

А. А. Акилов, М. К. Шевцов

# Голография для любознательных

Книга для научных сотрудников школьного возраста



**Александр Анатольевич Акилов  
Михаил Константинович Шевцов**

**Голография для  
любопытных. Книга  
для научных сотрудников  
школьного возраста**

*[http://www.litres.ru/pages/biblio\\_book/?art=24861401](http://www.litres.ru/pages/biblio_book/?art=24861401)  
ISBN 9785448543265*

**Аннотация**

Не беда, что физика – мудреная наука. Без сложных формул и вычислений авторы рассказывают, как долго и упорно люди шли к изобретению голографии и лазеров, без которых бы эта наука, скорее всего, не состоялась. В книге читатели смогут найти множество практических советов как в домашних условиях создать голографическую лабораторию, самостоятельно собрать одночастотный полупроводниковый лазер и успешно изготавливать качественные голограммы.

# Содержание

Эта книга для любознательных	6
Глава 1. Важные открытия в оптике	9
Основные положения корпускулярной теории Ньютона	10
Опыт Юнга	14
Работы Огюста Френеля	17
Сведения из волновой оптики	24
Конец ознакомительного фрагмента.	34

**Голография для  
любознательных  
Книга для научных  
сотрудников  
школьного возраста**

**Александр  
Анатольевич Акилов  
Михаил Константинович  
Шевцов**

*Иллюстратор Александр Анатольевич Акилов*

© Александр Анатольевич Акилов, 2018

© Михаил Константинович Шевцов, 2018

© Александр Анатольевич Акилов, иллюстрации, 2018

ISBN 978-5-4485-4326-5



*Авторы: Михаил Шевцов (слева) и Александр Акилов (справа)*

Авторы выражают искреннюю благодарность Владимиру Кузнецову талантливому инженеру и энтузиасту в области цветной голографии из Новосибирска за предоставленные образцы оригинальных разработок, а так же Сергею Тютину за полезные консультации и уникальные материалы по истории голографического кинематографа.

# Эта книга для любознательных



А теперь, Бильбо, мой мальчик, неси—ка лампу  
и прольем немного света вот на эту вещь...

*Дж. Р. Р. Толкиен. Хоббит*

Что является двигателем прогресса? Как говорят ученые, человека из обезьяны сделал труд. Конечно, труд – это мощная сила, но еще сильнее нами движет любопытство. С тех пор, как наш предок освободил руки для созидательного труда, он так и не смог насытить своего любопытства. Мы глубоко убеждены, что в науке любопытство не на последнем месте. Не верите? Можем привести множество исторически достоверных примеров. Один из них – известный физик Ро-

берт Вуд. Оставшись навсегда пытливым ребенком, он получал огромное удовольствие, когда находил ответы на бесконечные «отчего?», «как?» и «почему?». Что такое лазер? Чем фотография отличается от голографии? Как у себя дома сделать голограмму? Какая от всего этого польза? На эти и многие другие вопросы мы с вами будем искать исчерпывающие ответы и, безусловно, получать при этом большое удовольствие. Не беда, что физика – мудреная наука. Без сложных формул и вычислений мы попробуем разобраться в законах волновой оптики и квантовой механики, узнаем, как долго и упорно люди шли к пониманию этих явлений. В истории науки звездами сияют редкие бессмертные имена великих ученых, но сколько талантливых, часто несправедливо забытых людей строили тернистую дорогу к знаниям. Скромный вклад инженера или рядового научного сотрудника порой становится важным шагом к серьезному открытию. Габриэль Липпман, опередив время, изготавливал цветные интерференционные фотографии непревзойденного качества еще в XIX веке! Одна теория, которую создали два выдающихся мировых мыслителя, физик Дэвид Бом и нейрофизиолог Карл Прибрам, кажется нам невероятной, но очень заманчивой. Авторы воспользовались идеей Денниса Габора – голографическим эффектом. Эта теория позволила выдвинуть ученым невероятную гипотезу, которая объясняла, почему мысль постоянно стремится обрести форму и как материализуется созданный мозгом образ. Голограм-

