

§ 16. Принцип Гюйгенса — Френеля. Дифракция света. Дифракционная решетка

- Волновые процессы имеют свои специфические закономерности, которые отличают их от других физических процессов. Что это за закономерности? При каких условиях они проявляются? Как их можно использовать?



Среда называется однородной, если ее физические свойства по всему объему одинаковы во всех точках пространства. Среда называется изотропной, если ее физические свойства одинаковы по всем направлениям в пространстве.

Волновая поверхность — это поверхность, все точки которой колеблются в одинаковых фазах, т. е. это поверхность равных фаз. Геометрическое место точек, до которых доходят колебания к моменту времени t , называется волновым фронтом (см. § 5).

Волна называется круговой, если ее волновой фронт является окружностью.

Закономерности распространения волн любой природы в различных средах имеют много общего.

Для наглядности рассмотрим процесс распространения волн на поверхности воды. Волны, возбуждаемые точечным источником S , распространяются по всем направлениям с одинаковой по модулю скоростью v . Следовательно, фронт волны будет иметь вид окружности (рис. 93, *a*) некоторого радиуса. Если эта волна от точечного источника будет распространяться в однородной изотропной среде, то ее волновой фронт будет иметь вид сферической поверхности.

Как видно из рисунка 93, *a*, если в некоторый момент времени t фронтволны от источника S занимал положение abc , то через промежу-

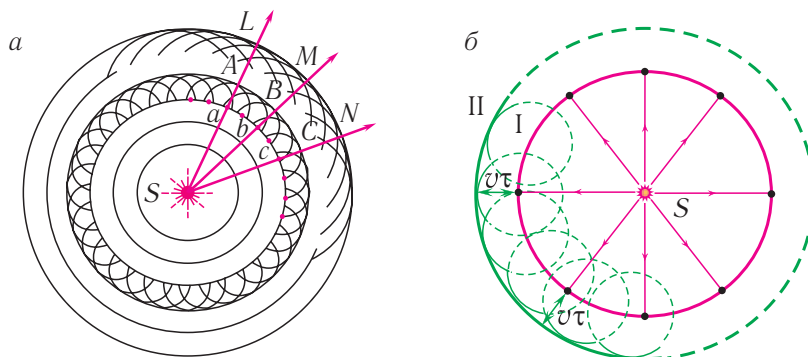


Рис. 93. *a* — объяснение перемещения фронта волны по принципу Гюйгенса;
б — формирование фронта сферической волны

ток времени τ фронт займет уже положение ABC , точки которого будут удалены от начального фронта волны на расстояние $l = v\tau$. В каждом последующем положении волновой фронт будет по-прежнему оставаться сферической поверхностью.

Общие закономерности процесса распространения волн объяснил Х. Гюйгенс, сформулировав в 1690 г. *принцип*, позволяющий определять положение волнового фронта через малый промежуток времени по его положению в данный момент времени. Согласно **принципу Гюйгенса**:

каждая точка среды, которой волновой фронт достиг в момент времени t , становится источником вторичных сферических волн. Новое положение волнового фронта через промежуток времени τ определяется огибающей волновых фронтов вторичных волн в момент времени $t + \tau$.

Таким образом, согласно принципу Гюйгенса для нахождения положения волнового фронта через промежуток времени τ следует провести окружности радиусом $l = v\tau$, представляющие собой фронты вторичных волн, с центрами на фронте в положении I (см. рис. 93, б). Соответственно, огибающая волновых фронтов вторичных волн (1, 2, 3 и т. д.) определяет новое положение волнового фронта — положение II. Напомним, что огибающей называется поверхность, касательная ко всем вторичным волнам. На очень больших расстояниях от точечного источника излучаемые им волны можно считать плоскими (рис. 94).

Линия (L , M , N), перпендикулярная волновому фронту (см. рис. 93, а) в данной точке, является **лучом**. Луч определяет направление распространения волны, а также направление переноса энергии волной. Например, будут практически параллельными солнечные лучи, падающие на футбольное поле.

Принцип Гюйгенса объясняет *прямолинейность распространения* волн в однородной среде. Поскольку в такой среде радиусы фронтов вторичных волн ($v\tau$) одинаковы на всех участках (рис. 94), то волновой фронт ($A'B'$) плоской волны с течением времени перемещается в одном и том же направлении, оставаясь параллельным своему начальному положению AB .

