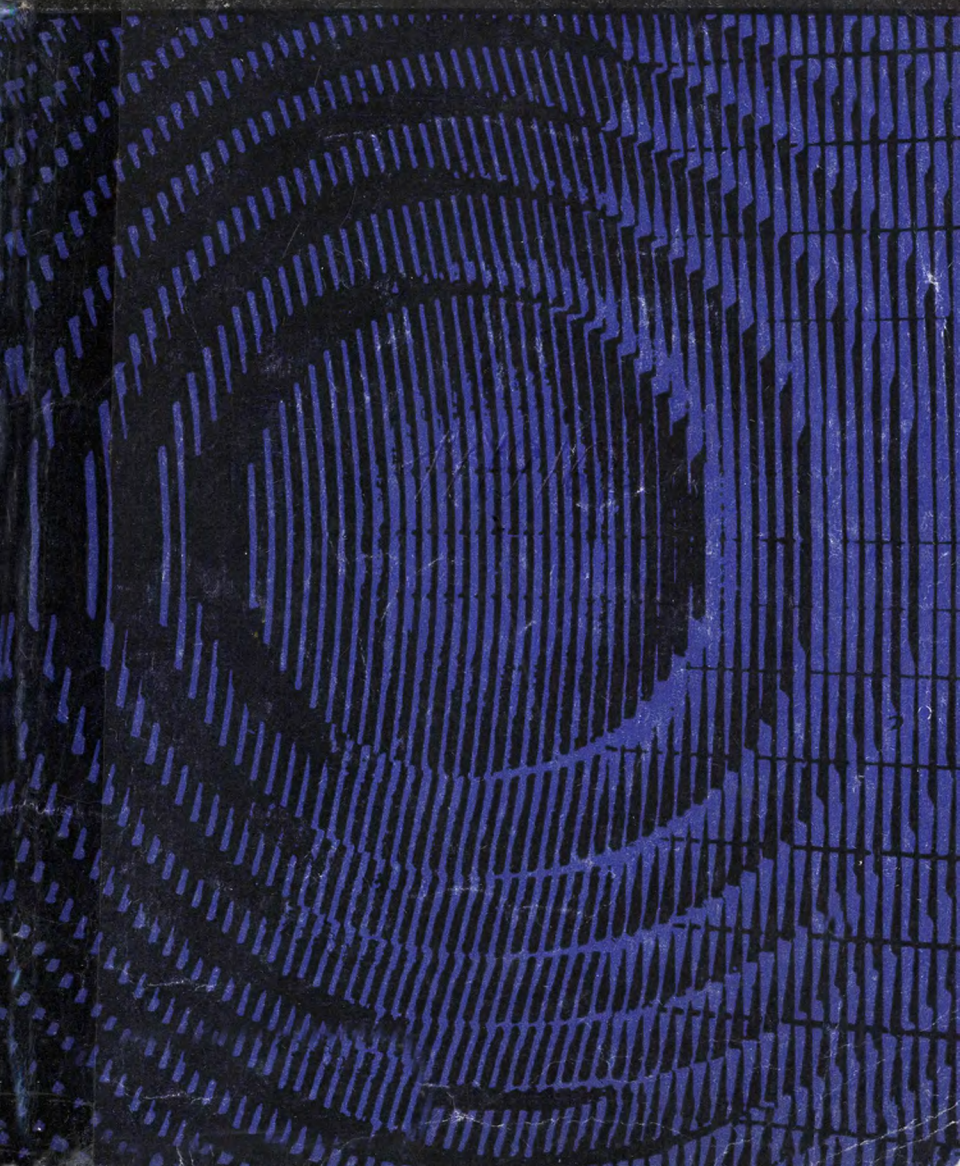


В МИРЕ НАУКИ И ТЕХНИКИ

НТ

У.КОК

ЛАЗЕРЫ И ГОЛОГРАФИЯ



Winston E. Kock

LASERS
AND HOLOGRAPHY

An Introduction
to Coherent Optics

NEW YORK DOUBLEDAY 1969

Уинстон Е. Кок
**ЛАЗЕРЫ
И ГОЛОГРАФИЯ**

ВВЕДЕНИЕ
В КОГЕРЕНТНУЮ
ОПТИКУ

Перевод с английского
Г. И. Кузнецова
Под редакцией и с послесловием
Я. А. Смородинского

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»
МОСКВА 1974

Кок Уинстон Е.

К59 Лазеры и голография. Пер. с англ. Г. И. Кузнецова. Под ред. и с послесл. проф. Я. А. Смолодинского. М., «Мир», 1971.

136 с. с илл. (В мире науки и техники)

Имя У. Кока уже известно советскому читателю по его книге «Звуковые и световые волны». В своей новой книге «Лазеры и голография» У. Кок доходчиво и просто рассказывает об основных понятиях и проблемах когерентной оптики. Дифракция, когерентность и удивительные свойства голограмм в изложении Кока станут понятными даже неподготовленному читателю. Особенно заинтересует книга студентов младших курсов и старшеклассников.

2-3-4
174-71

535

ПРЕДИСЛОВИЕ

Голография и фотография — это два способа записи на фотопленку информации о сцене (множестве предметов), которую видит наблюдатель. Но голографический и фотографический способы записи информации резко отличаются друг от друга. Так же различны и результаты этой записи — голограмма и фотоснимок. Голограмма в соответствии со своим названием (сочетание слов «голо» — полная, «грамма» — запись) отражает все стороны видимой картины, в том числе и объемность изображения. На фотографии же вся глубина реальных предметов зажата в одной плоскости.

Вероятно, фотография, впервые продемонстрированная в 1839 году французским ученым Луи Жаком Манде Дагерром, произвела столь чарующее впечатление, что многие поверили в единственность и совершенство этого метода. Дагерр искал и действительно нашел способ запечатлеть изображение, образованное на матовом стекле *камеры-обскуры*, прибора, который был изобретен еще в средние века. До Дагерра такой камерой пользовались главным образом художники, когда хотели сделать наиболее точные зарисовки. Камера-обскура представляла собой темный светонепроницаемый ящик, в одну из стенок которого вставлялась линза. Напротив линзы помещалось наклонное зеркало, а в верхней части камеры — матовое стекло, на котором и получалось изображение предмета. Это изображение можно было рассматривать или перерисовывать

на прозрачную бумагу. Дагерр предложил записывать его на изготовленном им самим новом светочувствительном материале. Многие, вероятно, думали, что о лучшем методе не стоит и мечтать. Но в 1947 году Дэннис Габор предложил новый остроумный метод фотографической записи трехмерного изображения сцены, сформулировав основы голографии. Как это часто бывает с открытиями, теперь очень трудно понять, почему о голографии не подумали раньше. Ведь, как мы увидим далее, голография — по существу совсем простой процесс фотографической записи интерференционной картины, образованной двумя наборами световых волн, один из которых называется *опорным пучком*. Еще за полстолетия до Габора французский ученый Габриэль Липпман предложил записывать на фотопластинку интерференционную картину световых волн, чтобы затем получать цветные фотографии. А примерно за два десятка лет до изобретения голографии опорные волны уже использовались в радиолокации. Таким образом, все элементы голографии были налицо, и нужен был лишь острый ум, чтобы объединить их в одну блестящую идею.

Это обстоятельство особенно хорошо должны уяснить молодые ученые и инженеры. На примере голографии, которая, несомненно, принесет большую пользу человечеству в будущем, наглядно видно, что всегда есть возможность высказать новые ценные идеи на основе старых понятий. Чтобы внести весомый вклад в научно-технический прогресс, вовсе не обязательно использовать достижения наиболее передовых отраслей науки; даже сегодня, чтобы сказать новое слово в бурно развивающейся технике, изобретателю человеку порой достаточно глубокого понимания всего лишь относительно простых процессов.

Хотя Габор сформулировал свою идею совсем недавно, тем не менее она была еще несколько преждевременной. Действительно, для изготовления голограмм требовались источники, испускающие свет строго определенной частоты (*монохроматический и когерентный свет*), а таких источ-

ников в 1947 году еще не существовало. Такие источники стали доступны исследователям лишь после 1960 года, когда впервые был изготовлен новый источник света — *лазер*. Лазеры испускают свет за счет *вынужденного излучения* атомами электромагнитных волн. Они получили свое название от начальных букв английского выражения Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation, что означает «усиление света вследствие вынужденного испускания излучения». Поскольку с теми источниками света, которыми располагал Габор в 1947 году, нельзя было продемонстрировать всей силы голографии, она на протяжении ряда лет оставалась незамеченной. Лишь в 1963 году американец Иммет Лейт применил в голографии лазеры*. Последующие исследования, проведенные Лейтом и другим американцем, Джорджем Строуком, а также их многочисленными коллегами по Мичиганскому университету, дали толчок развитию голографии.

Голограмма записывает интерференционную картину, образованную комбинацией опорной волны и световых волн, исходящих от сцены. После того как фотопластинка с голографической записью проявлена, снова осветив ее лазерным светом, можно наблюдать *восстановленное изображение* первоначальной сцены. Изображение получается настолько правдоподобным, что у наблюдателя появляется желание приблизиться к нему и потрогать руками. Голограмма представляется нам похожей на окно, через которое мы видим снятую сцену во всей ее глубине. Наблюдатель может смотреть на сцену с разных сторон: чтобы взглянуть за предмет на переднем плане, нужно лишь повести головой или приподнять ее, тогда как в стереофотографии старого типа, использующей два стереоснимка, объемное изображение можно наблюдать лишь под *одним* углом зрения. В фотографии всегда применяются линзы,

* Автор пропускает важное событие в истории голографии. В 1962 году Ю. Н. Денисюк предложил новый метод объемной голографии, широко известный в настоящее время.— *Прим. ред.*

поэтому, чтобы получить отчетливое изображение предмета, его следует помещать на вполне определенном расстоянии от фотоаппарата. Так как при голографировании предметов линзы обычно не используются, то голограмма одинаково четко регистрирует все предметы — и близкие и далекие.

Термин *голограмма* впервые использовал в своих работах Габор. Для голограммного процесса, конечно, можно придумать много названий, например *голограмметрия*. Джордж Струок, пионер исследований в этой области, предложил термин *голография*. Этот термин и стал общепринятым. Читатель получит общее представление о голографии из первой главы, где дано описание голограммного процесса в двух простых формах. Далее он познакомится с некоторыми основными понятиями волнового движения — когерентностью, дифракцией, интерференцией, а также устройством и работой лазеров. И наконец, собственно голограммы и их основные свойства рассматриваются в последней главе.

ГОЛОГРАММА КАК ВОЛНОВАЯ КАРТИНА

В этой главе мы попытаемся рассказать о голографии, оперируя самыми простыми понятиями. Мы рассмотрим голографию как фотографическую запись *интерференционной картины* двух наборов световых волн. Особенности голографии более подробно будут описаны в последующих главах.

СВОЙСТВА ВОЛН

Если в гладь пруда бросить камушек, на поверхности воды образуются расходящиеся кругами волны (рис. 1). Эта картина позволяет понять некоторые основные свойства волнового движения.

Волны на поверхности воды движутся от источника с

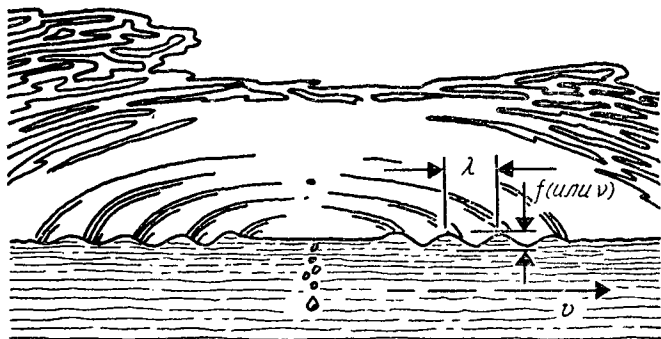


Рис. 1. Волны на поверхности пруда. Скорость v называется скоростью распространения волны; расстояние между соседними гребнями — длиной волны λ ; количество циклов движения данной точки вверх — вниз за одну секунду — частотой f (или ν).

волновой скоростью, или *скоростью распространения* v . Одной из существенных характеристик волнового движения является *длина волны*, то есть расстояние между двумя соседними гребнями, которое обычно обозначается буквой λ (рис. 1). Держа палец достаточно низко над поверхностью воды, мы могли бы ощущать каждый такой проходящий всплеск. Чем больше расстояние между следующими друг за другом волнами, тем реже их гребни будут касаться нашего пальца. Для того чтобы сказать, как часто (или сколько раз в секунду) гребни проходят через данную точку, вводится понятие частоты, обозначаемой буквой f (иногда ν).

Скорость, длина волны и частота (в данном случае *число колебаний в секунду*) связаны между собой следующим соотношением:

$$\text{Частота} = \text{Скорость} : \text{Длина волны},$$

то есть

$$f = \frac{v}{\lambda}.$$

Это значит, что чем короче длина волны, тем больше частота всплесков волн и, следовательно, тем больше скорость распространения, тем большее число волн проходит через данную точку. Если для скорости распространения волны принять ту же единицу длины, что и для длины волны, и ту же единицу времени (обычно секунду), что и для частоты, то приведенное выше уравнение не требует никаких коэффициентов пропорциональности.

Волны на поверхности воды движутся довольно медленно, поэтому картина их распространения достаточно наглядна. Звуковые же волны распространяются намного быстрее. Их скорость (скорость звука) равна 335,28 м/сек (свыше 965 км/час).

Звуковые волны с частотой 1100 колебаний в секунду (что приблизительно соответствует частоте ноты на две октавы выше среднего „до“ на фортепьяно) имеют длину волны 30,48 см.

С самой большой скоростью, равной 299,7925 км/сек, движутся световые волны в вакууме. Самая короткая длина волны в видимом спектре у фиолетового света — $4064 \cdot 10^{-8}$ см. Поскольку голограмма является фотографической записью волновой картины света, то, как мы уви-

дим в дальнейшем, использование волн видимой области света, которые имеют чрезвычайно короткую длину, предъявляет очень жесткие требования к фотопластинке.

ОДНОРОДНОСТЬ ВОЛН

Волны, изображенные на рис. 1, являются до некоторой степени необычными. Во-первых, они чрезвычайно упорядочены, во-вторых, они имеют одну и ту же длину волны. А вот если бы подул сильный ветер, то на той же поверхности пруда нам пришлось бы увидеть волны самой различной длины, распространяющиеся, вообще говоря, в самых различных направлениях, что создало бы крайне неупорядоченную волновую картину. Точно так же и для других типов волнового движения, в частности для движения звуковых и световых волн, единообразие волн (одинаковая длина волны) — явление не обычное. Например, любой

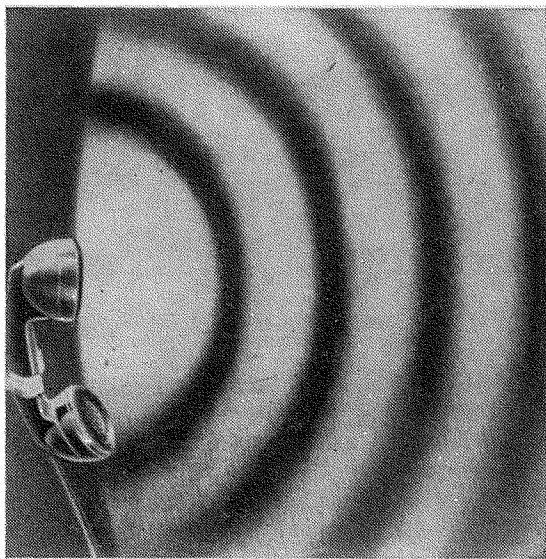


Рис. 2. «Фотопортрет» монохроматических звуковых волн, испускаемых телефонной трубкой. Телефонная трубka не обладает ориентирующей способностью, поэтому звуковые волны расходятся от нее во всех направлениях. Поперечное сечение сферической картины звуковых волн напоминает картину волн на поверхности воды.

шум содержит громадное количество волн самой различной длины волны, то есть представляет собой в высшей степени неупорядоченную волповую картину. То же самое можно сказать и о световых волнах, испускаемых обычной лампой накаливания.

Тем не менее можно создать и звуковые и световые волны, имеющие одинаковую длину волны, так называемые *монохроматические волны*. В этом случае они совершенно подобны волнам, изображенным на рис. 1. Так, на рис. 2 показана пространственно однородная картина звуковых

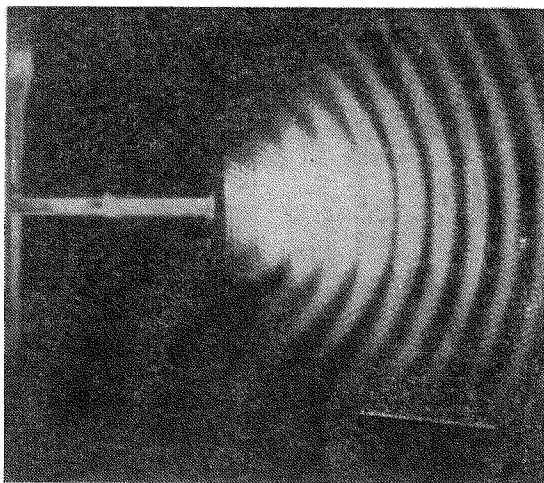


Рис. 3. Монохроматические микроволны, исходящие из волновода. Как и световые волны, они имеют электромагнитную природу.