ма – это явление, в котором «целое» содержится в каждой из его составляющих. Возьмем для примера морскую звезду. Она обладает определенным голографическим эффектом – если у нее отрезать какую-то часть, она отрастет вновь. Более того, новая морская звезда может вырасти даже из отрезанной части. Ее генетический код заложен в каждой из ее частей. Если разбить так называемую Фурье – голограмму, то каждый ее осколок будет содержать не часть картины, а целое изображение. Здесь есть очевидное сходство. Никто до сих пор не знает достоверно, где хранится наша память, как мы распознаем объекты. Может быть, и наш мозг работает как голограмма? Мы думаем, что познакомившись с основами голографии, стоит задуматься и по этому поводу. Надеемся, что вы захотите узнать ответы на возникшие вопросы и обязательно обратитесь к книгам. Так что вперед, дорогие друзья! Если любопытство не подведет, вас ждут настоящие открытия и эффектные эксперименты.

Итак, начнем с истории.

# Глава 1. Важные открытия в оптике

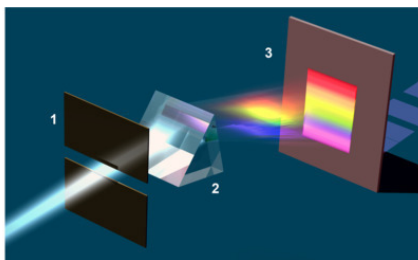


Да будет свет! – сказал Бог. И стал свет  
*Библия.*

# Основные положения корпускулярной теории Ньютона



*Исаак Ньютон (25.11. 1642 – 31.03.1726)*



*Опыт И. Ньютона с призмой.*

Великий Исаак Ньютон был первым, кто начал основа-

тельно исследовать природу света. В 1666 году он произвел в Кембридже замечательный опыт с призмой. Через маленькое круглое отверстие в ставне окна (1) в затемненную комнату проникал луч света. На пути луча ученый установил стеклянную трехгранную призму (2). Пучок белого света неожиданно распался на множество разноцветных лучей. На экране (3), стоявшем за призмой, появилась разноцветная радуга, которую экспериментатор назвал спектром.

В 1704 году вышла в свет монография Исаака Ньютона «Оптика», определившая развитие этой науки до начала XIX века. В своем труде Ньютон сделал очень важные выводы:

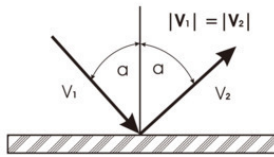
– Свет состоит из малых частичек вещества, испускаемых во всех направлениях по прямым линиям или лучам светящимся телом, например, горящей свечой. Если эти лучи, состоящие из корпускул, попадают в наш глаз, то мы видим их источник



*Свет состоит из малых частичек вещества, испускаемых во всех направлениях по прямым линиям светящимся телом*

– Отражение света от поверхности происходит вследствие отражения корпускул от стенки по закону абсолютного упругого удара.

– Световые корпускулы имеют разные размеры. Самые крупные частицы, попадая в глаз, дают ощущение красного цвета, самые мелкие – фиолетового. Белый цвет – смесь всех цветов: красного, оранжевого, желтого, зеленого, голубого, синего, фиолетового.



*Отражение света от поверхности происходит вследствие отражения корпускул от стенки по закону абсолютного упругого удара*

– Явление преломления света он объяснял тем, что корпускулы притягиваются частицами среды. Чем среда плотнее, тем угол преломления меньше угла падения. С точки зрения механической теории, преломление обязано силам со стороны частиц стекла, действующим на световые корпускулы. Эти силы различны для разных корпускул. Со стороны стекла на частицы фиолетового света действуют наибольшие силы, а наименьшие – для красного. Путь корпускул в приз-

ме для каждого цвета будет преломляться по-своему, поэтому белый луч расщепится на цветные составляющие.

– Каждый цвет уже присутствует в белом свете. Все цвета передаются через межпланетное пространство и атмосферу совместно и дают эффект в виде белого света. Белый свет – смесь разнообразных корпускул.