Однако при распространении света вблизи границ непрозрачных тел или прохождении через отверстия в непрозрачных экранах наблюдаются отклонения от закона его прямолинейного распространения. Причем

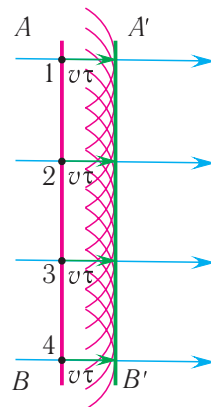


Рис. 94.

Прямолинейное распространение волн (формирование фронта плоской волны)

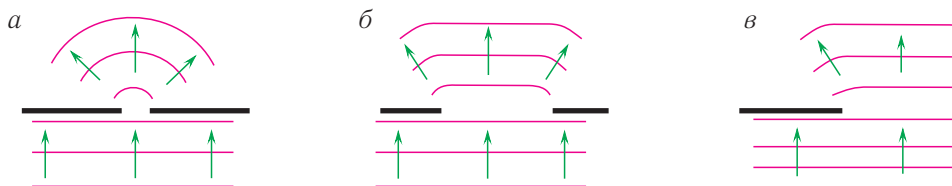


Рис. 95. Дифракция волн на различных препятствиях

отклонение существенно зависит от соотношения между длиной волны и размером препятствия. Действительно, стоя за углом дома, мы хорошо слышим, что едет автомобиль, хотя не видим его, поскольку находимся в области «тени». Таким образом, звуковые волны как бы «заворачивают за угол», в то время как световым волнам этого сделать не удастся.

Явление огибания волнами непрозрачных препятствий, которое проявляется в отклонении направления распространения волн от прямолинейного, называется **дифракцией** (рис. 95).

Явление дифракции служит одним из подтверждений волновой природы света. Для проявления дифракции размеры препятствий (отверстий) должны быть меньше или сравнимы с длиной волны, вот почему в рассмо-

тренном примере звук $\left(\nu \approx 3 \cdot 10^2 \frac{\text{м}}{\text{с}}, \nu = 1 \cdot 10^2 \text{ Гц}, \lambda = \frac{\nu}{\nu} = \frac{3 \cdot 10^2 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{1 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}} = 3 \text{ м} \right)$

от работающего мотора автомобиля смог «завернуть за угол», а свет $\left(c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}, \lambda = 500 \text{ нм} = 5,00 \cdot 10^{-7} \text{ м} \right)$, отраженный от автомобиля, — нет.

Принцип Гюйгенса позволяет находить только направление распространения волнового фронта и не затрагивает вопрос об амплитуде волны, а следовательно, и об интенсивности распространяющихся по разным направлениям волн.

Изучая дифракцию света, французский физик Огюстен Жан Френель дополнил принцип Гюйгенса представлением об интерференции вторичных волн, которые являются когерентными. **Принцип Гюйгенса — Френеля** позволил охарактеризовать явление дифракции количественно:

все источники вторичных волн, расположенные на волновом фронте, когерентны между собой. Для расчета амплитуды огибающей волны в данной точке пространства следует учесть интерференцию вторичных волн от всех участков волнового фронта в начальный момент времени (см. рис. 93, а).

Таким образом, согласно Френелю дифракция света объясняется интерференцией вторичных волн от различных участков волнового фронта в начальный момент времени.

Для наблюдения дифракции света используется *дифракционная решетка*.

Дифракционная решетка — оптический прибор, предназначенный для точного измерения длин волн и разложения света в спектр.

Дифракционная решетка состоит из большого числа равноотстоящих параллельных штрихов (щелей), нанесенных на стеклянную или металлическую поверхность. Длина решеток составляет 10—15 см. Они содержат 10 000—20 000 штрихов на 1 см. Наблюдения проводятся как в отраженном свете (на металлических решетках), так и в проходящем свете (на стеклянных).

Рассмотрим дифракционную решетку, представляющую собой систему из N одинаковых равноотстоящих параллельных щелей (прозрачные участки) в плоском непрозрачном экране (рис. 96).

Если ширина каждой щели b , ширина непрозрачной части между щелями a , то величина $d = a + b$ называется *постоянной решетки* или ее *периодом*.

Пусть на решетку, постоянная которой равна d , нормально падает плоская волна, длина которой λ . Из принципа Гюйгенса следует, что волны, дифрагировавшие на щелях, распространяются за решеткой по всем направлениям в пространстве (рис. 97).