волн одной частоты, испускаемых приемной частью телефонной трубки. Эта фотография звуковых волн была сделана путем тщательного сканирования всего звукового поля звукочувствительным микрофоном, преобразующим звуковой сигнал в световой, который затем уже воздействовал на фотопленку*. Сходство этой картины с картиной волн на воде, изображенной на рис. 1, вполне очевидно; на фотографии светлые области можно рассматривать как греб-

* Читатель может более подробно ознакомиться с техникой записи волновой картины, обратившись к книге автора «Звуковые и световые волны» (изд-во «Мир», 1966).

ни, а темные — как впадины. Аналогичная круговая картина для монохроматических микроволн — радиоволн с очень короткой длиной волны — показана на рис. 3; подобно световым волнам, они имеют электромагнитную природу (а не механическую, как звуковые волны, представленные на рис. 2).

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ

Когда простой набор монохроматических звуковых волн типа тех, что изображены на рис. 2, либо световых волн, подобных изображенным на рис. 3, накладывается на такой же однородный монохроматический набор волн, такое явление называется *интерференцией*. Обычно говорят, что в тех точках, где два набора волн складываются, происходит *конструктивная интерференция*, а в тех точках, где из одного набора волн вычитается другой, — *деструктивная интерференция*.

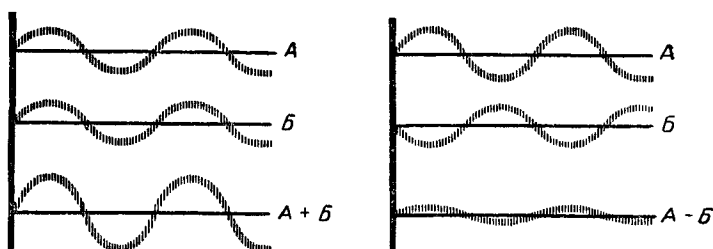


Рис. 4. Амплитуды двух волн с одинаковой длиной волны складываются (слева), если имеют одну и ту же фазу, и вычитаются (справа), если их фазы противоположны.

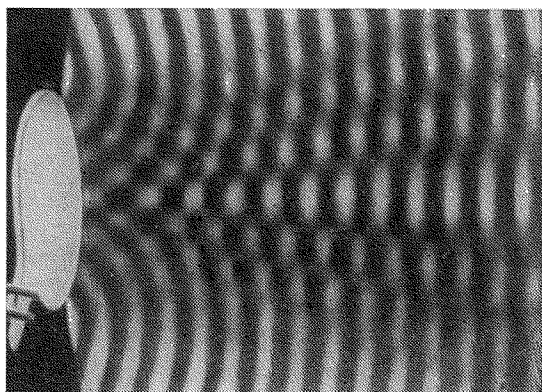
На рис. 4 слева изображен случай, когда *гребни* набора волн *A* складываются с гребнями набора волн *B*, в результате чего получается волна с большим гребнем, то есть происходит конструктивная интерференция. Деструктивная интерференция показана на рис. 4 справа. *Гребни* набора *A* складываются со *впадинами* набора *B*, что создает волну с меньшим гребнем. В случае звуковых волн такое увеличение или гашение волн влияет на степень громкости, а в случае световых волн интерференция вызывает изменение яркости или интенсивности света.

При интерференции двух простых наборов волн *интерференционную картину* (то есть положение максимумов и

минимумов) можно легко предсказать и нарисовать. Если же интерферируют два набора волн сложной структуры, то интерференционная картина становится весьма беспорядочной. На рис. 5 показана более сложная интерференция, образованная наложением простого набора звуковых волн на более сложный, сформированный краями деревянного диска. Мы рассмотрим эту картину более подробно в главе IV.

КАК СДЕЛАТЬ ГОЛОГРАММУ

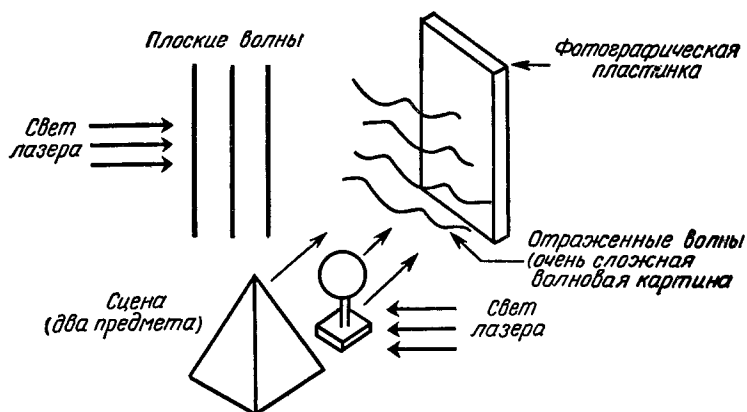
Чтобы получить *голограмму*, необходимо иметь два интерферирующих набора монохроматических световых



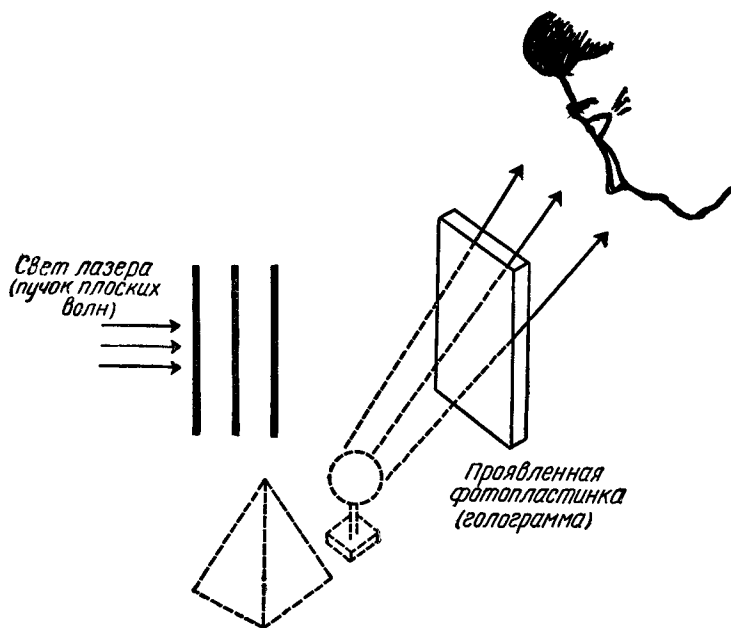
Р и с. 5. Интерференционная картина, образованная двумя наборами когерентных звуковых волн.

волн. Один набор волн обычно исходит от объекта и падает на фотопластинку. Почти всегда он представляет собой чрезвычайно сложную комбинацию волн. Другой набор более прост. Чаще всего это плоские волны. Такой набор волн называется *опорной* волной. Этот же или почти такой же набор волн используется для освещения проявленной фотопластинки, голограммы, когда наблюдатель хочет посмотреть «сфотографированный» предмет.

На рис. 6 показаны два набора волн, которые интерферируют на фотопластинке. В качестве объектов для съемки взяты пирамида и шар. Как для освещения предметов мо-



Р и с. 6. Процесс изготовления голограммы. Сцена (предметы) освещается светом лазера. Отраженный от нее свет интерферирует с опорным пучком, исходящим от того же лазера. Полученная интерференционная картина записывается на фотопленку.



Р и с. 7. Воспроизведение сцены голограммой. При освещении проявленной фотопластинки тем же лазерным опорным пучком, который использовался в процессе изготовления голограммы (рис. 6), наблюдатель видит за нею (как за окном) восстановленное изображение первоначальной сцены.

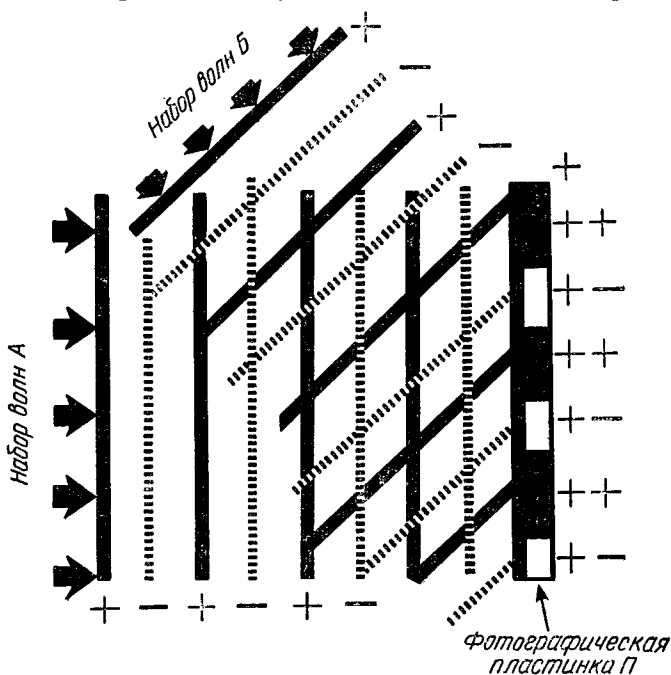
похроматическим светом, так и для создания пучка плоских волн (опорного пучка) используется один и тот же лазер. Поскольку волновой фронт набора волн, исходящих от снимаемых предметов, очень неупорядочен, интерференционная картина в этом случае будет чрезвычайно сложной, намного сложнее, чем на рис. 5. После экспозиции фотопластинку проявляют и закрепляют, в результате чего получается голограмма. Если эту голограмму осветить, как показано на рис. 7, тем же лазерным светом, который использовался в качестве опорной волны, то наблюдателю покажется, что он видит предметы (шар и пирамиду) во всех трех измерениях.

ФОТОГРАФИЧЕСКАЯ РЕШЕТКА

Чтобы понять, как с помощью волновой интерференционной картины, записанной на фотопластинку, можно воссоздать реальный образ предметов, сначала следует изучить две простые интерференционные картины. Первая из них образована наложением двух наборов плоских волн. Как показано на рис. 8, в результате комбинации двух наборов волн A и B на фотопластинке получается целый ряд горизонтальных линий, на которых происходит сложение положительных гребней двух наборов волн, усиливающих друг друга (эти линии обозначаются как «+ +»). Ослабление же волновых наборов происходит в тех местах, где гребень встречается со впадиной (эти линии обозначаются как «+ —»). Интенсивность света больше вдоль тех линий, где световая энергия складывается, соответственно там сильнее освещается фотопластинка. И наоборот, вдоль тех линий, где существует ослабление энергии, фотопластинка освещается меньше. Параллельные полосы света снимаются на фотопленку, которую проявляют и закрепляют. На фотопленке полосы света имеют вид прямых линий. Фотозапись такого типа показана на рис. 9.

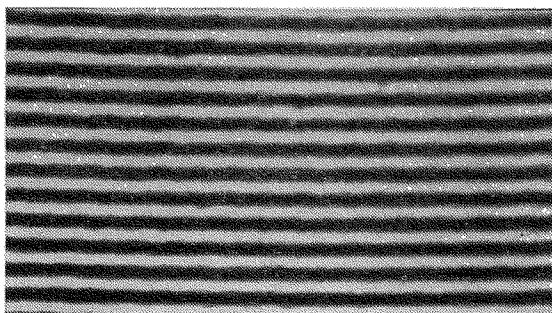
Изображенная на рис. 9 фотопластинка представляет собой *дифракционную решетку*. Это хорошо известный оптический прибор; обычно при его изготовлении на куске стекла делают насечки в форме расположенных близко друг к другу параллельных линий. Если на такую или фотографическую решетку направить горизонтальный пучок параллельных плоских волн, то волны будут искажаться ею. Картина прохождения света через решетку изображе-

на на рис. 10. Большая часть световых волн проходит сквозь решетку, совершенно не отклоняясь от первоначального направления; так через прозрачную заснятую, проявленную и закрепленную фотопленку проходит свет. Кроме того, возникают еще и восстановленные решеткой волны, которые имеют ту же длину волны; линии решетки

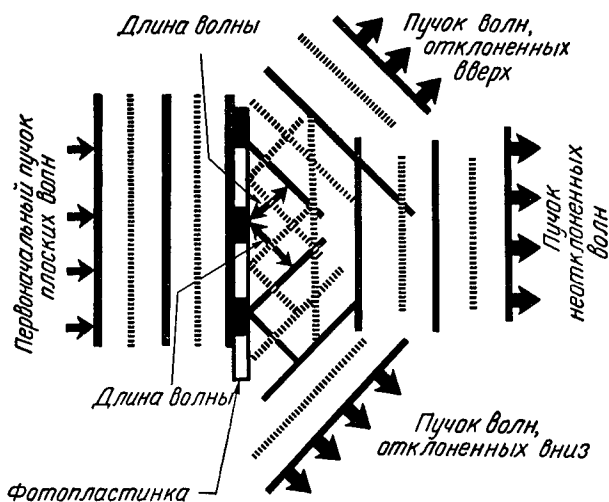


Р и с. 8. Интерференция двух монохроматических наборов плоских волн одинаковой частоты. В тех местах, где гребни и впадины одного набора совпадают с гребнями и впадинами другого, происходит сложение волн, в тех же местах, где гребни одного набора волн совпадают со впадинами другого, происходит вычитание волн.

отклоняют часть энергии. Рассматривая рис. 4, мы видели, что при совпадении гребней волн интенсивность волн возрастает. То же самое может произойти, если два набора волн следуют один за другим, *отставая* на полную длину волны (или на целое число длин волн). Иными словами, сложение гребней волн, показанных в левой части рис. 4, происходило бы и тогда, когда нижняя волна отставала бы от верхней или опережала ее на полную длину волны.



Р и с. 9. Фотозапись интерференционной картины плоских световых волн. В плоскости фотографической пластинки интерференционная картина световых волн представляет собой ряды светлых и темных полос (рис. 8).



Р и с. 10. Прохождение света через дифракционную решетку. Если фотопластинку, изображенную на рис. 7 (с линейчатой структурой, представленной на рис. 8), осветить плоскими световыми волнами, движущимися в горизонтальном направлении, то первоначальный пучок плоских волн расщепится на три пучка плоских волн: пучок плоских волн, движущихся в направлении падающего пучка, пучок волн, отклоненных вверх, и пучок волн, отклоненных вниз.

Это же характерно и для решетки, изображенной на рис. 10. Энергия волн, проходящих через просветленные участки решетки, будет складываться не только в первоначальном (горизонтальном) направлении, но и в двух других направлениях при условии, что разность хода волн, идущих через соседние просветленные участки решетки, равна длине волны. На рис. 10 показаны эти два побочных направления: одно из них соответствует отклонению (дифракции) потока энергии вверх, другое — вниз. Причем для верхнего направления характерно, что волны, проходящие через верхний прозрачный участок, опережают на длину волны волны, исходящие из *нижнего* прозрачного участка; для нижнего направления картина опережения (отставания) будет обратной. Таким образом, волны, проходящие через прозрачные части решетки, складываются конструктивно в только что показанных трех направлениях; два из этих направлений соответствуют направлениям распространения дифрагированных волн.

В частности, заметим, что нижнее направление дифрагированного потока волн есть не что иное, как направление движения первоначального потока *B* на рис. 8 в случае, если бы не было фотопластины. Поэтому, когда наблюдатель рассматривает фотопластинку в восстановительном потоке волн, ему представляется, что источник первоначального потока волн *B* (рис. 8) находится еще позади голограммы. Итак, фотографическая *голограммная решетка* способна «порождать», или восстанавливать, картину распространения волн уже после того, как это распространение перестало существовать. Голограммная решетка, изображенная на рис. 10, порождает также и второй набор волн — поток волн, отклоненных вверх, которых вначале не было.

ФОТОГРАФИЧЕСКАЯ ЗОННАЯ ПЛАСТИНКА

В голографии наложение плоских и сферических волн приводит к интересным и важным интерференционным явлениям. В этом случае вместо системы параллельных полос (рис. 9) мы получаем кольцевую картину, поперечное сечение которой изображено на рис. 11. Как и в случае, представленном на рис. 8, параллельные плоские волны (набор *A*), движущиеся слева направо, интерферируют со сферическими волнами (набор *B*), исходящими от

источника P . Полученная интерференционная картина записывается на фотопластинке. Аналогично рис. 8 здесь также есть участки, где волны складываются, и участки, где волны гасятся. Однако в случае интерференции плоских и сферических волн с увеличением расстояния от централь-

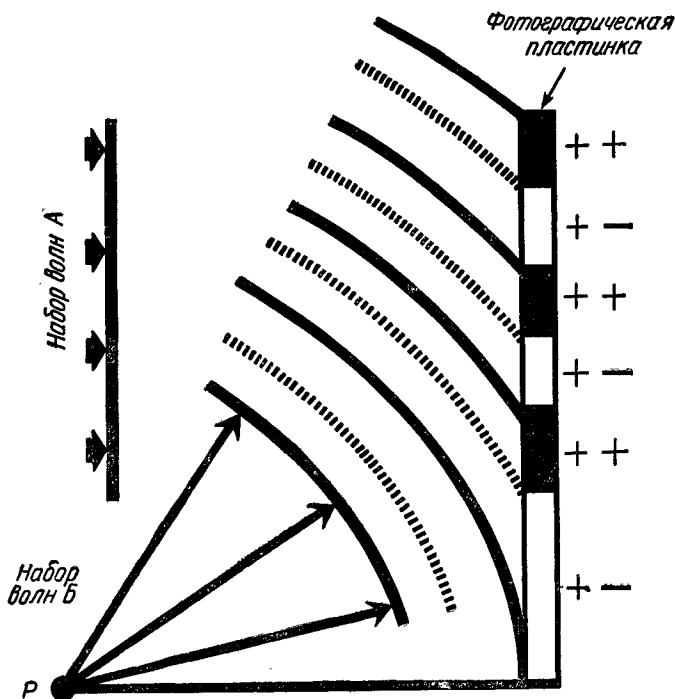
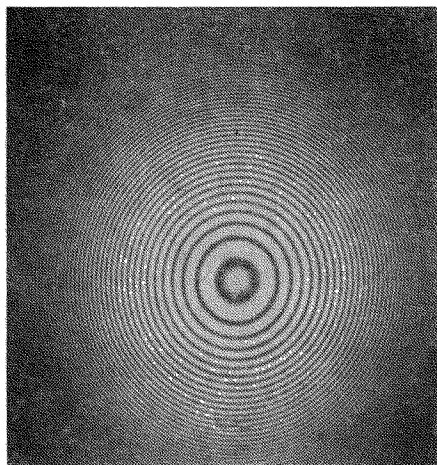


Рис. 11. Интерференция двух монохроматических наборов волн, плоского и сферического. Интерференционная картина имеет форму концентрических колец. Ширина полос и промежутки между ними с увеличением расстояния от центральной оси непрерывно уменьшаются.