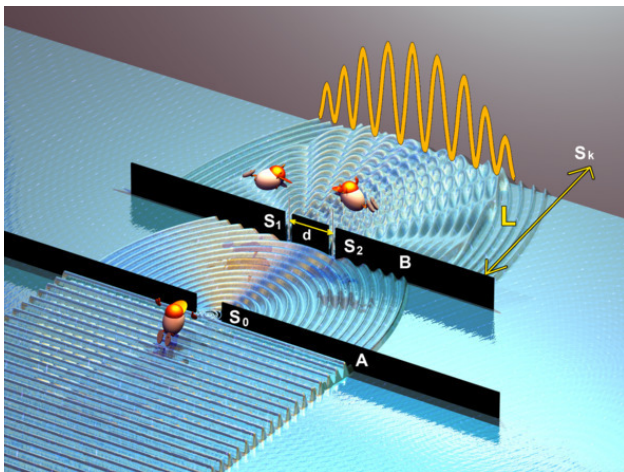
Корпускулярная теория Ньютона удовлетворительно объяснила многие оптические явления, известные в то время. Ее автор пользовался в научном мире колоссальным авторитетом, и вскоре теория Ньютона приобрела многих сторонников во всех странах. Но, как часто бывает, даже великий Ньютон в своих опытах кое—что не разглядел.

# Опыт Юнга



*Томас Юнг (13.06.1773 – 10.05.1829)*

Эксперимент, проведенный **Томасом Юнгом** в начале XIX века, стал неоспоримым доказательством волновой природы света. Он рассмотрел весьма скрупулезно явления, связанные с прохождением света сквозь малые отверстия. Результаты одного из экспериментов были опубликованы автором в 1803 году.



*Свет от удаленного источника  $S$  проходил через узкую щель  $S_0$  в экране  $A$ , затем попал на экран  $B$  с двумя щелями  $S_1$  и  $S_2$ , расположенными достаточно близко друг к другу на расстоянии  $d$ . Экран  $S$  располагался на расстоянии  $L$  от щелей, причем  $L \gg d$*

В опыте Юнга использовался необычный пучок света, который он получал разделением и последующим сведением световых лучей, исходящих из одного и того же источника. Рассмотрим схему эксперимента Юнга. Свет от удаленного источника ( $S$ ) проходил через узкую щель ( $S_0$ ) в экране ( $A$ ), затем попадал на экран ( $B$ ) с двумя щелями ( $S_1$ ) и ( $S_2$ ), расположенными достаточно близко друг к другу на расстоянии ( $d$ ). Экран ( $S_k$ ) располагался на расстоянии ( $L$ ) от щелей,

причем  $L \gg d$ . Если бы свет представлял собой поток частиц, то на экране ( $S_k$ ) можно было увидеть только два световых пятна на расстоянии ( $L$ ) от экрана ( $B$ ). Однако Юнг увидел периодическую картину светлых и темных полос. Самая яркая полоса располагалась на оси оптической схемы как раз посередине, между щелями ( $S_1$ ) и ( $S_2$ ). На основании увиденного, Юнг сделал вывод, что свет представляет собой волну, а не поток частиц, как до этого эксперимента со всей авторитетностью утверждал гениальный Исаак Ньютон.

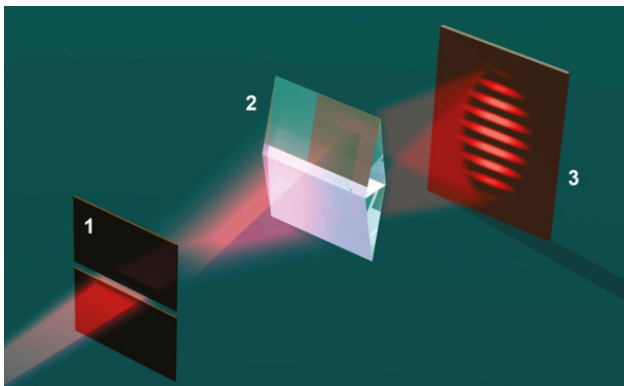
# Работы Огюста Френеля



*Огюстен Френель (10.05.1788 – 14.07.1827)*

Молодого дорожного инженера **Огюстена Френеля**, присоединившегося волонтером к роялистским войскам, которые должны были преградить дорогу Наполеону во время его возвращения с острова Эльба, уволили со службы, и он вынужден был уехать домой и посвятить свободное время исследованию дифракции, имея в своем распоряжении лишь случайное и примитивное экспериментальное оборудование. Два доклада, представленных им 15 октября 1815 года Парижской Академии наук, были первым результатом этих трудов. Френель был приглашен в Париж для повторения своих опытов в более благоприятных условиях. Френель начал исследовать тени, отбрасываемые небольшо-

