разность хода.

Формула дифракционной решетки:

$$d \sin \varphi = k\lambda, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (2.6)$$

$d$  — период дифракционной решетки,  $\varphi$  — угол отклонения лучей.