пой оси ширина полос и расстояние между ними уменьшаются. Однородность пространственной картины параллельных полос исчезает. Сферические волны порождают систему концентрических колец, а не параллельных полос. Интерференционная картина такого типа показана на рис. 12. Она получилась в результате интерференции плоской световой волны и монохроматической волны от точечного источника. Картина, изображенная на рис. 9, называется

решеткой, а картина на рис. 12 — *зонной пластинкой*. Сходство между голограммами и зонными пластинками впервые отметил в 1950 году английский ученый Дж. Л. Роджер. Линии участков зонной фотопластинки на рис. 12, расположенных вдали от центра изображения, но лежащих вблизи любого луча, например вертикального, похожи (за исключением небольшой кривизны) на горизонтальные линии, изображенные на рис. 8 и 9.



Р и с. 12. Фотозанпись интерференционной картины плоского и сферического монохроматических наборов волн. В плоскости фотографической пластинки интерференционная картина световых волн представляет собой систему светлых и темных концентрических колец (рис. 11).

Таким образом, если эту фотопластинку осветить плоскими волнами, то, как и в случае с фотопластинкой на рис. 9, следует ожидать, что и здесь появятся три набора волн. Эта картина показана на рис. 13. Как и прежде, часть падающего слева направо потока плоских волн проходит через прозрачные участки фотопластинки, не отклоняясь от первоначального направления. Круговые полосы, находящиеся вдали от центра, действуют на проходящий свет аналогично горизонтальным линиям пластинки, изображенной на рис. 9: они отклоняют световой поток вверх и вниз от первоначального направления. Однако, поскольку картина полос является круговой, волны, отклоненные

вверх, имеют сферический волновой фронт, их как бы испускает источник P_V . Это так называемое *мнимое изображение* первоначального точечного источника света P (мнимое, поскольку в восстановительном процессе такого источника в действительности нет). Если свет, отклоненный вверх,

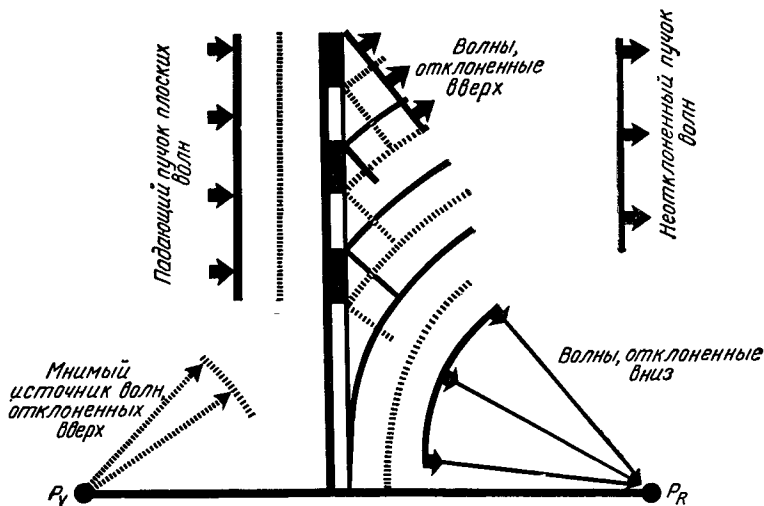


Рис. 13. Прохождение света через фотографическую зонную пластинку. Если на верхнюю часть фотопластинки, изображенной на рис. 12 (этот процесс показан на рис. 11), направить первоначальный пучок плоских волн (пучок A), то, пройдя сквозь пластинку, этот пучок расщепится на три пучка: неотклоненный пучок плоских волн, пучок расходящихся волн, испущенных как бы первоначальным источником сферических волн (рис. 11), и пучок волн, сходящихся в точке, расположенной справа от фотопластинки.

попадает в глаз наблюдателя, то независимо от того, как наблюдатель поворачивает голову, у него создается впечатление, что за фотопластинкой действительно находится точечный источник света. Более того, это мнимое изображение находится в том же самом месте, где при фотографировании помещался первоначальный источник световых сферических волн.

Кроме рассмотренных двух потоков волн, существует еще, как и в случае, представленном на рис. 10, третий набор волн. На рис. 13 этот набор волн показан движущимся вниз. Так как падающий свет проходит сквозь круговые полосы, поток волн, идущих вниз, сходится в одной точке,

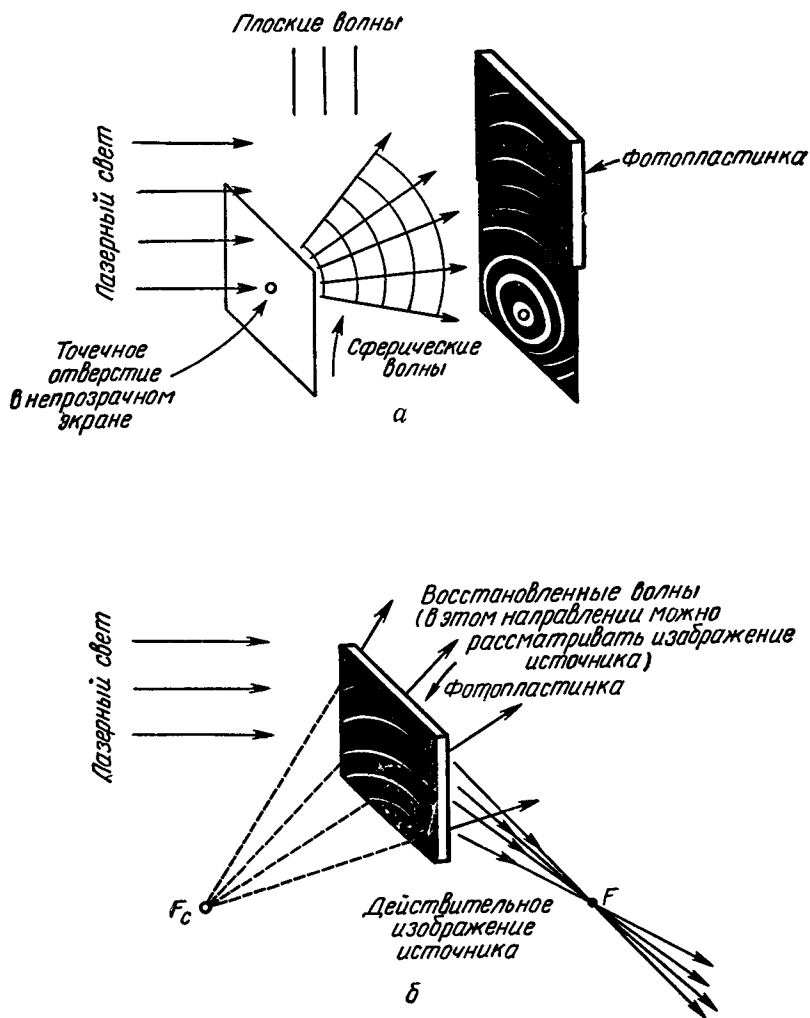


Рис. 14. Процесс получения и использования голограмм. Плоские волны, интерферируя со сферическими волнами, исходящими из точечного отверстия в непрозрачном экране, порождают волновую картину. Записанная на фотопленке, она представляет собой систему концентрических колец (а). Облучая такую фотопленку (фотографическую зонную пластинку) лазерным светом, можно восстановить волны, исходящие как бы из отверстия в непрозрачном экране (б).

которая расположена на том же расстоянии от фотопластинки, что и точка мнимого изображения, только с другой стороны. Круговые полосы создают *действительное изображение* P_R первоначального источника света P (действительное изображение, поскольку, помещенный, например, в точке P_R листок бумаги показал бы, что в данном месте в самом деле сконцентрирован свет).

ПОЛНЫЙ ГОЛОГРАММНЫЙ ПРОЦЕСС

Процесс получения и использования голограмм показан на рис. 14. Фотографируемым объектом и одновременно источником сферических волн здесь является маленькое отверстие в непрозрачном куске картона. Сферические волны интерферируют с плоскими волнами, движущимися

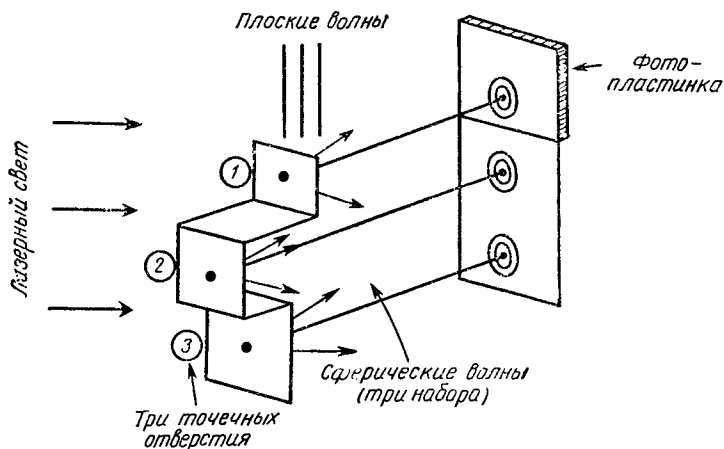


Рис. 15. Процесс получения трех зонных картин. Если вместо одного экрана с точечным отверстием (рис. 14) взять три экрана (в каждом по одному отверстию), расположить их в разных вертикальных плоскостях и осветить лазерным светом, то на фотопластинке получатся три зонные картины. Рассматривая такую фотопластинку в лазерном свете, мы увидим три отверстия, находящиеся в тех же самых местах, что и при «фотографировании». Более сложные трехмерные предметы можно рассматривать как совокупность большого количества точечных источников света, каждый из которых будет формировать на фотопленке свою собственную зонную пластинку, которая в свою очередь будет восстанавливать изображение своего собственного источника света, причем это изображение будет в том месте, где находился исходный источник.

слева направо, и интерференционная картина (главным образом ее верхняя часть) запечатляется на фотопластинке, которую затем проявляют и закрепляют. Если осветить такую фотопластинку плоскими световыми волнами, как это показано на рис. 14, б, то в точке F_c , сопряженной с фокусом, появится мнимое изображение точечного отверстия. Попав в глаз, лучи, отклоненные вверх, вызвали бы у наблюдателя иллюзию, что он видит первоначальный свет от точечного источника (дырки). Как показано на рис. 14, действительное изображение точечного отверстия (фокусированное изображение) находится в самом фокусе. При обычном рассмотрении голограммы это изображение не используется. Волны, прошедшие через фотопластинку без отклонения, на рис. 14 не изображены.

Аналогичный случай представлен и на рис. 15. Только здесь источниками сферических волн служат не одно, а три точечных отверстия, расположенных в различных горизонтальных и вертикальных (перпендикулярных падающим лучам света) плоскостях. Мы видим, что каждый из трех источников порождает свою собственную круговую (многокольцевую) картину, то есть в отличие от случая, показанного на рис. 14, на фотопластинке рис. 15 сфотографированы три интерференционных картины (следует отметить, что на рис. 15 в каждой из трех интерференционных картин изображены лишь две центральные интерференционные полосы). Для дальнейшего вполне достаточно сфотографировать лишь верхние части (лучше даже узкие ленты вдоль вертикального направления) каждой из трех интерференционных картин. После проявления и закрепления пленка, как и в случае с одним точечным отверстием (рис. 14), освещается лазерным светом. В результате этого появляются три набора волн, отклоненных вверх, и три набора сфокусированных волн, отклоненных вниз. Особенно важным для голографии является то обстоятельство, что каждый из наборов волн, отклоненных вверх, порождает мнимое изображение точечного отверстия, а каждый из наборов волн, отклоненных вниз,— действительное изображение. Мнимые изображения вызывают у наблюдателя ощущение, что он видит три *реальных* точечных источника света, расположенных в различных, но фиксированных точках трехмерного пространства. При некотором угле наблюдения источник номер три мог бы заслонить собой источник номер два. Однако стоит лишь наблюдателю слегка повер-

нуть голову вправо, влево, вверх или вниз, и он сможет снова увидеть около источника номер три источник номер два, как бы проверяя тем самым, что источник номер два существует.

ГОЛОГРАММА ПРЕДМЕТА

Все точки любого предмета, которые мы видим, с определенной степенью либо излучают свет, либо отражают его. Аналогично отражают свет все точки предмета, освещенного лазерным светом. Каждая точка предмета имеет свою степень яркости и, кроме того, каждая точка, отражающая свет, является как бы источником лазерного света. Если свет, исходящий от точки, интерферирует с опорной лазерной волной, то на фотопластинке каждая точка предмета дает свою собственную круговую интерференционную картину. В результате наложения таких интерференционных картин получается очень сложная интерференционная картина, записав которую на фотопластинке, мы получим голограмму такого же типа, как на рис. 6. Если теперь проявленную и закрепленную голограмму осветить параллельным пучком, то мы увидим реконструкцию всех исходных источников света, расположенных в правильном порядке. Голограмма порождает полную иллюзию реальной трехмерной пространственной сцены.

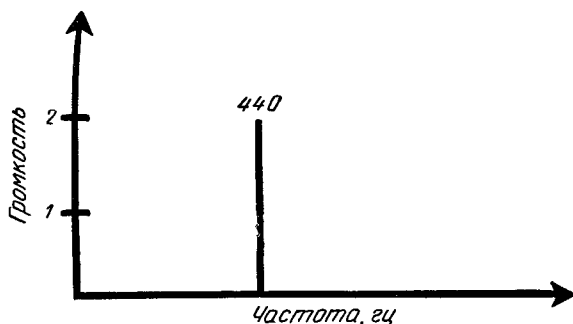
Глава II

КОГЕРЕНТНОСТЬ (МОНОХРОМАТИЧНОСТЬ) *

В предыдущей главе мы использовали для получения голограмм волны, имеющие одинаковую длину волны, или — что то же самое — одну и ту же частоту. Обычно говорят, что такие волны обладают хорошей *монохроматичностью*, или *частотной когерентностью*. Световые волны с чрезвычайно высокой степенью частотной когерентности дает лазер (особенно газовый лазер). Поскольку когерентные волны очень важны в голографии, рассмотрим подробнее, что такое когерентность.

ЧАСТОТНАЯ КОГЕРЕНТНОСТЬ

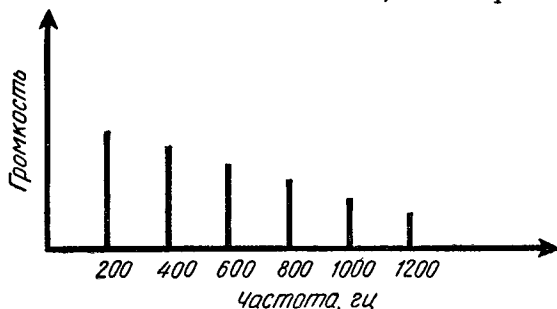
Мы уже говорили, что некоторые волны на поверхности воды, некоторые звуковые и световые волны являются монохроматическими довольно однородными волнами. Чтобы



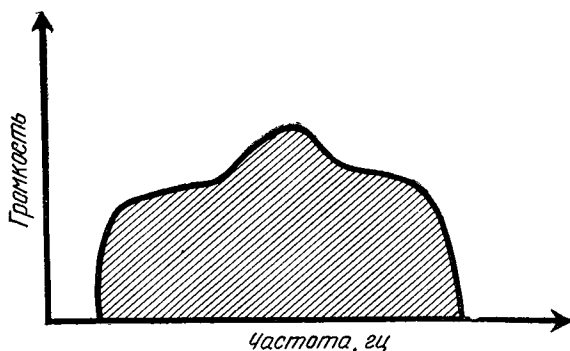
Р и с. 16. Спектральное представление монохроматического сигнала. Способ изображения волны (в частности, звуковой), имеющей одну частоту.

* См. послесловие.

лучше понять природу частотной когерентности (степень частотной когерентности), рассмотрим, правда лишь графически, метод *частотного анализа* волн. Такой анализ дан на рис. 16 для монохроматической звуковой волны. По горизонтальной оси отложена частота, а по вертикальной —



Р и с. 17. Способ изображения периодической волны, содержащей много гармоник. Частоты этих гармоник в целое число раз превышают основную частоту.



Р и с. 18. Способ изображения шума — непериодической волны, имеющей широкий спектр частот.

амплитуда, или громкость, каждой частотной компоненты. На рис. 16 показана монохроматическая звуковая волна с частотой, или высотой тона, равной 440 колебаниям в секунду (что соответствует ноте «ля»), и громкостью, равной двум (в произвольных единицах). Это пример тона с очень высокой степенью частотной когерентности.

На рис. 17 показан анализ более сложной звуковой волны. Такая волна содержит в себе основной тон (наиниз-

шая частота тона) и множество обертонов, находящихся в гармоническом соотношении с основным тоном. Подобно монохроматическому звуку, такой звук также является музыкальным, поскольку частота его обертонов в целое число раз больше частоты основного тона.