ми препятствиями на пути лучей, и обнаружил образование полос не только снаружи, но и внутри тени, что до него уже наблюдал ученый Гримальди (1618—1663) и о чем лукаво умолчал Ньютон. Исследование тени, образуемой тонкой проволокой, привело Френеля к повторному открытию принципа интерференции после Томаса Юнга. «Внутренние каемки не могут образовываться от простого смещения этих лучей, потому что каждая сторона проволоки в отдельности направляет тень только на непрерывный поток света; следовательно, каемки образуются в результате перекрещивания этих лучей», — писал в своем докладе молодой ученый. Этот вывод, который представляет собой, так сказать, перевод явления на понятный язык, полностью противоречит гипотезе Ньютона и подтверждает теорию световых колебаний. Легко можно догадаться, что колебания двух лучей, которые скрещиваются под очень малым углом, могут взаимодействовать, образуя картину интерференции.



*Свет направляется на симметричную бипризму (2) от яркого источника через узкую щель (1), которая собирает два пучка света на экране (3). В результате сложения этих пучков возникает периодическая картина интерференции*

В Париже Френель узнал об опытах Юнга с двумя отверстиями, которые, по его мнению, были вполне подходящими для иллюстрации волновой природы света. Для исключения всякой возможности истолкования этого явления, как действия краев отверстий, Френель придумал известный «опыт с двумя зеркалами», о котором он сообщает в 1816г., а затем в 1819 году «опыт с бипризмой», ставший с тех пор классическим методом демонстрации принципа интерференции. Свет направляется на симметричную бипризму (2) от яркого источника через узкую щель (1), которая собирает два

пучка света на экране (3). В результате сложения этих пучков возникает периодическая картина интерференции. Взяв на вооружение явление интерференции, Френель располагал теперь тремя принципами: принципом элементарных волн, принципом огибающей и принципом интерференции. Это были три отдельных принципа, которые Френель гениально решил слить воедино. Таким образом, для Френеля «огибающая» волн в явлении преломления света не просто геометрическое понятие, как для Гюйгенса, а представляет собой алгебраическую сумму импульсов, создаваемых каждой элементарной волной. Полная сумма всех этих импульсов складывается согласно принципу интерференции и в частном случае может быть равна нулю. Другими словами, световые волны одинаковой длины могут складываться и вычитаться в зависимости от значения их фаз в некоторой точке пространства.

Благодаря опытам Юнга и Френеля, монохроматическую плоскую световую волну в общем случае можно описать функцией вида:

$$\xi(x,t) = A \cdot \cos(\omega t - kx + \varphi_0), \text{ где:}$$

$\xi(x,t)$  – смещение частицы среды, находящейся на расстоянии ( $x$ ) от источника колебаний в момент времени ( $t$ );

$A$  – амплитуда колебаний;

$\omega$  – круговая (циклическая) частота,  $\omega = k\nu$ ;

$\nu = 1/T$  – частота электромагнитных колебаний;

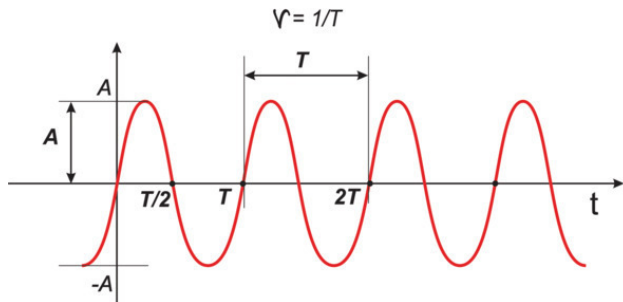
$k$  – волновое число,  $k = 2\pi/\lambda$ ;

$\lambda$  – длина волны;

$v$  – скорость распространения волны,  $v = \lambda/T$ ;

$T$  – период колебаний;

$\varphi_0$  – начальная фаза колебаний.



*График зависимости смещения волны от времени*

Таким образом, описание интерференции монохроматических волн сводится к вычислению амплитуды (при необходимости и фазы) результирующей волны.