Для наблюдения дифракционной картины на экране между ним и решеткой размещают собирающую линзу таким образом, чтобы экран

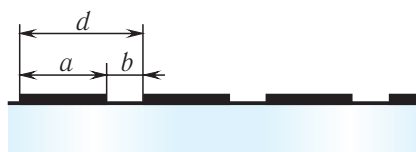


Рис. 96. Дифракционная решетка

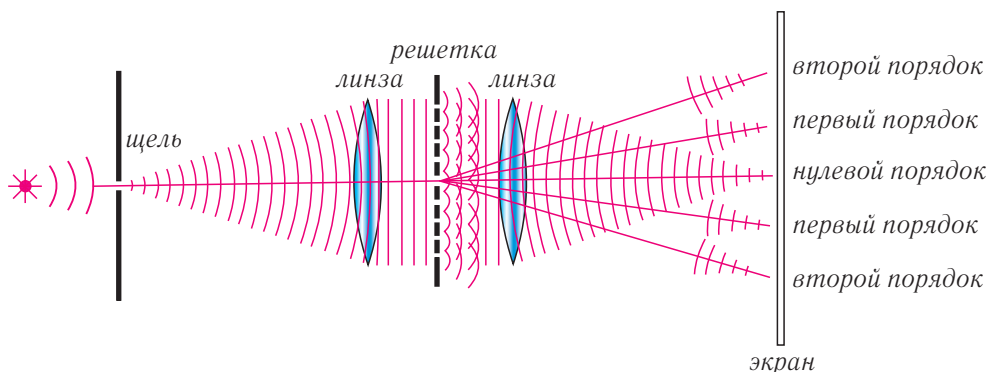


Рис. 97. Схема наблюдения дифракционных максимумов на дифракционной решетке

находился в фокальной плоскости линзы (см. рис. 97). Собирающая линза фокусирует на экране падающие на нее параллельные лучи (вторичные волны).

В зависимости от разности хода между вторичными волнами, испущенными разными щелями, они интерферируют друг с другом, усиливая или ослабляя друг друга. На экране получается *дифракционная картина* в виде системы светлых и темных полос (см. рис. 97). Наиболее яркие дифракционные максимумы получили название *главных дифракционных максимумов*.

При нормальном падении света на дифракционную решетку условие возникновения главных дифракционных максимумов, наблюдаемых под углами θ , имеет вид (рис. 98):

$$d \sin \theta = m\lambda, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1)$$

Здесь m — *порядок максимума* или *порядок спектра*, λ — длина волны падающего излучения.

Полученное условие определяет направления распространения света в пространстве, по которым на отрезке $\Delta l = d \sin \theta$ укладывается целое число длин волн $m\lambda$ (см. рис. 98). Следовательно, при выполнении условия (1) вторичные волны от всех щелей решетки приходят в точку

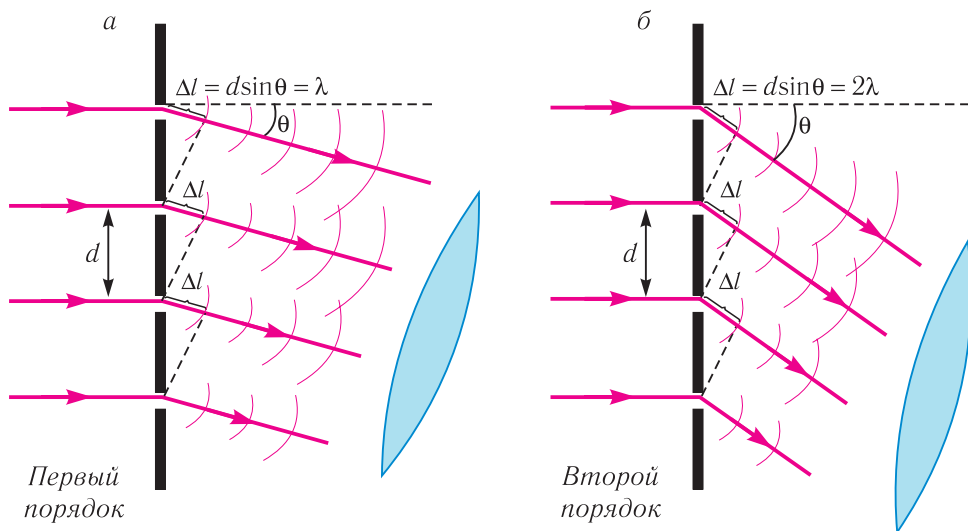


Рис. 98. Геометрия волновой теории дифракционной решетки: d — период решетки; λ — длина волны падающего излучения, θ — угол дифракции

наблюдения синфазно (с фазами, отличающимися на число, кратное 2π) и усиливают друг друга.

Между максимумами интенсивности расположены минимумы, так как при изменении угла θ на отрезке Δl уже не будет укладываться целое число длин волн. Следовательно, вторичные волны приходят в точку наблюдения, ослабляя друг друга.