Еще более сложен по своей структуре шум. Шумы слишком неупорядоченны и поэтому малокогерентны. Примером таких шумов могут быть рев реактивного самолета и завывание ветра в штормовую погоду. Эти звуки имеют широкий непрерывный спектр частот. Примерный анализ звукового шума представлен на рис. 18.

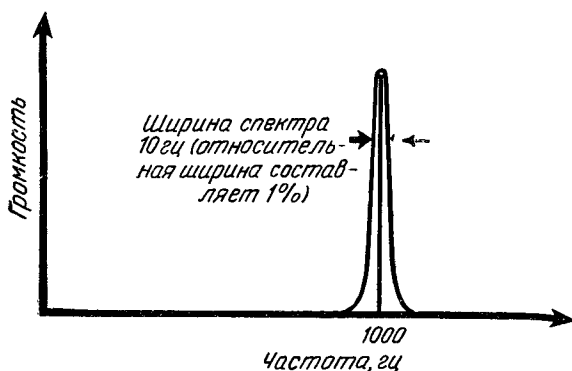


Рис. 19. Частотный спектр непериодической волны, которая по своей природе очень близка к периодической.

О звуке с частотной диаграммой, показанной на рис. 16, говорят как о совершенно чистом монохроматическом звуке. Другими словами, этот звук имеет *бесконечную* частотную когерентность. В действительности таких абсолютно совершенных волн нет. Однако можно указать, в какой степени волна *приближается* к совершенной. На рис. 19 показано спектральное представление звука, близкого к шуму с очень узкой полосой частот. Величина, равная отношению ширины полосы частот к центральной частоте, говорит о том, насколько данный звук отличается от монохроматического. На рис. 19 ширина звуковой частотной полосы 10 гц, а центральная частота 1000 гц. Это значит, что для такого звука разброс частот составляет один процент или что относительная ширина звуковой полосы равна одному проценту.

СТАБИЛЬНОСТЬ ЧАСТОТЫ

Существует еще один способ показать, насколько когерентная волна отличается от совершенной. Для этого необходимо знать стабильность ее частоты. Сам факт существования разброса частот свидетельствует о том, что частота звукового тона колеблется, увеличиваясь и уменьшаясь в пределах полосы частот. Другими словами, частота тона не является абсолютно постоянной, а может, к примеру, изменяться на один процент (рис. 19). Иначе говоря, нестабильность (или стабильность) частоты составляет одну сотую. Чтобы достигнуть высокой частоты звукового тона, или частотной стабильности, в электронных генераторах звуковых волн (так называемых *осцилляторах*), которые обычно используются в электронных органах, применяют всевозможные приспособления. При этом отпадает необходимость в периодической настройке инструмента. Частотная стабильность некоторых генераторов звуковых волн составляет одну миллионную, а иногда бывает даже меньше.

Обычно источниками радиоволн служат какие-либо электронные системы. Для радиоволн тоже можно добиться высокой стабильности по частоте, а поэтому и высокой когерентности. Мы уже видели на рис. 9 набор таких высококогерентных микрорадиоволн. Потребность в высокостабильных по частоте осцилляторах в некоторых областях прикладной радиофизики привела к созданию превосходного узкополосного радиоприбора *мазера*, в котором для получения высокой стабильности по частоте использовались отдельные процессы, происходящие в атомах. Этот прибор получил свое название от начальных букв выражения Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation, что означает «усиление микроволн вследствие вынужденного испускания излучения». Так, например, в водородном лазере можно достичь стабильности по частоте, которая недостижима ни в каком другом приборе и составляет 10^{-12} . В дальнейшем принцип работы мазеров был перенесен на область световых волн. Такие «осцилляторы» световых волн, имеющие очень высокую когерентность, нашли свое место в технике. Теперь эти оптические мазеры называют *лазерами* (Light Amplification — усилители света, а не Microwave Amplification — усилители микроволн).

Для получения голограмм наиболее часто используется газовый лазер, имеющий высокую стабильность по частоте. Другие виды лазеров, в частности импульсный лазер, дают очень интенсивный, но менее когерентный свет. Свет всех ранее известных источников (одним из них пользовался Габор в 1947 году) менее интенсивен и менее когерентен.

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ КОГЕРЕНТНОСТЬ

Таким образом, лазеры испускают свет с очень высокой частотной когерентностью. Однако для голографии важен еще второй тип когерентности, а именно *пространственная когерентность*.

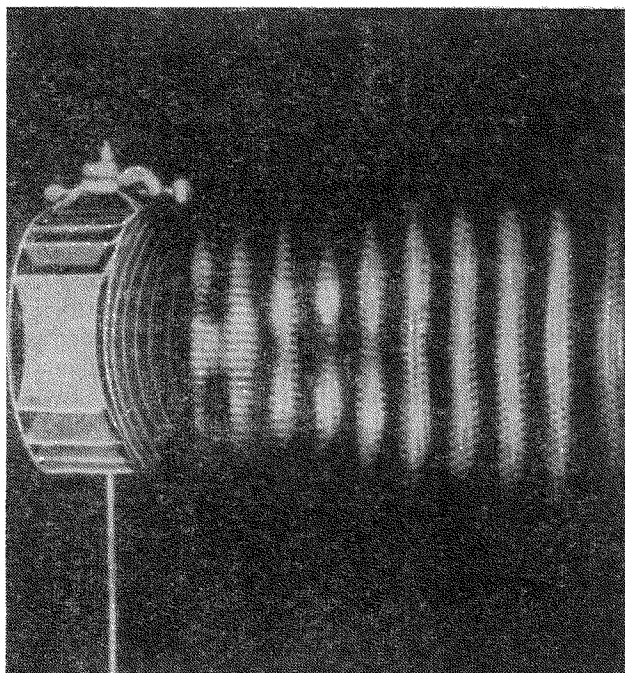
На большинстве рисунков предыдущей главы были показаны очень однородные монохроматические волны. Однородные волны нужны в голографии в такой же степени, как и монохроматические. Это требование особенно очевидно, если рассматривать однородность опорного пучка. Исходящие от когерентного лазера плоские световые волны, пройдя сквозь матовую стеклянную пластинку, перестают быть плоскими. Они становятся очень неупорядоченными и перемешанными. Мы уже говорили, что при восстановлении голограммы восстанавливающий луч должен быть похож на опорный луч, в противном случае мы не получим точного изображения. Если бы первоначально использованный опорный пучок был слишком неупорядоченным, то возникла бы довольно трудная проблема — отыскать для процесса восстановления изображения второй точно так же неупорядоченный пучок.

КОГЕРЕНТНЫЕ ВОЛНЫ ОТ МАЛЫХ ИСТОЧНИКОВ

Итак, для голографии необходимы как пространственная, так и частотная когерентность волн. К счастью, существуют генераторы, которые порождают волны с хорошей частотной когерентностью, причем эти же генераторы обычно могут образовывать волны с хорошей пространственной когерентностью.

Пространственную когерентность для звуковых волн и микроволн легко получить, поскольку сами волновые генераторы можно сделать очень маленькими (размеры порядка длины волны). Мы уже видели на рис. 2, что расстояние

между двумя гребнями звуковых волн (длина волны) значительно больше размеров отверстия приемной части телефонной трубки, которая является источником этих волн. То же самое мы видим и на рис. 3: очень короткие радиоволны, которые называются микроволнами, испускает маленькая прямоугольная металлическая трубка, показанная слева. Такая трубка называется *волноводом*, причем размеры этой трубки меньше, нежели длина волны (3,3 см), которые она излучает. Итак, и звуковые волны и микроволны могут порождаться источниками, размеры которых порядка длины волны или еще меньше.



Р и с. 20. Превращение сферических волн, испущенных волноводом (рис. 3), в плоские. На снимке запечатлена интерференционная картина пучка микроволн, прошедших микроволновую линзу, и опорного пучка микроволн (см. в этой связи рис. 21). Этот снимок можно рассматривать как микроволновую голограмму, на которой белые вертикальные полосы соответствуют областям конструктивной интерференции микроволн.

На рис. 20 показано, как с помощью металлической микроволновой линзы можно преобразовать круговую картину микроволн, исходящих из волновода (левая часть снимка), в плоскую (правая часть снимка). Следовательно, когерентные микроволны, так же как и когерентные звуковые волны, можно превратить в когерентные плоские волны. Как сферические звуковые волны (рис. 2) и сферические микроволны (рис. 3) структурно аналогичны световым сферическим волнам (рис. 11), так и плоские микроволны (рис. 20) аналогичны плоским световым волнам (рис. 11).

МИКРОВОЛНОВАЯ ГОЛОГРАММА

Интересно отметить, что фотографическую запись (рис. 20), впервые опубликованную в 1951 году автором и его коллегой Флойдом К. Гарвеем, можно рассматривать

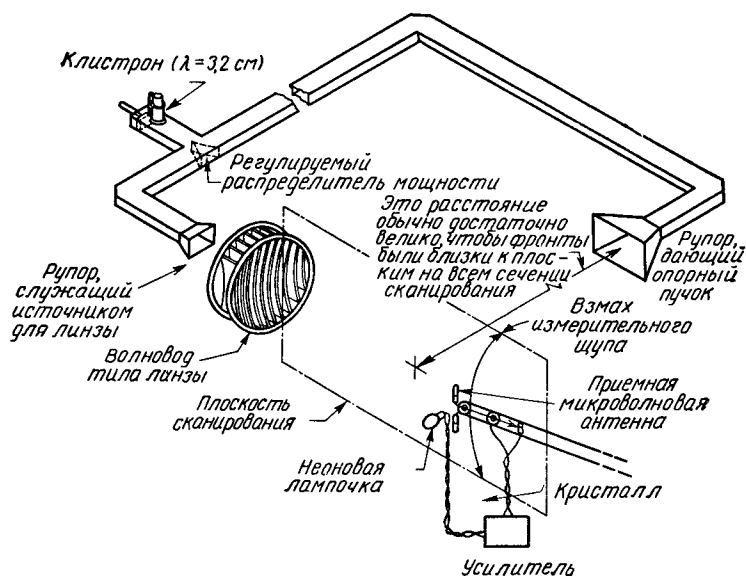


Рис. 21. Получение микроволновой голограммы. Пучок когерентных микроволн, испущенных клистроном, расщепляется на два пучка (один из них служит опорным пучком), которые затем интерферируют друг с другом. Микроволновая интерференционная картина с помощью механизма сканирования преобразуется в картину световых волн, которая и фотографируется камерой.

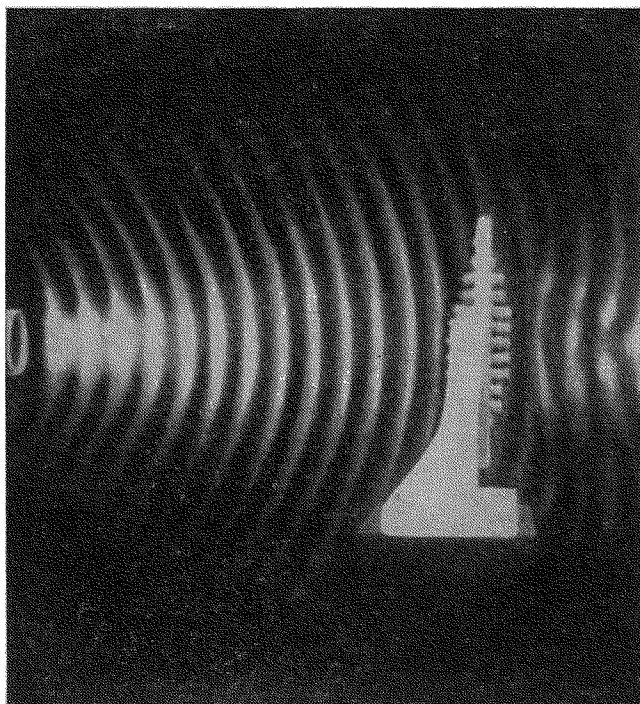
как одну из первых голограмм. Способ ее получения показан на рис. 21. Поскольку это микроволновая голограмма, то для световых волн она невидима. Единственным источником когерентных волн в то время был микроволновый генератор — клистрон. Порождаемый клистроном поток волн разделялся на два потока: один из них проходил через линзу, второй был опорным. На рис. 21 он исходит из рупора, расположенного в правой части системы. Интерференционная картина двух таких наборов волн была сфотографирована примерно таким же способом, как и интерференционная картина звуковых волн, изображенных на рис. 2 (между прочим, эту фотографию можно считать *акустической* голограммой). Для сканирования микроволнового поля был изготовлен микроволновый детектор. К детектору была приставлена неоновая лампочка, яркость которой изменялась в соответствии с изменением интенсивности микроволнового поля в каждой его точке. Это изменение интенсивности фотографировалось набором камер. Полученная картина имела вид бахромы (ряд белых вертикальных линий), что соответствовало интерференционной картине между интересующим нас микроволновым пучком и опорным пучком, то есть была получена голограмма. Все это делалось для того, чтобы волновую картину можно было наблюдать визуально. Голографической природы снимка тогда никто не понял.

ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЕ АКУСТИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ

На рис. 22 показано, как проходят через акустическую линзу сферические звуковые волны, источником которых является рупор. Линза преобразует расходящиеся волны в сходящиеся, а в окрестности фокуса сходящиеся волны снова становятся расходящимися, причем эта картина излучения аналогична той, какая была бы получена от источника звука (такого же, как рупор на рис. 22 слева), помещенного в фокус линзы.

Сравним волновые картины, представленные на рис. 22 и 13. Уже с первого взгляда видно, что сходящиеся справа за линзой звуковые волны можно сопоставить со сходящимися волнами, которые формируют действительное изображение предмета в точке P_R на рис. 13. Сходящиеся звуковые волны также создают «действительное» изображение, то есть звуковая энергия оказывается сконцентрированной

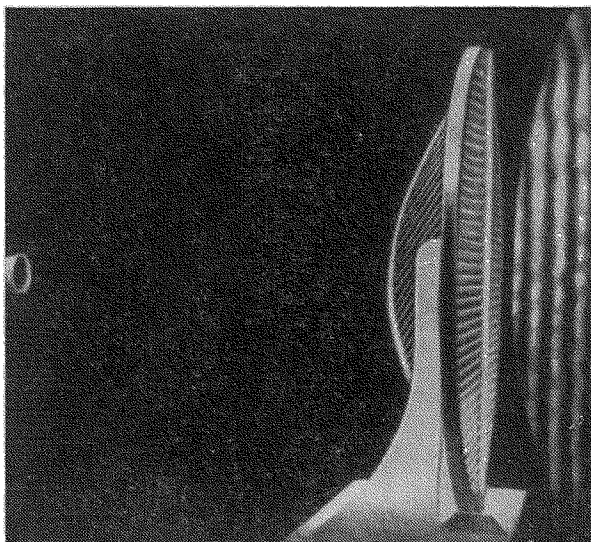
в окрестности фокуса, о чем свидетельствуют белые полосы, которые становятся все шире, короче и ярче. Справа от фокуса волны вновь расходятся, как если бы они исходили от нового источника. Наблюдателю, находящемуся



Р и с. 22. Картина прохождения сферических звуковых волн через акустическую линзу. Расходящиеся кругами звуковые волны, испускаемые рупором (слева), после преломления в линзе стали справа от нее сходящимися волнами, имеющими круговые фронты. После того как такие волны проходят фокус линзы, они снова становятся расходящимися.

справа от линзы на далеком от нее расстоянии, казалось бы, что такой источник расположен в фокусе линзы, точно так же как наблюдатель, рассматривающий голограмму (рис. 13), считал бы, что восстановленные лучи идут от источника света, помещенного в точке P_V . На самом же деле концентрация волн на рис. 22 есть действительное изображение, а на рис. 13 — мнимое. (Позднее мы увидим,

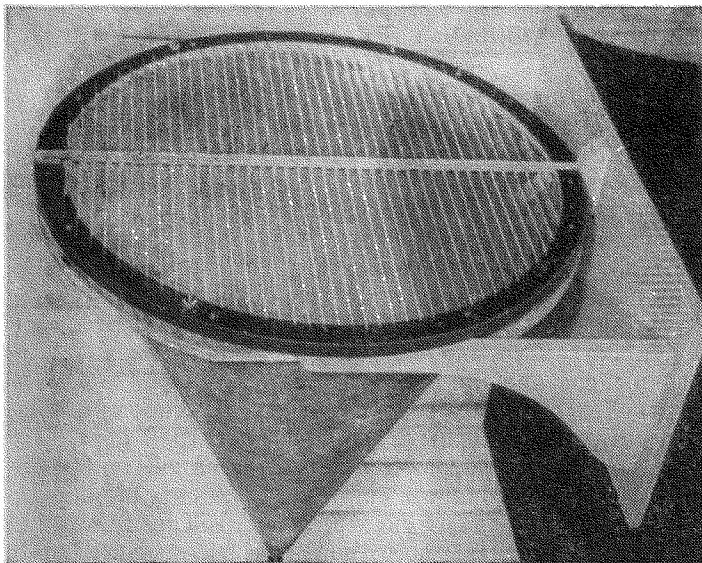
что в некоторых голограммах действительное изображение может быть столь же реалистичным, как и мнимое, которое обычно показывается в голографии.) На волны, проходящие выше линзы, последняя не действует, и поэтому они не меняют своего направления движения, как не изменили



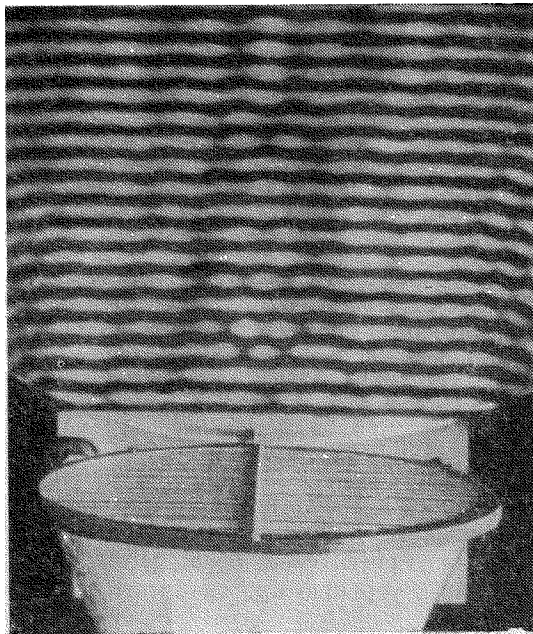
Р и с. 23. Превращение сферических волн в плоские с помощью акустической линзы. Испускающий волны рупор помещен в фокусе линзы.