После нескольких лет перерыва в исследованиях, Френель вновь излагает свою теорию в обширном докладе о дифракции, представленном в 1818 году на конкурс Парижской Академии наук. Этот доклад рассматривался комиссией, состоявшей из Лапласа, Био, Пуассона, Араго и Гей—Люссак. Трое первых были убежденные ньютонианцы, Араго был настроен в пользу Френеля, а Гей—Люссак, по существу, не был компетентен в рассматриваемом вопросе, но был из-

вестен своей честностью. Пуассон заметил, что из теории Френеля можно вывести следствия, находящиеся как будто в явном противоречии со здравым смыслом, поскольку из расчета следует, что в центре геометрической тени непрозрачного диска надлежащих размеров должно наблюдаться светлое пятно, а в центре конической проекции небольшого круглого отверстия, на определенном расстоянии должно наблюдаться темное пятно. Комиссия предложила Френелю доказать экспериментально выводы из его теории, и Френель блестяще это выполнил, доказав, что «здравый смысл» в этом случае ошибается. После этого по единодушному предложению комиссии Академия наук присудила ему премию, а в 1823 году он был избран ее членом. Но для того, чтобы доказать, что дифракция и интерференция когерентных волн являются двумя сторонами одного и того же явления, должно было пройти целое столетие.

### **Определения**

Зависимость показателя преломления света от частоты колебаний (или длины волны) называется **дисперсией**.

Совокупность монохроматических компонент в излучении называется **спектром**.

**Когерентностью** в физике называется согласованность нескольких колебательных или волновых процессов во времени, проявляющаяся в виде явления интерференции. Колебания когерентны, если частота и разность их фаз постоянны во времени.

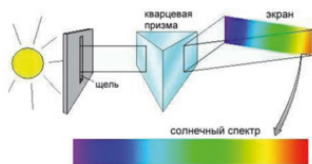
**Интерференция света** – перераспределение интенсивности света в результате наложения нескольких световых волн. Это явление сопровождается чередующимися в пространстве максимумами и минимумами интенсивности. Распределение интенсивности колебаний в пространстве называется интерференционной картиной.

**Дифракция волн** (лат. Diffractus – буквально огибание препятствия волнами) – явление, которое проявляет себя, как отклонение от законов геометрической оптики при распространении волн. Она представляет собой универсальное волновое явление и характеризуется одними и теми же законами при наблюдении волновых полей разной природы.

# Сведения из волновой оптики

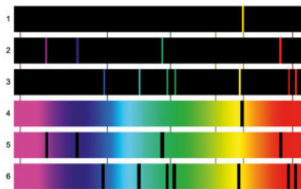
Давайте рассмотрим перечисленные выше определения немного подробнее. Понимание всех этих явлений поможет нам в дальнейшем разобраться с принципами голографии.

## Дисперсия



*Разложение белого света в спектр с помощью кварцевой призмы*

Белый свет имеет непрерывный спектр. Излучение отдельных атомов может иметь дискретный спектр.



Спектры испускания: 1 - натрий; 2 - водород; 3 - гелий.  
Спектры поглощения: 4 - натрий; 5 - водород; 6 - гелий.

## *Спектры испускания и поглощения некоторых атомов*

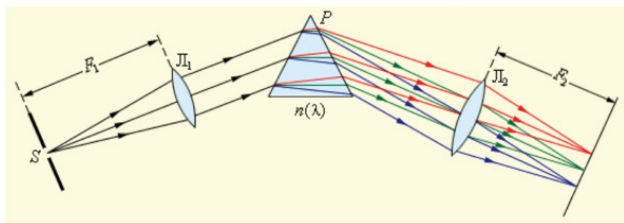
Скорость света в вакууме не зависит от частоты или длины волны и равна  $(C) = 3 \cdot 10^8$  м/с. Если поочередно пропускать через стеклянную призму пучки монохроматического света разной длины волны под одним и тем же углом падения, то можно заметить, что фиолетовый луч преломляется больше, чем красный. Значит коэффициент преломления  $n_{\text{ф}} > n_{\text{к}}$ . Абсолютный показатель преломления связан со скоростью распространения света в прозрачной среде формулой:

$$n_{\text{ф}} / n_{\text{к}} = C_{\text{к}}^* / C_{\text{ф}}^* ;$$

где  $C_{\text{к}}^*$  и  $C_{\text{ф}}^*$  – скорости света в стекле для красного и фиолетового цветов;  $n_{\text{ф}}$  и  $n_{\text{к}}$  – коэффициенты преломления фиолетового и красного цвета соответственно.

Скорость фиолетового света в прозрачной среде будет меньше скорости красного света.