Из условия возникновения главных дифракционных максимумов (1) следует, что при $m = 0$ для любых длин волн $\theta = 0$. Следовательно, прямо по центру решетки образуется нулевой максимум, который называется также *центральный* максимумом. Дифракционные максимумы, соответствующие $m = 1$, образуют спектр *первого порядка*, $m = 2$ — спектр *второго порядка* и т. д. (см. рис. 97). Количество максимумов m в дифракционной картине ограничено, поскольку $|\sin \theta| \leq 1$. Максимальный порядок спектра $m_{\max}$, которой дает дифракционная решетка, при нормальном падении света на нее, определяется из условия $|\sin \theta| \leq 1$. Тогда из соотношения (1) следует взять целую часть отношения:

$$m_{\max} = \left[\frac{d}{\lambda} \right], \quad (2)$$

т. е. зависит от периода решетки и длины световой волны.

Отметим, что при определении максимального порядка спектра необходимо брать целую часть числа $m_{\max}$.

Как следует из соотношения (2), для получения спектра первого порядка ($m_{\max} = 1$) необходимо, чтобы период решетки был больше длины световой волны ($d > \lambda$).

При падении на решетку белого света центральный максимум ($m = 0$) представляет собой изображение источника (рис. 99, а), так как в этом направлении собирается излучение всех длин волн. Для всех максимумов ненулевого порядка ($m \neq 0$) в дифракционной решетке синус угла отклонения прямо пропорционален длине волны падающего излучения ($\sin \theta \sim \lambda$). Следовательно, красные лучи, имеющие большую длину волны, чем синие, отклоняются дифракционной решеткой сильнее (рис. 99, б, в). Таким образом, при освещении решетки белым светом справа и слева от центрального мак-

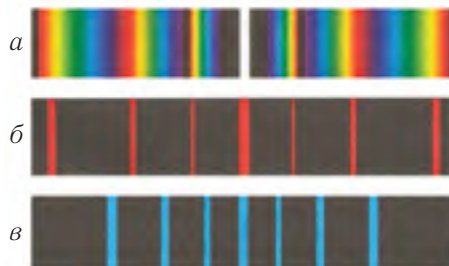


Рис. 99. а — дифракционный спектр белого света; б — дифракционные максимумы красного света; в — дифракционные максимумы синего света

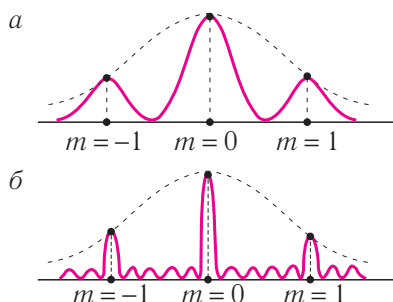


Рис. 100. Изменение дифракционной картины при увеличении числа щелей: а — две щели; б — шесть щелей

симула наблюдаются максимумы первого, второго и более высоких порядков, обращенных фиолетовым краем к центру дифракционной картины, а красным — от нее (рис. 99, а).

С увеличением числа щелей в дифракционной решетке возрастает количество световой энергии, пропускаемой решеткой, следовательно, интенсивность главных максимумов при этом увеличивается. Кроме того, главные максимумы из расплывчатых превращаются в резкие и узкие, которые разделены практически темными промежутками, так как вторичные максимумы

очень слабы и составляют не более 5 % от главного (рис. 100). Поэтому при падении монохроматического излучения на решетки, в которых число штрихов на 1 см достигает 10^5 , дифракционный спектр состоит из очень резких линий.

► Первая дифракционная решетка, сконструированная в 1786 г. американским ученым Дэвидом Риттенхаузом, состояла из параллельного ряда волосков диаметром около 0,1 мм и длиной 10 мм, натянутых на расстоянии порядка 0,2 мм один от другого.

Немецкий физик Йозеф Фраунгофер вместо волосков использовал параллельные штрихи, нанесенные на стекло алмазным острием. Фраунгоферу удалось нанести 300 штрихов на 1 мм решетки!



1. Что называют дифракцией света? При каких условиях ее наблюдают?
2. В чем сущность принципа Гюйгенса?
3. Почему при удалении оркестра, когда он оказывается за углом дома, через некоторое время слышны только звуки барабана и труб-басов?
4. В чем сущность принципа Гюйгенса — Френеля?
5. В чем сходство и различие между интерференцией и дифракцией?
6. Что называют дифракционной решеткой? Периодом решетки?
7. Запишите формулу для определения максимумов интенсивности, создаваемой дифракционной решеткой.
8. Почему близорукие люди щурят глаза, чтобы лучше видеть?