своего направления, пройдя через голограмму, волны нулевого порядка на рис. 13.

На рис. 23 показано, как можно преобразовать волны с высокой частотной когерентностью в волны с высокой пространственной когерентностью. Маленький рупор (тот же, что и на рис. 22) является источником сферических волн, которые затем с помощью большой акустической линзы превращаются в плоские волны с «большим» фронтом волн. Эта же линза, вмонтированная в апертуру акустического рупора, или мегафона, показана на рис. 24. Такая система преобразует расходящиеся внутри рупора сферические волны в плоские, что и показано на рис. 25. Для рассмотренного случая звуковых волн поперечник линзы был приблизительно равен тридцати длинам волны.



Р и с. 24. Акустическая линза, смонтированная в апертуру конического рупора.



Р и с. 25. Действие акустической линзы. Помещенная в апертуру конического рупора акустическая линза обеспечивает направленность звуковых волн.

СВЕРХКОРОТКОВОЛНОВЫЙ СВЕТ

Обычно световые волны имеют очень короткую длину волны. Мы уже отмечали, что длина волны фиолетового света $4064 \cdot 10^{-8}$ см, то есть диаметр 4,064 см оптической линзы превышает длину волны фиолетового света в 100 000 раз. Поскольку длина световых волн чрезвычайно мала, то невозможно построить генератор световых волн, размеры которого были бы порядка длины волны света. Поэтому для получения пространственно когерентных световых волн все только что рассмотренные системы, генерирующие пространственно когерентные звуковые волны или радиоволны, совершенно непригодны.

Таким образом, чтобы создать когерентный свет, необходимо достигнуть, во-первых, хорошей частотной когерентности, а во-вторых, хорошей пространственной когерентности. Обычные источники света, такие, как, например, лампы накаливания, дают спектр, подобный шуму, с ничтожно малой степенью частотной когерентности. Кроме того, их излучающая поверхность намного превосходит длину волны света. Даже если представить, что каждый крошечный участок излучающей поверхности генерирует свет одной частоты, то все равно пространственной когерентности не было бы, поскольку миллионы крошечных источников светящейся поверхности независимо друг от друга излучали бы свет совершенно беспорядочно. Такой свет с высокой частотной когерентностью, но совершенно низкой пространственной когерентностью напоминал бы лазерный свет, прошедший сквозь экран, изготовленный из матового стекла.

Как мы увидим в следующей главе, к счастью, лазеры отличаются от известных ранее источников света в двух отношениях. Во-первых, лазерный свет возникает за счет одного энергетического электронного перехода в атомах вещества. Поэтому спектр частот его очень узок — лазерный свет монохроматичен (одноцветен). Во-вторых, в процессе создания света участвуют отражающие плоскости, так что генерируемый свет представляет собой плоские волны, волновой фронт которых в поперечнике во много раз превосходит длину волны. Таким образом, лазеры позволили получить свет, обладающий как хорошей частотной, так и хорошей пространственной когерентностью.

Глава III

ЛАЗЕРЫ

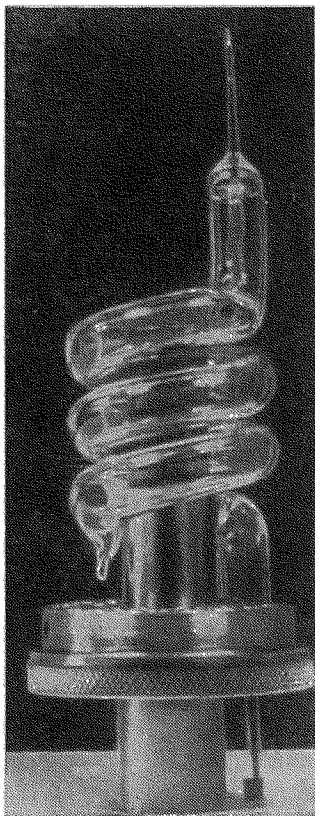
В настоящее время имеется несколько типов лазеров: импульсный, или рубиновый (часто называемый твердотельным лазером), газовый и полупроводниковый, или инжекторный. Впервые был создан рубиновый лазер, который и до сих пор дает самые мощные импульсы света.

ПЕРВЫЙ ЛАЗЕР

В предыдущей главе уже отмечалось, что самым первым прибором, использующим вынужденное излучение, был микроволновый мазер, построенный в 1945 году*. В 1964 году за разработку мазерной техники и создание квантовых генераторов новых типов американскому ученому Ч. Х. Таунсу, в то время работавшему в Массачусетском технологическом институте в Кембридже (штат Массачусетс), и советским ученым Н. Г. Басову и А. М. Прохорову из Физического института им. П. Н. Лебедева была присуждена Нобелевская премия по физике. После успешного создания лазера многие исследователи стремились расширить область его применения от микроволнового диапазона длин волн к диапазону световых волн. В 1960 году американский ученый Т. Х. Мейман, работавший тогда в исследовательской лаборатории «Хьюгес эйркрафт компани», продемонстрировал первый лазер, в котором источником световых волн был рубиновый стержень. Этот первый лазер показан на рис. 26. Поскольку принцип работы для всех трех типов лазеров является общим, рассмотрим внимательнее, как работает рубиновый лазер Меймана.

* Еще в 1940 году В. Фабриканту удалось продемонстрировать эффект вынужденного излучения. Однако его опыты остались незамеченными, хотя именно они открывали эру квантовой электроники.— *Прим. ред.*

В этом лазере в качестве рабочего вещества используется имеющий форму цилиндрического стержня (рис. 27)



Р и с. 26. Лазер Меймана.

есть переходят в более высокие энергетические уровни, за счет электрического тока, проходящего через нить накала. Возвращаясь в более низкие энергетические состояния (чтобы сразу же вновь возбудиться), атомы излучают свет, уносящий избыток энергии.

Еще много лет назад датский ученый Нильс Бор понял, как можно объяснить природу спектра излучения атомов, если предположить, что в атоме электроны вращаются во-

рубин (можно использовать и специальным образом обработанное стекло). Вокруг этого стержня обматывается спиральная разрядная трубка; при подключении к мощному источнику тока она дает короткую, но очень интенсивную световую вспышку с широкой полосой частот (некогерентный свет). Часть энергии света поглощается атомами стержня, в результате чего атомы возбуждаются, переходят в *новое состояние*, по энергии выше *исходного энергетического уровня*. Тем самым в атомах накапливается энергия; когда они возвращаются в свое нормальное невозбужденное состояние (мы будем называть это состояние *основным*), то накопленная энергия выделяется в форме световых волн.

Пока мы нового еще ничего не сказали, так как механизм излучения света для всех источников практически аналогичен описанному. Действительно, атомы нити в обычных электрических лампочках возбуждаются, то

круг ядра по некоторым фиксированным орбитам (подобно планетам вокруг Солнца), причем каждой из этих орбит соответствует определенный энергетический уровень. Когда электрон обращается на внешней орбите, то атом находится в возбужденном состоянии, то есть на высшем энергетическом уровне. Когда же электрон переходит на внутреннюю орбиту, то происходит излучение энергии, и

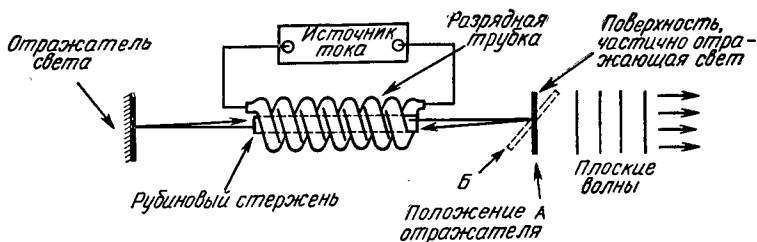


Рис. 27. Схема работы рубинового лазера Меймана. Для простоты отражатели изображены отдельно от рубинового стержня; обычно их помещают вплотную к его торцам, предварительно покрыв тонким слоем серебра.

на фотопленке мы видим характерную для каждого атома линию (спектральная линия), соответствующую этому переходу. На основании этого Бор с удивительной точностью построил спектр атома водорода.

Существенная разница между лазером и другими источниками света состоит в том, что для лазеров подбираются такие вещества, атомы которых переходят из возбужденного состояния в основное не сразу, а через некоторое промежуточное состояние (так называемое *метастабильное состояние*), причем атомы остаются в этом состоянии до тех пор, пока они не будут вынуждены перейти в основное состояние. Длина волны излучаемого света при переходе из метастабильного состояния в основное точно равна длине волны света, благодаря которому этот переход стал возможен. Таким образом, с помощью дополнительной подсветки мы вынуждаем атомы излучать свет; отсюда и термин «вынужденное излучение». Другими словами, в лазерах энергия накапливается в атомах, а затем освобождается в виде монохроматического излучения при переходе атомов из метастабильного состояния в основное.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ В ЛАЗЕРАХ

Работу лазера можно иллюстрировать с помощью простой модели. Возьмем два тяжелых шара и поместим их на подставки, шарнирно закрепленные на треногах, воткнутых в дно водоема. Подставки с шарами располагаются над водой (рис. 28). Проходящая волна может повернуть рычаг подставки. (На рис. 28 справа показано действие такой волны.) Когда подставка наклоняется, шар падает в воду, создавая при этом новые волны. Шар на подставке обла-

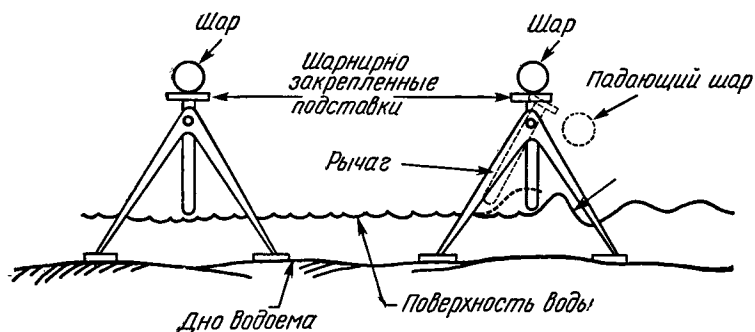


Рис. 28. Модель лазерного метастабильного состояния. Проходящая волна поворачивает рычаг подставки, подставка наклоняется и шар падает в воду, порождая волны на поверхности воды, которые в свою очередь поворачивают второй рычаг.

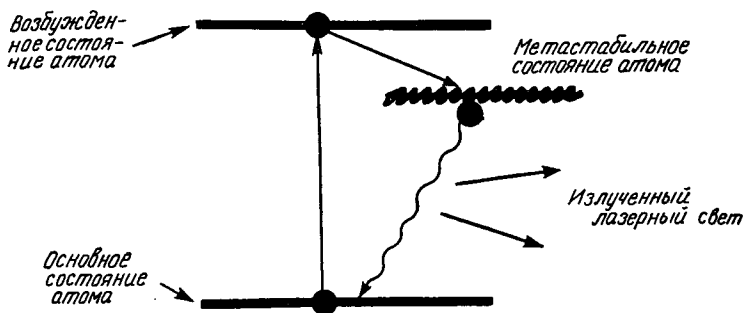
дает потенциальной энергией; когда шар скатывается с подставки, эта энергия превращается в кинетическую. Большая часть этой кинетической энергии передается волнам, возникшим на водной поверхности от падения шара. Волны, распространяющиеся по всей поверхности водоема, переносят полученную энергию вместе с собой. Сталкиваясь на своем пути с рычагом второй подставки (на рис. 28 она изображена слева), такие волны поворачивают второй рычаг, и второй шар тоже падает в воду, порождая при этом еще большие волны.

Наша модель соответствует системе с двумя атомами (каждый шар мы рассматриваем как атом). Шар на дне бассейна аналогичен атому в основном состоянии, шар, находящийся на подставке, — атому в возбужденном метастабильном состоянии. Световой вспышке от разрядной трубки в нашей модели соответствует волна, повернувшая

рычаг первой подставки. Волнам, возникшим в результате падения шара в воду, в лазере соответствуют световые волны излучения, образовавшиеся за счет перехода атома из метастабильного состояния в основное. В лазерах такое излучение вызывает переход от метастабильного состояния в основное и других атомов, что приводит к резкому увеличению интенсивности излучаемого света. В нашей модели волны, возникшие от падения первого шара, становятся причиной падения второго шара, то есть причиной образования новых волн, аналогично тому как световые волны, излучаемые атомом, заставляют «упасть» другие атомы в основное состояние.

ДВУСТУПЕНЧАТЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ПРОЦЕСС

Одно из отличий лазера от только что рассмотренной модели состоит в том, что частота испускаемого лазером света в точности равна частоте света, благодаря которому данное излучение стало возможным. В лазерах достаточно



Р и с. 29. Три энергетических уровня атомов или ионов лазерного вещества (вещества, излучающего свет). Переход атомов из среднего (метастабильного) состояния в основное сопровождается излучением света лазером.

лишь одному атому перейти из метастабильного состояния в основное, то есть испустить свет, как этот свет будет стимулировать такой же переход в других атомах. (При условии, конечно, что в веществе в данный момент существуют атомы в метастабильном состоянии.) Когда мы

поднимаем шар на подставку, то это лишь приблизительно соответствует возбуждению атома, связанному с переходом его в метастабильное состояние, — ведь процесс излучения света лазером происходит не в один этап, как на модели, а в два этапа, как это показано на энергетической диаграмме на рис. 29. На этом рисунке три горизонтальные параллельные линии (две жирные и одна волнистая) соответствуют трем энергетическим уровням системы, а стрелками обозначены возможные переходы между ними. Нижний уровень — это основное состояние атома, верхний — возбужденное, а средний — метастабильное состояние. Когда энергия возбуждения от вспышки разрядной трубки передается атомам, то они переходят из основного состояния в возбужденное (конечно, при условии, что полученной энергии достаточно для такого перехода). Из верхнего уровня атомы переходят на средний — метастабильное состояние. Природа этого уровня такова, что атомы стремятся остаться в этом состоянии. Однако стоит лишь подействовать на атомы, находящиеся в метастабильном состоянии, светом, частота которого равна частоте перехода из метастабильного состояния в основное, как атомы мгновенно переходят в основное состояние, излучая при этом световую энергию. Свет, сопровождающий рассмотренный переход, может в свою очередь вызвать точно такое же излучение, то есть излучение той же самой длины волны, у других атомов за счет перехода их из метастабильного состояния в основное.

Таким образом, мы видим, что метастабильное состояние — это то основное, что определяет работу лазера. Процесс перевода атомов в метастабильное состояние с помощью подсветки разрядной трубкой обычно называется *заселением* метастабильного состояния. В этом случае говорят об *инверсии* заселенности, поскольку вначале большинство атомов находилось в основном состоянии. После подсветки многие атомы переходят в метастабильное состояние.

Почему же такое необычное состояние может существовать? Как правило, время, в течение которого атом находится в *нормальном* возбужденном состоянии (обычно это время называется *временем жизни возбужденного состояния*), по порядку величины равно стомиллионной доле секунды (10^{-8} сек). С другой стороны, одно из известных метастабильных состояний имеет среднее время жизни,

равное почти 1 *сек* (то есть в 100 миллионов раз больше времени жизни обычного возбужденного состояния). Такое состояние существует в атомах кислорода, и переход из него в основное состояние сопровождается излучением зеленого света с длиной волны, приблизительно равной $5588 \cdot 10^{-8}$ см. Такое излучение наблюдается иногда на рассвете, на заре и называется «зеленый луч».

СОХРАНЕНИЕ ЭНЕРГИИ В ЛАЗЕРАХ С ОТРАЖАТЕЛЯМИ

Хотя рассмотренная нами модель из шаров и подставок слишком примитивна, тем не менее мы еще раз воспользуемся ею для выяснения роли отражателей в лазерах. Когда волны на поверхности воды распространяются во всех направлениях от точки, в которой они возникли, то их энергия распределяется по круговому периметру волн. А поскольку радиус круга постоянно растет, то, следовательно, высота и энергия волны все время уменьшаются. Если мы будем увеличивать расстояние между треногами (рис. 28), то вероятность того, что такая волна сможет отклонить рычаг второй подставки, будет уменьшаться. Аналогичная ситуация возможна и в случае свободно расходящихся световых волн, то есть в случае вынужденного излучения света атомами в лазерах.

Если на пути распространяющихся по поверхности воды волн поставить *препятствие*, то волны будут *отражаться* от него. Например, таким препятствием могут быть стенки ванны. В результате отражения энергия волн оказывается как бы сконцентрированной в области, ограниченной стенками ванны, и не уносится волнами на «далекие» расстояния. Ту же самую роль играют и отражатели в лазерах, сохраняя тем самым столь нужную энергию световых волн. Оказывается, что, отразившись от рефлектора, световые волны вновь могут вызвать переход атомов из метастабильного состояния в основное. Следовательно, в рабочем объеме лазерного вещества происходит «непрерывное» накопление световой энергии.