Приборы, с помощью которых исследуются спектры излучения различных источников, называются спектральными приборами (спектроскоп и спектрограф). Для разложения излучения в спектр в спектральном приборе используется призма.



### *Оптическая схема спектрографа*

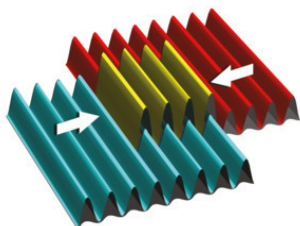
Действие призмы основано на явлении дисперсии, то есть зависимости показателя преломления ( $n$ ) вещества от длины волны света ( $\lambda$ ). Щель  $S$ , на которую падает исследуемое излучение, находится в фокальной плоскости линзы  $L_1$ . Эта часть прибора называется коллиматором. Выходящий из линзы параллельный пучок света падает на призму ( $P$ ). Вследствие дисперсии свет разных длин волн выходит из призмы под разными углами. В фокальной плоскости линзы  $L_2$  располагается экран или фотопластинка, на которой фокусируется излучение. В результате в разных местах экрана возникает изображение входной щели  $S$  в свете разных длин волн. У всех прозрачных твердых веществ (стекло, кварц), из которых изготавливаются призмы, показатель преломления ( $n$ ) в диапазоне видимого света убывает с увеличением длины волны ( $\lambda$ ). Монотонно убывающая зависимость  $n(\lambda)$  называется нормальной дисперсией. В спектральных приборах высокого класса и разрешения вместо призм при-

меняются дифракционные решетки.

## Когерентные волны и интерференция

Если две синусоидальных волны с одинаковой частотой, неизменной разностью фаз, распространяются с одной скоростью, накладываясь друг на друга, создают интерференционную картину, их называют **когерентными**.

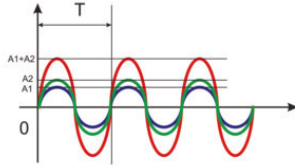
Результат сложения когерентных волн зависит от состояния их фаз.



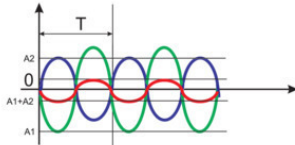
*Простейший пример взаимодействия когерентных колебаний. Два периодических колебания одинаковой частоты, распространяясь навстречу друг другу с одинаковой скоростью, при сложении образуют «стоячую волну» той же частоты*

Световые волны не могут обладать бесконечной когерентностью. Дело в том, что в спектре самых высоко когерентных источников всегда присутствуют волны с разными частота-

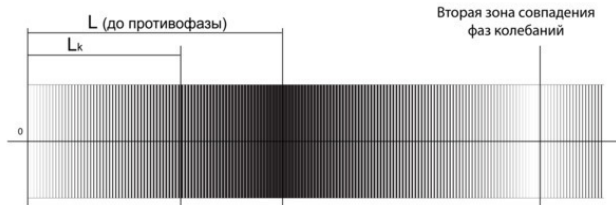
ми благодаря доплеровскому смещению излучения хаотично движущихся атомов. Поэтому существует понятие «длины когерентности» ( $L_k$ ).



*Сумма двух когерентных волн, совпадающих в фазе  $\Delta\varphi = 0$*



*Сумма двух когерентных волн в противофазе  $\Delta\varphi = 90$*



*На рисунке изображена картина интерференции двух*

*волн с разными частотами.*

Если в начале своего пути волны совпадают по фазе и при сложении образуют волну с удвоенной амплитудой (белый цвет), то по мере распространения, фазы двух волн начинают смещаться относительно друг друга, и на расстоянии ( $L$ ) оказываются в противофазе (черный цвет). Затем фазы, продолжая смещаться, начинают совпадать во второй зоне, третьей и так далее. Возникают так называемые биения взаимодействующих волн. Максимальная разность хода лучей, при которой волны при сложении образуют ярко выраженную картину интерференции, называют длиной когерентности ( $L_k$ ) светового пучка.

Предположим, источник излучает волны длиной  $\lambda$  и  $\lambda \pm \Delta\lambda$ , которые в какой-то момент в пространстве будут интерферировать на расстоянии ( $L_k$ ).