Пример решения задачи

На дифракционную решетку, имеющую $N = 500 \frac{\text{штр}}{\text{мм}}$, падает нормально монохроматическое излучение длиной волны $\lambda = 550 \text{ нм}$. Определите наибольший порядок m_{max} дифракционного максимума, который можно наблюдать.

Дано:

$$\lambda = 550 \text{ нм} = 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$N = 500 \frac{\text{штр}}{\text{мм}} = 5 \cdot 10^5 \frac{\text{штр}}{\text{м}}$$

$m_{\text{max}} — ?$

Решение

Условие дифракционных максимумов:

$$d \sin \theta = \frac{\sin \theta}{N} = m \lambda.$$

Следовательно,

$$\sin \theta = N m \lambda.$$

Наибольший порядок m_{max} дифракционного максимума наблюдается при угле θ , близком к углу 90° . Вследствие этого будем считать, что

$$\theta_{\text{max}} \approx \frac{\pi}{2}, \text{ т. е. } \sin \theta_{\text{max}} \approx 1,$$

тогда наибольший порядок максимума находится по формуле:

$$m \approx \frac{1}{N \lambda}.$$

Для определения m_{max} необходимо взять целую часть полученного значения:

$$m_{\text{max}} = \left[\frac{1}{N \lambda} \right] = \left[\frac{1 \text{ м}}{5 \cdot 10^5 \cdot 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}} \right] = [3,6] = 3.$$

Ответ: $m_{\text{max}} = 3$.

Упражнение 12

1. Под каким углом θ наблюдается максимум третьего порядка при нормальном падении света длиной волны $\lambda = 840 \text{ нм}$ на дифракционную решетку с периодом $d = 2,35 \cdot 10^{-3} \text{ см}$?
2. Рассчитайте число штрихов N на миллиметр дифракционной решетки, если измеренный угол $\theta = 46^\circ 43'$ и красная линия спектра кадмия первого порядка имеет длину волны $\lambda = 644 \text{ нм}$. Сделайте аналогичные вычисления, если под этим углом видна линия второго порядка.
3. Сколько штрихов N на 1 см должна иметь дифракционная решетка, если спектр второго порядка отсутствует в видимой области?

4. Определите наибольший порядок $m_{\max}$ спектра, наблюдаемого при нормальном падении монохроматического света на дифракционную решетку, имеющую $N = 500 \frac{\text{штр}}{\text{мм}}$, если длина волны света $\lambda = 520 \text{ нм}$.
5. Монохроматический свет падает нормально на дифракционную решетку. Дифракционный максимум первого порядка наблюдается под углом $\theta = 12^\circ$. Сколько других порядков m может наблюдаться и под какими углами?
6. Свет с длинами волн от $\lambda_1 = 400 \text{ нм}$ до $\lambda_2 = 780 \text{ нм}$ падает нормально на дифракционную решетку. В каких порядках может произойти перекрытие максимумов и минимумов? Зависит ли ответ от ширины щели?



§16-1

§ 17. Прямолинейное распространение и отражение света. Зеркала

- Интересные явления наблюдаются при отражении света от границы раздела двух сред. Как происходит отражение света (рис. 101)? Как можно управлять световым лучом?



Закон прямолинейного распространения света: в однородной прозрачной среде свет распространяется прямолинейно.

Закон независимости световых лучей: распространение световых лучей в веществе происходит независимо друг от друга.

Угол между падающим лучом и перпендикуляром, проведенным в точку падения луча, называется углом падения.

Угол, образованный отраженным лучом и перпендикуляром, проведенным в точку падения луча, называется углом отражения.

Закон отражения света: лучи, падающий и отраженный, а также перпендикуляр к отражающей поверхности, проведенный в точку падения, лежат в одной плоскости; угол отражения равен углу падения.

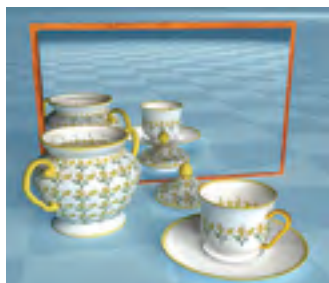


Рис. 101. Изображение в плоском зеркале

Для изучения свойств электромагнитных волн необходимо знать как закономерности их распространения в однородной среде, так и отражения и преломления на границе раздела двух сред.

Геометрической оптикой называют раздел оптики, в котором изучаются законы распространения оптического излучения на основе представления о световых лучах. В геометрической оптике волновая природа света не учитывается. Условимся изображать световые лучи