Лазер с такими отражателями изображен на рис. 27. Некоторая часть световой энергии, сопровождающая переход атомов из метастабильного состояния в основное, будет распространяться вдоль рубинового стержня и отражаться от рефлекторов, которые на рис. 27 для большей наглядно-

сти изображены отдельно от стержня. В основном почти весь свет, падающий на рефлектор, отражается обратно в стержень, стимулируя тем самым возбужденные атомы испускать свет. Таким образом, в результате излучения света гигантским числом атомов в стержне накапливается большое количество световой энергии, которая затем испускается в виде одного мощного импульса лазерного света.

Многие лазеры без отражателей вообще не могут излучать свет. Однако существует целый ряд областей применения мазеров, когда микроволновое излучение мешает. Например, мазеры используются в основном как усилители слабых радиосигналов. Поэтому вынужденное излучение ограничивается таким образом, чтобы система (мазер) работала только в качестве усилителя, а не генератора.

В настоящее время лазеры используются как генераторы. Но, вероятно, недалек тот день, когда станет столь же важным и второе свойство лазера — его способность работать в качестве *усилителя*. Наступит день, когда световые лучи, распространяющиеся в полых трубах, будут осуществлять всемирную связь, как это делают сейчас радиоволны, несущие по цилиндрическим коаксиальным *кабелям* телефонные и телевизионные сигналы. Используемые в таких целях световые лучи должны быть *промодулированы* по интенсивности с большой частотой (то есть интенсивность их должна меняться очень быстро). Таким образом, световой луч может нести закодированный сигнал точно так же, как используемый в настоящее время с низкой частотой модуляции телеграфный сигнал. С помощью такого кодированного светового луча мы могли бы вести одновременно миллионы телефонных разговоров и передавать одновременно несколько тысяч телевизионных сигналов. Естественно, что, проходя по трубе, такой закодированный луч постепенно утрачивает свою интенсивность. Поэтому способность лазера работать в качестве усилителя позволила бы нам усилить световые сигналы и получить их такими, какими они вышли от источника.

ОТРАЖАТЕЛИ И ПРОСТРАНСТВЕННАЯ КОГЕРЕНТНОСТЬ

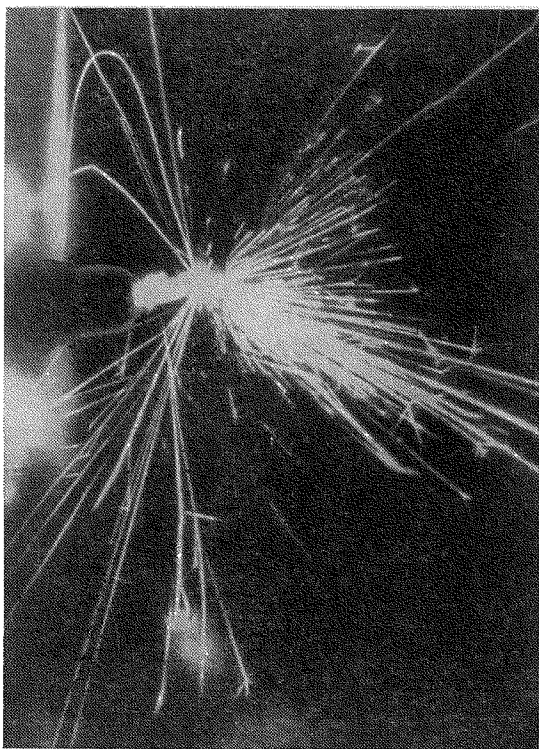
Отражатели в лазерах, кроме того, что они сохраняют световую энергию, еще и усиливают пространственную когерентность лазерного света. Говоря о когерентности, мы

отмечали, что если фронт волн представляет собой почти идеальную плоскость, то это эквивалентно хорошей пространственной когерентности. В случае звуковых волн мы с помощью акустической линзы и малого (по сравнению с длиной волны) звукового источника довольно легко получали плоские волны (рис. 23). Однако для получения плоских световых волн нужно изыскивать другие способы, поскольку изготовить малые (по сравнению с излучаемой длиной волны) световые источники — вещь нереальная. Вот здесь-то нам и помогают отражатели. Когда световые монохроматические волны, излученные атомами лазерного вещества, пройдут несколько раз вперед и назад между отражателями, они становятся почти плоскими. Как видно из рис. 27, правый отражатель сделан слегка прозрачным. Поэтому он отражает не весь падающий на него свет. Прощедший сквозь отражатель свет и есть практически используемый свет, излучаемый лазером.

КОНЦЕНТРАЦИЯ ЭНЕРГИИ

В правой части рис. 27 мы видим испущенные лазером плоские волны, обладающие очень высокой *пространственной* когерентностью. Кроме того, природа этих волн такова, что они обладают и высокой *частотной* когерентностью. С такими плоскими когерентными волнами мы можем обращаться точно так же, как делали это с когерентными звуковыми волнами и микроволнами. Например, если на пути плоских волн (рис. 27) поставить линзу, то она будет фокусировать высококогерентные плоские лазерные волны в очень малом объеме в окрестности фокуса. Иными словами, возникнет ситуация, вполне аналогичная действию акустической линзы на звуковые волны (рис. 22). Можно сказать точнее: фокусирующее действие линзы на лазерный свет эквивалентно действию линзы, показанному на рис. 23, если рассматривать этот рисунок справа налево. На этой фотографии источник звуковых волн находится слева. Однако мы могли бы предположить, что справа помещается источник плоских волн. Плоские волны, двигаясь *влево*, встречают на своем пути линзу, которая их собирает в очень малом (порядка размеров излучателя) объеме (его линейные размеры порядка одной-двух длин волны).

Таким образом, когда на пути лазерного света мы помещаем оптическую линзу, она концентрирует свет в объеме, линейные размеры которого, вероятно, равны одной-двум длинам волн, а поскольку длина волны света со-



Р и с. 30. Точно сфокусированный луч когерентного света от рубинового лазера прожигает стальное лезвие бритвы.

ставляет лишь несколько миллионных долей сантиметра, то поток энергии через поперечник такого объема может стать фантастически большим.

Чтобы иметь представление о том, насколько чудовищной может быть величина этого потока, произведем небольшие вычисления. Допустим, что весь поток света от электрической лампочки мощностью 75 ватт проходит через квадратную площадку, линейные размеры которой рав-

ны длине волны фиолетового света ($4064 \cdot 10^{-8}$ см). Тогда для потока энергии через один квадратный сантиметр мы получили громадную величину, приблизительно равную 46 500 миллионам ватт. Эта величина *электрической* мощности превосходит мощность *всех* существующих электростанций США, работающих одновременно. Даже самые первые лазеры могли разными способами демонстрировать необычайно большую концентрацию световой энергии. На рис. 30 (фотография 1963 года) показано, как лазерный луч прожигает отверстие в стальных бритвенных лезвиях. Разлетающиеся искры только усиливают общее впечатление.

НАРУШЕНИЕ ДОБРОТНОСТИ «КОНТУРА» (Q -НАРУШЕНИЕ)

Уже упоминалось, что без отражателей лазеры вообще не излучают света. То же самое произойдет и в том случае, если два отражателя не будут расположены надлежащим образом. Благодаря этому можно получать чрезвычайно мощные лазерные импульсы. Если отклонить правый отражатель в сторону (на рис. 27 это новое положение изображено пунктиром), то отраженный свет больше не будет возвращаться в стержень и сохранение энергии в стержне нарушится. С помощью импульсной лампы, дающей световую вспышку, мы можем переводить в метастабильное состояние все новые и новые атомы. Поскольку теперь лишь немногие атомы переходят в основное состояние, то тем самым достигается очень большая заселенность метастабильного состояния. Если в надлежащий момент повернуть рефлектор в прежнее положение, то есть установить его параллельно левому рефлектору, то внезапно начнется лавиноподобный переход атомов из метастабильного состояния в основное; тем самым образуется очень короткий и чрезвычайно мощный импульс монохроматического света.

Нарушение процесса сохранения световой энергии в лазерах называется Q -нарушением. Это название заимствовано из радиотехники. В самых первых радиоприборах контур настройки состоял из индуктивности и емкости (конденсатора). Качество, или острота настройки, этого контура характеризовалась величиной добротности Q (первая буква английского слова *quality* — качество). Остро настроенный контур (большое Q) имел очень узкую поло-

су частот (например, такого типа, как изображен на рис. 19, где относительная ширина спектра равна 1% или еще уже). Высокой добротности контура можно добиться за счет уменьшения всевозможных утечек. Если утечки велики, то добротность контура мала и генератор не сможет излучать радиоволны с таким контуром. Мы сталкиваемся с аналогичной ситуацией и в том случае, когда в лазерах нарушено условие параллельности отражателей, то есть когда одно из зеркал отклонено на некоторый угол; при этом лазер не излучает света. Такое нарушение условия излучения в лазерах называется теперь *Q-нарушением*. Стоит лишь вернуть зеркало в первоначальное положение (вертикальное на рис. 27), как добротность лазерного контура возрастает и лазер снова может излучать свет.

ГАЗОВЫЕ ЛАЗЕРЫ

Другим типом лазеров являются газовые лазеры. Их устройство значительно проще. Стекло́нная трубка наполняется специальной газовой смесью. В ее торцы впаивают два электрода, к которым подводится высокое напряжение (рис. 31). В трубке возникает газовый разряд. Газовый свет, да и сама трубка очень похожи на стеклянные труб-

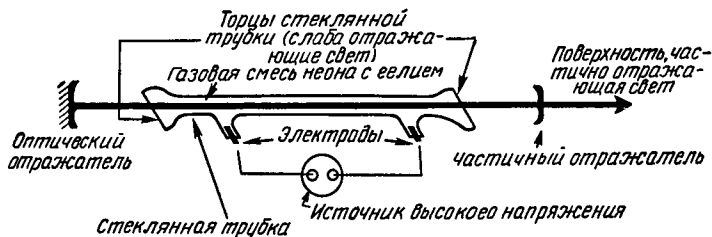


Рис. 31. Схема работы газового лазера. В газовых лазерах для возбуждения атомов или ионов часто используется разряд, возникающий в трубке от приложенного высокого напряжения.

ки и свет обычных неоновых реклам. Газовый лазер отличается от неоновой трубки для реклам составом смеси. Для газовых лазеров подбирается такая смесь, атомы которой могут некоторое время находиться в метастабильном состоянии. Как и в рубиновом лазере, разность энергий между метастабильным и основным уровнями определяет энергию и цвет излученного света. Первый газовый лазер,

в котором использовалась смесь неона и гелия, испускал свет, похожий на свет первого рубинового лазера, однако в отличие от темно-красного света свет этого газового лазера имел оранжевый оттенок. Длина волны оранжево-красного света $6328 \cdot 10^{-8}$ см, тогда как длина волны темно-красного света, излучаемого рубиновым лазером, $6930 \cdot 10^{-8}$ см. В настоящее время в газовых лазерах используются и некоторые другие газы. Например, аргон, дающий голубовато-зеленый (длина волны $4880 \cdot 10^{-8}$ см) и зеленый (длина волны $5145 \cdot 10^{-8}$ см) лазерный свет; азот, излучающий свет с длиной волны $3371 \cdot 10^{-8}$ см, и двуокись углерода, дающая инфракрасный лазерный свет (длина волны $10\ 600 \cdot 10^{-8}$ см).

Существенная разница между газовым и рубиновым лазерами заключается в том, что газовый лазер работает в непрерывном режиме. Свечение, возникающее от разряда в трубке за счет приложенного высокого напряжения, создает непрерывно большую заселенность метастабильного состояния. И хотя атомы непрерывно переходят в основное состояние, они сразу же за счет свечения газа от высоковольтного разряда снова возвращаются в метастабильное состояние.

ОТРАЖАТЕЛИ И РЕЗОНАТОРЫ

Торцы стеклянных трубок газовых лазеров плохо отражают падающий на них свет. Поэтому для газовых лазеров изготавливают специальные отражатели, которые обычно помещают вне трубки (рис. 31). У большинства газовых лазеров размеры стеклянной трубки со смесью намного превосходят размеры рубинового стержня импульсного лазера. А это позволяет при непрерывном режиме работы газового лазера получать световой пучок со значительно более высокой когерентностью, чем когерентность светового пучка рубинового лазера. При наибольшем расстоянии между отражателями два отражателя в лазере действуют аналогично торцовым стенкам резонатора, что повышает частотную когерентность лазерного света. Чтобы лучше понять, как это происходит, рассмотрим некоторые свойства резонаторов.

Одним из простейших резонаторов является фортепьянная струна. Она может колебаться либо с основной частотой, либо с частотой, в целое число раз большей, чем

основная. Аналогичное явление происходит и в закрытой коробке, резонаторе, где воздух может колебаться как с основной частотой, так и с любой частотой более высокого порядка. Частоты более высокого порядка обычно называются *модами*. Основная мода и более высокие моды колебаний показаны на рис. 32. Коробка с малым попереч-

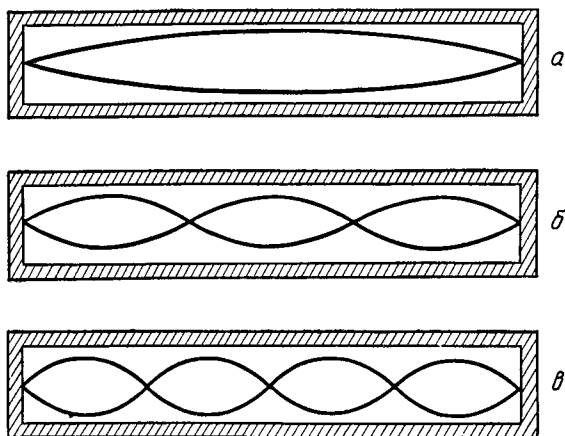


Рис. 32. Резонанс в замкнутой коробке. В длинной замкнутой коробке с отражающими звуковые волны торцами, как и в органной трубе, может возникнуть резонанс на различных частотах.

a — основная гармоника; *b* — третья гармоника; *c* — четвертая гармоника,

ным сечением, изображенная на рис. 32, похожа на резонатор деревянной трубы органа. На рис. 32, *a* представлена волновая картина колебаний с наименьшей, или основной, модой колебаний. Торцы коробки отражают звук, и в коробке устанавливается стоячая волна, максимальная амплитуда которой находится на середине коробки. На рис. 32, *b* показана третья мода колебаний (или, как часто говорят, третья гармоника), то есть колебания с частотой, в три раза превосходящей частоту колебаний, представленных на верхнем рисунке. На рис. 32, *c* мы видим четвертую моду колебаний ($n=4$). Длина волны этих колебаний в четыре раза меньше основной, а частота, естественно, в четыре раза больше. Это значит, что на длине резонатора укладываются четыре полуволны или две полные волны.

Допустим теперь, что мы убрали четыре (кроме торцовых) стенки деревянного резонатора, а затем торцовые стенки заменили высококачественными зеркалами, расположенными на расстоянии 20,32 см друг от друга. Это расстояние в один миллион раз превышает длину полуволны фиолетового света (длина волны его $4064 \cdot 10^{-8}$ см). Предположим теперь, что в такой резонатор попал фиолетовый свет. Тогда между зеркалами установится стоячая волна, соответствующая миллионной гармонике колебаний. Однако, кроме этой моды, будут и другие моды, которые могут быть по частоте больше или меньше. Но, что характерно, примесные моды будут превосходить частоту фиолетового света не в три или четыре раза, а будут отличаться от нее лишь на миллионную долю.

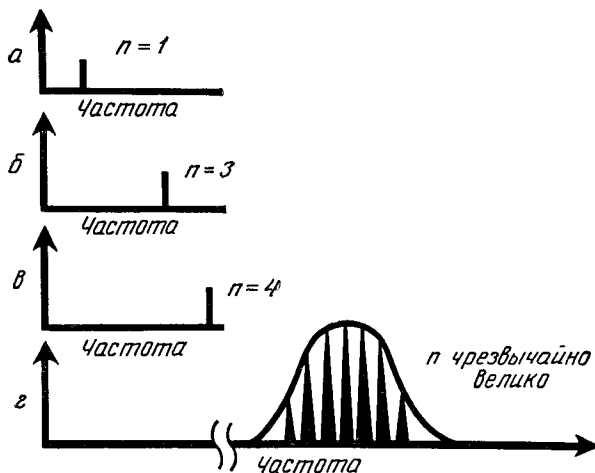


Рис. 33. Частотный анализ звуковых волн.

а, б, в — частотный анализ звуковых волн, резонирующих в длинной замкнутой коробке (рис. 32); г — спектральное представление световых волн, порождающих резонансы на чрезвычайно больших частотах (что возможно, если отражатели лазера находятся на больших расстояниях друг от друга).

На рис. 33 дан спектр частот колебаний, картину которых мы уже видели на рис. 32. Три верхних рисунка соответственно относятся к гармоникам с $n=1$, $n=3$ и $n=4$. Поскольку на нижнем рисунке представлен чрезвычайно высокочастотный спектр колебаний, то ось частот пришлось разорвать. Мы поместили этот рисунок специально для того, чтобы лучше можно было представить картину

отражения и усиления фиолетового света в резонаторе. Допустим, что относительное изменение каждой из рассмотренных частот по отношению к соседней частоте составляет одну миллионную часть. Если бы мы могли в резонаторе с отражающими зеркалами усилить фиолетовый свет так, чтобы усилилась только одна гармоника, то о каком монохроматическом свете можно было бы сказать, что его стабильность по частоте равна одной миллионной.