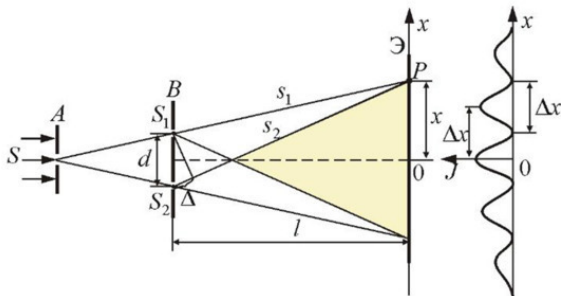
$L_k = \lambda^2 / \Delta\lambda$ ; где  $L_k$  – длина когерентности.

Одной из важных характеристик наблюдаемой интерференционной картины является видность ( $V$ ), которая характеризует контраст интерференционных полос:

$V = 2 (I_1 * I_2) ^{0,5} / (I_1 + I_2)$ ; где  $I_1$  – интенсивность светлой полосы при  $L_k$ ;  $I_2$  – интенсивность светлой полосы при нулевой разности фаз. Длина когерентности ( $L_k$ ) связана с видностью картины интерференции. При значении видности  $V$  менее 0.7 волны считают некогерентными.

**Условие интерференции:** волны должны быть когерентны. В простейшем случае когерентными являются волны одинаковой длины (частоты), между которыми существует постоянная разность фаз.

Все источники света, кроме лазера, имеют очень маленькую когерентность, однако вспомните, как Томас Юнг впервые наблюдал явление интерференции, разделив световую волну на две когерентные с помощью двойной щели.



*Рассмотрим условия образования максимумов и минимумов освещенности экрана*

Пусть разность хода между двумя точками  $\Delta = S_1 - S_2$ , тогда условие максимума освещенности экрана:

$$\Delta = k\lambda;$$

т. е. на этом направлении в точке  $(p)$  экрана  $(\mathcal{E})$  укладываются

ется четное число полуволн ( $k = 1, 2, 3, \dots$ ), или целое число длин волн ( $\lambda$ ) и наблюдается максимум яркости результирующей картины.

Условие минимума освещенности экрана:

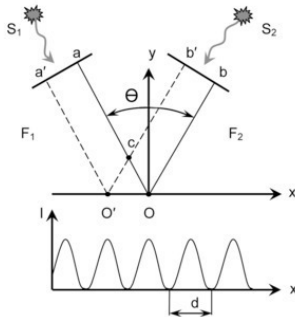
$$\Delta = \lambda (2k+1) / 2;$$

на этом направлении укладывается нечетное число полуволн. В результате на фотопластинке записывают структуру с периодом ( $d$ ):

$$2d = \lambda / \sin (\Theta / 2),$$

где:  $\lambda$  – длина волны;

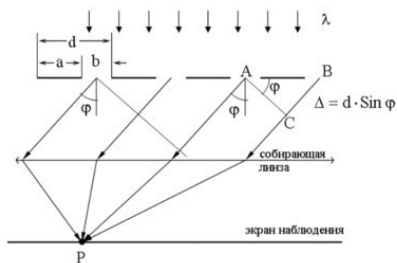
( $\Theta$ ) – угол между направлениями интерферирующих лучей



*Картина интерференции двух плоских когерентных волновых фронтов, которую регистрируют на светочувствительной фотопластинке в голографических экспериментах*

## Дифракция

Дифракционная решетка – система препятствий (параллельных штрихов), сравнимых по размерам с длиной волны. Решетки представляют собой периодические структуры, выгравированные специальной делительной машиной на поверхности стеклянной или металлической пластинки. У хороших решеток параллельные друг другу штрихи имеют длину порядка 10 см, а на каждый миллиметр приходится до 2000 штрихов. При этом общая ширина решетки достигает 10 – 15 см. Изготовление таких решеток требует применения самых высоких технологий. На практике применяются также и более грубые решетки с 50 – 100 штрихами на миллиметр, нанесенными на поверхность прозрачной пленки. В качестве дифракционной решетки может быть использован кусочек компакт-диска.



Величина  $d = a + b$  называется постоянной (периодом) дифракционной решетки

$a$  – ширина щели;  $b$  – ширина непрозрачной части. Угол  $\varphi$  – угол отклонения световых волн вследствие дифракции. Наша задача – определить, что будет наблюдаться в произвольном направлении  $\varphi$  – максимум или минимум.

# Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «ЛитРес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на ЛитРес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.