ЕСТЕСТВЕННАЯ ШИРИНА ЛИНИИ

На рис. 33 дана также и огибающая частотного спектра. Мы уже отмечали раньше, что излучение лазерами монохроматического света происходит лишь благодаря переходу атомов из метастабильного состояния в основное. Однако даже при таком переходе между двумя уровнями мы не получаем строго монохроматического света. На опыте мы всегда обнаруживаем, что спектральная линия имеет ширину. Происходит это по двум причинам. Во-первых, существует так называемое доплеровское уширение линии и, во-вторых, — релаксационное уширение. Оба эти эффекта по сути дела являются следствиями беспорядочного движения излучающих атомов. Таким образом, хотя переход атомов происходит только между двумя энергетическими уровнями и каждому переходу соответствует чрезвычайно узкая спектральная линия, тем не менее суммарная спектральная линия, которую мы видим, имеет значительный разброс по частоте. Обычно эта ширина (разброс по частоте) называется *естественной шириной линии*.

Напомним читателю, в чем состоит эффект Доплера. Когда мимо пассажира, стоящего на платформе, проходит на большой скорости поезд с включенной сиреной, то пассажир отчетливо слышит повышение и понижение частоты звука, причем частота звука повышается, когда поезд приближается к пассажиру, и уменьшается с удалением поезда. В то же время машинист поезда этого явления не замечает. С аналогичной ситуацией мы сталкиваемся, когда рассматриваем излучение света атомами. Движущийся атом излучает свет строго определенной частоты (*в системе координат, связанный с атомом*). Однако неподвижный наблюдатель (либо прибор) за счет эффекта Доплера фиксирует смещенную частоту.

Недавно американец Ричард Милбурн предложил использовать лазерный свет, в котором искусственно создан доплеровский сдвиг. Если отразить лазерный свет от пучка быстро движущихся электронов, испущенных электронным ускорителем, то частота лазерного света изменится на очень большую величину (большой доплеровский сдвиг). Картина взаимодействия света с электронным пучком очень напоминает картину столкновения бильярдных шаров. В самом деле, если по медленно движущемуся бильярдному шару сильно ударить вторым шаром, то первый шар изменит направление движения и увеличит свою энергию. Поскольку в результате отражения частота света резко увеличилась, а мы знаем, что чем больше частота света, тем больше его энергия, то лазерный пучок света, отразившись от пучка электронов, превратился в пучок гамма-лучей с большой энергией. Кроме того, эти гамма-лучи обладают такими свойствами, которые практически невозможно получить у гамма-лучей, испущенных обыкновенными гамма-источниками. Во-первых, лазерный свет можно сделать поляризованным, пропустив его через поляризационный фильтр, а это означает, что пучок гамма-лучей, в который превратился лазерный свет, отразившись от пучка электронов, также должен быть поляризованным (очень необычная ситуация для пучков гамма-лучей). Во-вторых, поскольку лазерный свет был монохроматическим, то и пучок гамма-лучей мы получаем монохроматическим*.

В 1957 году немецкий ученый Рудольф Мессбауэр наблюдал ядерные энергетические переходы, естественная ширина спектральных линий которых была очень узкой. За разработку метода исследования и открытие нового эффекта в 1961 году ему была присуждена Нобелевская премия по физике. Мессбауэр использовал радиоактивное вещество, атомы которого были настолько жестко связаны с кристаллической решеткой, что даже при излучении не могли двигаться. Такое «замораживание» атомов приводило к тому, что они давали чрезвычайно монохроматическое излучение. К сожалению, этот способ нельзя использовать в лазерах, так как лазерное излучение всегда имеет некоторый разброс по частоте.

* Этот метод получения γ -квантов был осуществлен раньше Милбурна советским физиком Арутюняном. Идея метода была предложена еще ранее Куликовым и Якименко.— *Прим. ред.*

Однако ширина спектральной линии каждой индивидуальной гармоники лазера может быть значительно меньше естественной ширины линии лазера. А малая ширина спектральной линии, как мы уже знаем, говорит о высокой частотной когерентности. В связи с этим возникает проблема получения лазерного пучка, содержащего только одну из многочисленных гармоник. Многие лазеры излучают одновременно несколько гармоник. Существуют и другие лазеры, у которых происходит постоянное «перескакивание» с режима излучения одной гармоники на режим излучения другой. Очевидно, что оба эти явления ухудшают когерентность лазерного света. Чтобы уменьшить «скачки» режима работы лазера, обычно применяют высококачественный механический стабилизатор. Температурные колебания приводят к тому, что меняется расстояние между зеркалами, в результате чего изменяется частота излучаемого света (то есть вместо одной гармоники лазер начинает излучать другую). Однако, если использовать хорошие механические и тепловые стабилизаторы, можно добиться такого режима работы лазера, при котором он будет излучать только одну гармонику, что, как известно, соответствует высокой частотной когерентности лазерного света.

ДЛИНА КОГЕРЕНТНОСТИ

Поскольку газовые лазеры излучают наиболее высококогерентный свет, то в основном они и используются в голографии. Но и среди газовых лазеров можно найти такие, характеристики которых наиболее высоки. Существенной характеристикой лазеров является расстояние, на котором частотная когерентность света, то есть *длина когерентности*, практически не меняется. Особенно важно знать длину когерентности, когда мы используем лазеры в голографии. Рассмотрим подробнее, что означает введенное нами понятие.

Как уже отмечалось раньше, интерференция двух наборов волн одинаковой частоты происходит даже тогда, когда один из наборов сдвинут относительно другого (влево или вправо) на целое число длин волн. Конечно, при этом мы предполагаем, что расстояние между гребнями волн не меняется и что все следующие друг за другом гребни (либо впадины) совершенно одинаковы. В действи-

тельности же если сдвигать один набор волн относительно другого на очень много длин волн, то в конце концов можно достигнуть такого положения, начиная с которого идеальной картины сложения и вычитания волн больше не будет. Нетрудно заметить, что для световых волн это вполне реальная проблема. Когда два набора плоских когерентных волн фиолетового света сдвинуты относительно друг друга на 40,64 см, то на величине этого сдвига укладывается один миллион длин волн фиолетового света. Относительное изменение, частоты на одну миллионную часть привело бы к тому, что два «граничных» гребня из этих наборов волн (по одному из каждого) стали бы рассогласованными, образно говоря, двигались бы «не в ногу». Расстояние, на котором лазерное излучение действительно остается однородным по форме (все гребни волн, как солдаты на параде, идут в ногу), и называется длиной когерентности. У некоторых газовых лазеров длина когерентности достигает нескольких метров. Использование лазеров с большой длиной когерентности позволяет получать голограммы какой-либо сцены, имеющей большую глубину, чего, конечно, нельзя сделать, применяя лазеры с малой длиной когерентности.

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ *

К третьему типу лазеров, которые разрабатываются и применяются в настоящее время, относится полупроводниковый, или инжекционный, лазер. Он похож на рубиновый и газовый лазеры и отличается от них лишь тем, что в качестве рабочего вещества (вещества, излучающего свет) в них используется крошечный кусочек полупроводника. Полупроводник — это вещество, которое не является ни хорошим проводником, ни хорошим изолятором. Конструктивно полупроводниковый лазер прост. К противоположным поверхностям полупроводника припаиваются два электрода. Когда такой полупроводник подсоединяется к мощному источнику тока, то через полупроводник течет прямой ток. Этот ток возбуждает атомы полупроводника. И когда атомы из возбужденных состояний переходят в основное состояние, то такой переход сопровождается ис-

* Первые полупроводниковые лазеры были созданы советскими физиками под руководством Б. М. Вула.— *Прим. ред.*

пусканием света или других видов электромагнитного излучения. Лазеры на твердом теле обычно излучают инфракрасный свет или радиоволны в миллиметровом диапазоне. В голографии, как правило, такие лазеры не применяются.

Лазерный свет, как и обычный свет, можно рассеивать на некоторых веществах, включая жидкости. Рассеяние света на жидкостях, в результате которого изменяется частота рассеянного света, было экспериментально установлено индийским ученым Ч. Раманом и получило название *Раман-эффекта* *. Суть этого эффекта состоит в том, что падающий на вещество свет взаимодействует с колебаниями молекул вещества и в итоге частота рассеянного света либо увеличивается, либо уменьшается на величину частоты молекулярных колебаний. В некоторых приспособлениях резонатор изготавливается из материала, который может давать комбинационное рассеяние света (например, из куска кварца с параллельными торцовыми гранями), а для возбуждения колебаний *решетки* кристалла применяется мощный пучок света от рубинового лазера. В рассмотренном приспособлении лазерный пучок действует как «насос», то есть служит своего рода источником энергии. Напомним, что роль такого «насоса» в рубиновом лазере играет разрядная трубка. Возбужденные в кварце интенсивные колебания решетки *модулируют* световой пучок рубинового лазера, в результате чего рассеянный лазерный свет содержит как частоту, равную сумме частот падающего света и молекулярных колебаний, так и частоту, равную их разности. Наряду с термином «вынужденное излучение» иногда в этом случае пользуются и термином «вынужденное рамановское рассеяние» (SRS — stimulated Raman scattering).

* Раньше Рамана такое рассеяние (оно еще называется комбинационным) на твердых телах было обнаружено советскими физиками Г. С. Ландсбергом и Л. И. Мандельштамом.— *Прим. перев.*

ДИФРАКЦИЯ ВОЛН

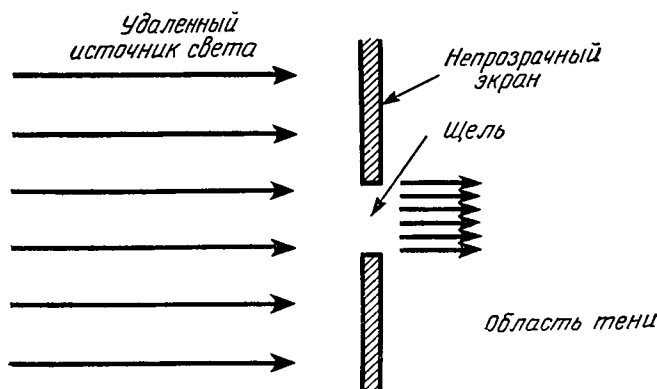
В главе I, рассматривая процесс получения голограмм, мы пользовались такими довольно расплывчатыми понятиями, как «пучок света, отклоненный вверх» и «пучок света, отклоненный вниз». Поскольку явление дифракции занимает в голографии очень важное место, постараемся изучить его подробнее и дать ему более строгое определение.

В словаре Уэбстера мы находим следующее определение дифракции: «Отклонение света, проходящего вблизи краев непрозрачных тел или сквозь узкие щели, от первоначального направления движения, в результате которого возникает целая серия параллельных светлых и темных или цветных полос. Аналогичное явление наблюдается в случае звуковых, электромагнитных и других волн». Из этого определения видно, что существуют различные случаи дифракции. Мы начнем изучение дифракции с вопроса о прохождении света сквозь узкую щель.

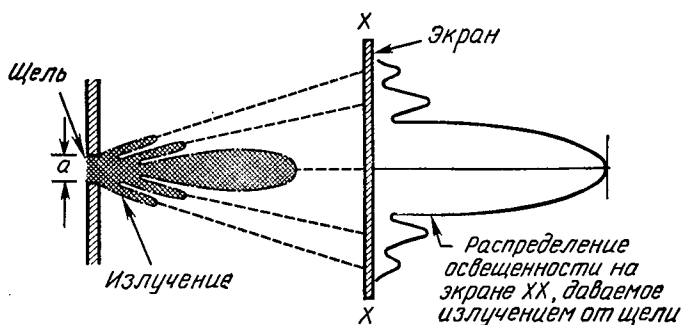
ДИФРАКЦИЯ ОТ ЩЕЛИ

Пусть на непрозрачный экран со щелью падает световая (либо звуковая) волна (рис. 34). Какова же будет картина излучения света от щели в области тени за экраном? Ответ на этот вопрос можно получить, если на пути лучей, прошедших сквозь щель, поместить экран (рис. 35). Тогда по освещенности отдельных частей этого экрана (на рис. 35 картина освещенности представлена графически) можно судить о картине излучения света от щели. Из рис. 35 видно, что максимум освещенности приходится на участок экрана, расположенный прямо против щели. К этому максимуму примыкает целый ряд других максимумов и минимумов. Более подробно дифракционная кар-

тина представлена на рис. 36. Одной из существенных характеристик прошедшего сквозь щель пучка является его ширина на больших расстояниях. Для дифракционной картины (рис. 36) это просто полуширина центрального



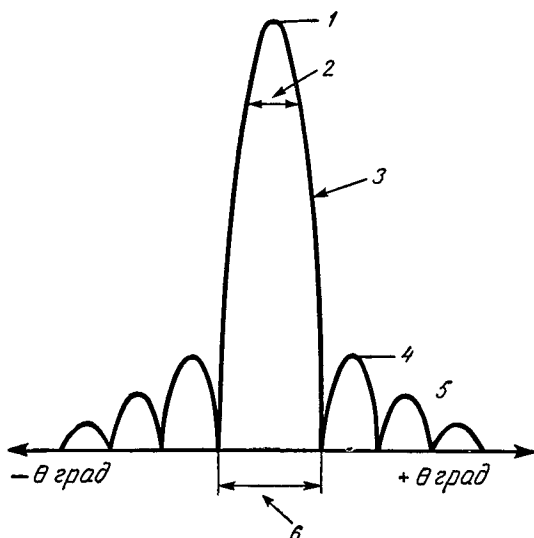
Р и с. 34. Распределение энергии по ширине щели вблизи щели. Когда щель в непрозрачном экране освещается удаленным источником света, распределение энергии по ширине щели однородно.



Р и с. 35. Картина световых волн в области тени за непрозрачным экраном (рис. 34). Свет, прошедший сквозь щель, приобретает форму луча.

дифракционного максимума. Следует отметить, что ширина пучка обратно пропорциональна апертуре, или ширине щели a , и прямо пропорциональна длине волн λ . Если для a и λ пользоваться одними и теми же единицами измерения, то ширину пучка в градусах можно вычислить по формуле $51\lambda/a$.

Оценим эту величину в различных случаях. Сначала мы вычислим ширину пучка 508-сантиметрового оптического телескопа Паломарской обсерватории в Калифорнии. Мы уже говорили, что длина волны фиолетового света составляет $4064 \cdot 10^{-8}$ см. Тогда для фиолетового света и 508-сантиметрового зеркала величина $51\lambda/a$ становится равной $51 \cdot 40,64 / 1\,000\,000 \cdot 1/508$ град, то есть четырьмя миллионным градуса. Следовательно, если 508-сантиметровый телескоп освещается по всей его апертуре когерентным фиолетовым светом, то при этом образуется световой пучок,



Р и с. 36. Дифракционная картина, образованная щелью.
 1 — максимальная амплитуда (A_{\max}); 2 — ширина на уровне половины максимальной мощности $51 \lambda/a$ град; 3 — главный максимум; 4 — первый побочный максимум (примерно $1/5 A_{\max}$); 5 — второй побочный максимум (примерно $1/10 A_{\max}$); 6 — полная ширина главного максимума $115 \lambda/a$ град.

чок, угловая ширина которого равна углу, под которым виден предмет шириной приблизительно 113 м с расстояния 1 609 000 км.

В качестве второго примера мы вычислим угловой разброс луча рубинового лазера, распространяющегося от Земли до Луны. Предположим, что диаметр поперечника рубинового стержня 1,27 см, то есть его апертура равна 1,27 см. Кроме того, допустим, что лазер излучает полно-

стью когерентный красный свет с длиной волны $7620 \cdot 10^{-8}$ см. Тогда формула $51\lambda/a$ дает для угловой ширины луча величину $51 \cdot 7,62 \cdot 10^{-5}$, то есть приблизительно три тысячных градуса. Следовательно, когда этот луч достигнет Луны, его линейная ширина изменится от 1,27 см до 20 км.

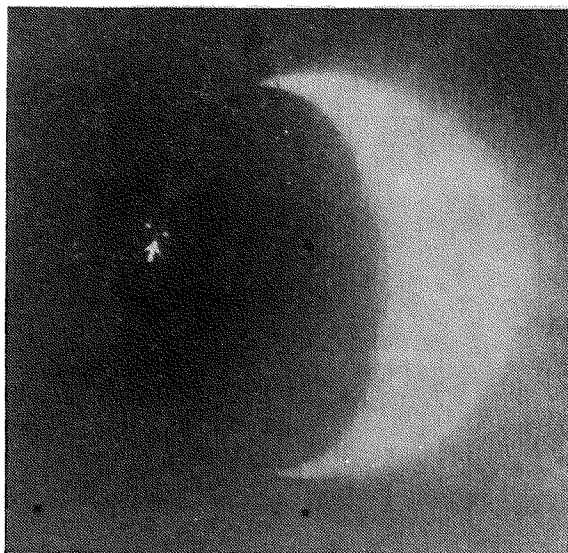


Рис. 37. Такой запечатлела нашу Землю, частично освещенную Солнцем, американская лунная станция «Сервейер-7». На этом снимке в ночной части Земли мы видим две крохотные светлые точки (прямо над стрелкой), образованные лазерными лучами. Лазеры были помещены в Китт-Пик, штат Аризона (правое пятнышко), и в Тэйбл-Маунтэйн, штат Калифорния (левое пятнышко), и изучали свет в направлении Луны.

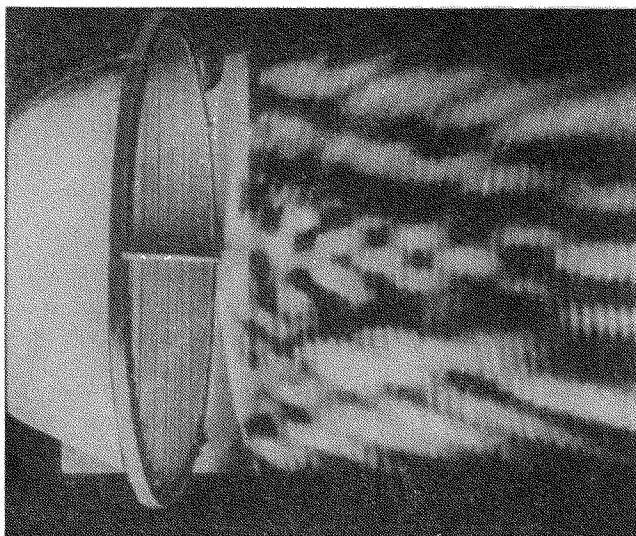
В недавнем эксперименте, проведенном НАСА, два лазера относительно малой мощности, помещенные на западе США, вскоре после прилунения станции «Сервейер» были направлены на Луну. Станция «Сервейер» сфотографировала Землю, когда в той ее части, где находились лазеры, была ночь, и передала этот снимок на Землю. Он показан на рис. 37. Две светлые точки (на фотографии они отмечены стрелкой) говорят нам о местонахождении лазеров. Следует заметить, что такие ярко освещенные города,

как Лос-Анджелес и Сан-Франциско, близ которых находились лазеры, на фотографии совершенно невидны. Этот эксперимент наглядно демонстрирует значительное преимущество пространственно-когерентных лучей. Для таких лучей при апертуре, во много раз большей длины волны, можно получить исключительную направленность пучка при сравнительно небольших затратах энергии — ведь чтобы добиться такой направленности для некогерентных лучей, понадобились бы источники гигантской мощности. Например, если бы вместо лазеров, мощность каждого из которых была 2—3 ватта, пришлось создать некогерентный пучок света такой же направленности, то потребовался бы источник некогерентного света мощностью 10 млрд. ватт. Вероятно, несколько удивительно, что ширина когерентного пучка света столь мало изменяется, даже когда свет проходит очень большие расстояния. Например, для волн, распространяющихся на поверхности воды, или для звуковых волн мы не обнаруживаем подобной направленности. Звуковые волны, в частности исходящие от телефонной трубки (рис. 2), распространяются одинаково во всех направлениях, так что понятия луча для них вообще не существует. Акустический рупор или мегафон способен создать некоторую направленность для звуковых волн, но она очень незначительна. Из выражения для угловой ширины $51\lambda/a$ видно, что линейная ширина пучка не будет существенно изменяться лишь в том случае, если апертура во много раз превосходит длину волны.

ДИФРАКЦИОННАЯ КАРТИНА ВБЛИЗИ ПРЕДМЕТА

Для голографии наибольший интерес представляет дифракционная картина вблизи предмета, а не на больших расстояниях от него. На рис. 34 мы видим, что вблизи щели ширина пучка света равна ширине самой щели, то есть в этой области пучок остается полностью коллимированным. Расстояние от щели, на котором ширина пучка соответствует ширине щели (апертуры), зависит от размера апертуры и длины волны. Оно равно квадрату ширины щели, или квадрату величины апертуры, деленному на удвоенную длину волны. Таким образом, ширина пучка, вышедшего из апертуры, поперечник которой равен, например, тридцати длинам волн, на расстоянии в 450 длин волн будет оставаться неизменной и равной тридцати дли-

нам волн. На рис. 38 показаны звуковые волны, исходящие из рупора со вставленной в него акустической линзой. Апертура такой системы равна тридцати длинам волн. Следует отметить, что на рис. 38 представлена лишь ам-



Р и с. 38. Амплитудная картина когерентных звуковых волн, исходящих из рупора. В апертуру рупора, имеющего размер около тридцати длин волн, вставлена линза. Звуковой пучок волн остается коллимированным (граничные линии параллельны).

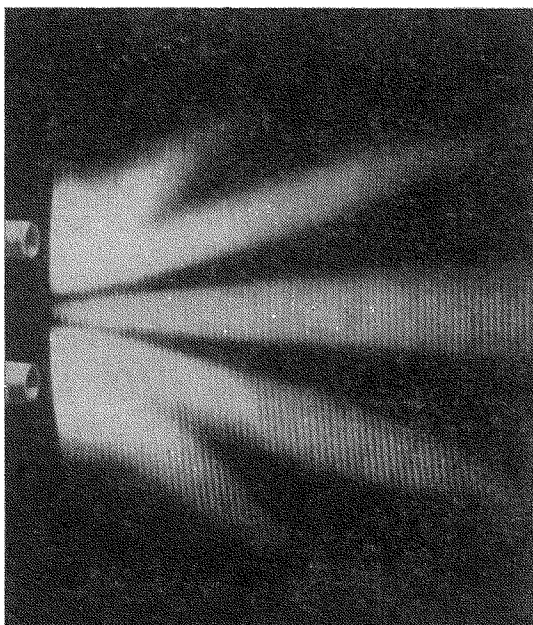
плитуда звуковых волн, а волновая картина звука дана на рис. 25. Хотя на рис. 38 показан пучок, прошедший расстояние, равное примерно тридцати или сорока длинам волн, тем не менее уже видно, что верхняя и нижняя границы пучка параллельны друг другу, то есть ширина пучка не меняется и остается равной апертурной ширине.

ДИФРАКЦИИ ДВУХ ЩЕЛЕЙ

Теперь рассмотрим, какова будет дифракционная картина в том случае, когда свет проходит сквозь две щели в непрозрачном экране. Здесь, как и в предыдущем случае, возникает много и ярко освещенных и совершенно темных областей. Пользуясь оптической терминологией, можно

сказать, что получается целая серия темных и светлых *полос*.

Дифракционную картину, возникающую при прохождении света через две щели, можно заменить аналогичной ей волновой картиной от двух когерентных звуковых источников, одинаково, то есть ненаправленно, испускаю-



Р и с. 39. Интерференция звуковых волн, исходящих от двух источников. Два разделенных источника звука действуют как две оптические щели, порождая дифракционный профиль, обусловленный конструктивной и деструктивной интерференцией волн. На снимке отчетливо виден горизонтальный пучок дифрагированных волн нулевого порядка, а также отклоненные вверх и вниз пучки дифрагированных волн первого порядка и более слабые пучки волн второго порядка.

щих звуковые волны во всех направлениях. Такая картина показана на рис. 39. На этом снимке мы видим систему полос, образованных звуковыми волнами, имеющими длину волны $3,81$ см, от двух источников, расположенных друг от друга на расстоянии, равном утроенной длине волны. В результате комбинации двух тождественных волновых

полей происходит сложение и вычитание волн. Как и следовало ожидать, сложение волн наблюдается в тех точках, которые одинаково удалены от двух источников, то есть находятся на оси симметрии. Вдоль этой линии расположена центральная светлая горизонтальная полоса. Вычитание волн (деструктивная интерференция) наблюдается в тех точках, разность расстояний от которых до источников равна половине длины волны. В таких точках происходит сложение гребней (положительное давление) одного волнового набора со впадинами (отрицательное давление) другого. Непосредственно к центральной светлой полосе сверху и снизу примыкают темные полосы (рис. 39). В этих участках произошла деструктивная интерференция, причем расстояние от любой точки темной полосы до одного источника отличается от расстояния до другого источника на одну полуволну. Затем темные полосы снова сменяются светлыми. Для точек этих светлых полос разность расстояний до двух источников равна полной длине волны. Здесь один из волновых наборов сдвинут относительно другого на длину волны. А это значит, что гребни и впадины у них совпадают. В результате положительные давления в гребнях складываются и отрицательные давления во впадинах тоже складываются, усиливая тем самым волновую картину, то есть образуя более высокие гребни и более глубокие впадины. Аналогичная картина происходит и в случае, когда разность расстояний равна удвоенной длине волны. На рис. 39 этим областям соответствует вторая пара светлых полос (верхняя и нижняя полосы).

Когда разность расстояний от какой-либо точки до источников равна нечетному числу полуволн, то в этой точке происходит деструктивная интерференция. Мы уже рассматривали темные полосы, для которых разность расстояний была равна полуволне (рис. 39). Следующая пара темных полос, расположенных симметрично по отношению к горизонтальной оси, представляет собой случай, когда два волновых набора сдвинуты относительно друг друга на три полуволны.

ДИФРАКЦИЯ ОТ МНОГИХ ЩЕЛЕЙ

Если бы волны, изображенные на рис. 39, были не звуковыми, а *световыми* монохроматическими волнами и если бы они исходили от длинных щелей, перпендикулярных

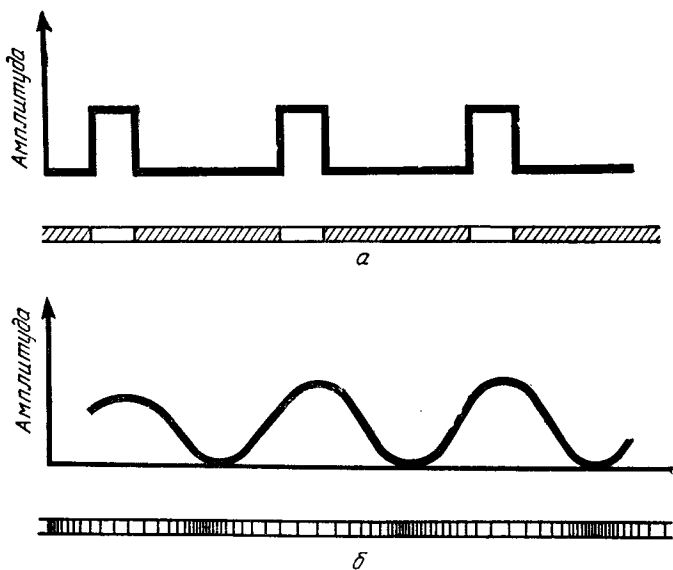
плоскости листа, то, поставив на пути их движения белый экран, можно было бы увидеть дифракционную картину световых лучей. Эта картина представляла бы собой систему белых и темных полос и была бы аналогична дифракционной картине звуковых волн. Рассматривая на рис. 10 прохождение света через два прозрачных участка (фотографическую решетку), мы видели, что световой поток расщепляется, то есть, кроме центрального пучка, появились два боковых пучка. Каждый из этих пучков был направлен таким образом, что два волновых пучка, которые его создавали, были всегда сдвинуты относительно друг друга на длину волны. Аналогичную картину мы видим и на рис. 39. Фотография дифракционной картины волн от решетки отличалась бы от фотографии на рис. 39 лишь числом щелей. Многощелевая решетка действует на проходящий свет так же, как и двущелевая, поскольку для тех направлений, для которых колебания от отдельных щелей усиливают друг друга, вклад в энергию волн от всех щелей будет осуществляться тем же самым способом, что и в случае двух щелей.

На рис. 39 мы видим все три волновых пучка, о которых мы говорили раньше (см. рис. 10). Неотклоненным волнам, или волнам нулевого порядка, соответствует горизонтальная светлая полоса; отклоненным волнам первого порядка, или волнам, сдвинутым на одну длину волны, соответствуют первые боковые светлые полосы (верхняя и нижняя). Кроме того, на рис. 39 имеется еще одна пара светлых полос. Волны каждой из этих двух полос сдвинуты относительно друг друга на две длины волны. Это так называемые дифрагированные волны второго порядка.

ДИФРАКЦИОННЫЕ И ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ РЕШЕТКИ

Хотя волновая картина от двух звуковых источников (рис. 39) аналогична дифракционной картине световых волн, прошедших сквозь две узкие щели в непрозрачном экране, и хотя эту аналогию можно перенести на случай многих щелей в непрозрачном экране, расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга, тем не менее отсюда не следует делать вывод о том, что действие фотографической решетки (фотографическая запись интерференционной картины) подобно действию дифракционной решетки, поскольку фотографическая решетка несколько отлича-

ется от дифракционной. Из рис. 40 видно, что у дифракционной решетки щели полностью прозрачны, а промежутки между ними полностью непрозрачны. В фотографической решетке нет такого резкого перехода. Для нее характерен постепенный переход от прозрачных областей к непрозрачным. А это приводит к тому, что амплитуда света изменяется постепенно от максимума к минимуму,



Р и с. 40. Классическая щелевая решетка (дифракционная решетка). Такая решетка очень резко изменяет интенсивность света, тогда как фотографическая решетка делает это постепенно.
 а — щелевая решетка; б — фотографическая решетка.

тогда как для дифракционной решетки мы наблюдали резкое изменение силы света. В результате синусоидального изменения амплитуды света оказывается, что на максимумы первого порядка (первые боковые светлые полосы) приходится гораздо большая часть световой энергии, чем на максимумы высших порядков.

Фотографическая решетка отличается от простой щелевой решетки еще и тем, что в процессе изготовления, то есть когда пленку проявляют, закрепляют и сушат, эмульсия на пленке коробится, нарушая тем самым упорядоченность решетки. После экспозиции на пленке остаются не-

засвеченные участки, и ни в коем случае нельзя допускать, чтобы свет снова попал на эти участки. Поэтому пленку проявляют и закрепляют так, чтобы удалить из эмульсии оставшиеся незасвеченными светочувствительные элементы. А это приводит к тому, что эмульсия либо морщится, либо в некоторых местах начинает отставать от пленки. Хотя величина этих дефектов мала, тем не менее для световых волн они являются существенными. Такие дефекты обычно вызывают преломление световых волн, что приводит к эффектам, особенно нежелательным в голографии.

ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА ПРИЗМАМИ

Напомним, что преломление света — это изменение направления его распространения. Оно возникает не вследствие огибания светом непрозрачных предметов (дифрак-

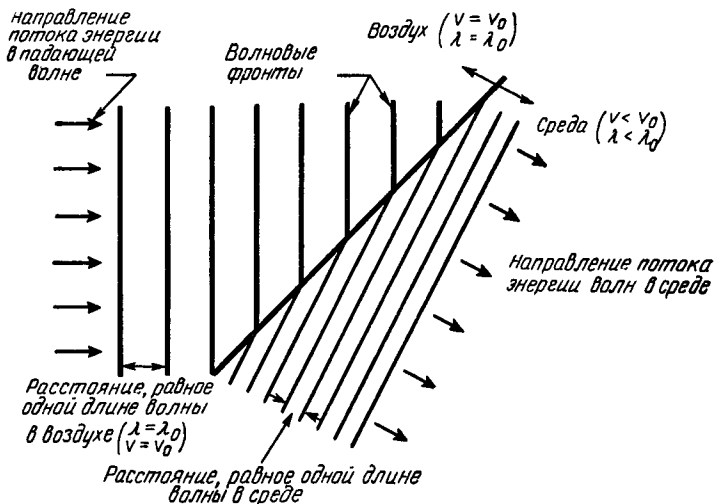
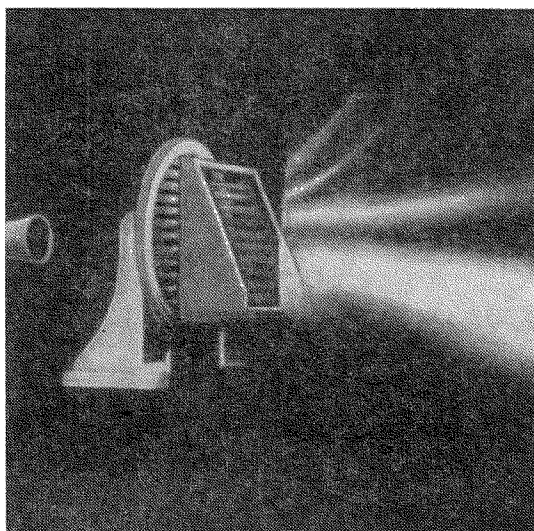
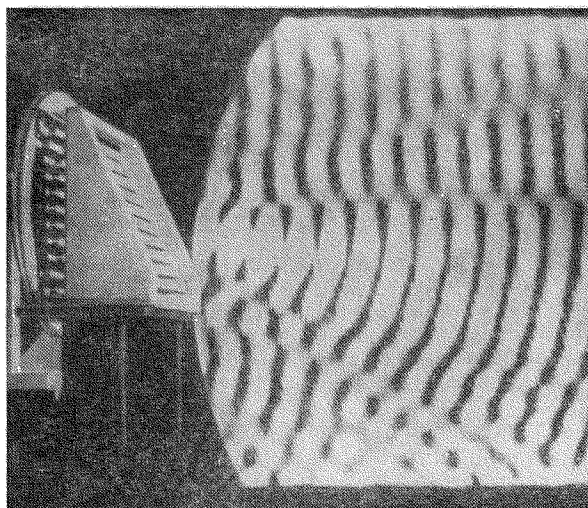


Рис. 41. Переход потока волновой энергии из среды, где скорость распространения волн больше, в среду, где она меньше, сопровождающийся уменьшением длины волны (соответственно меняется и направление распространения волн).

ция), а вследствие прохождения света сквозь прозрачные предметы, такие, как призмы или линзы, точнее говоря, оно появляется при переходе света из одной прозрачной среды в другую; при таком переходе как скорость света, так и длина его волн изменяются. Простейшую картину пре-



Р и с. 42. Сфокусированный луч звуковых волн, даваемый акустической линзой, отклоняется книзу акустической призмой.



Р и с. 43. Волновая картина отклоненных звуковых волн, представленных на рис. 42.

ломления света можно получить, если направить луч света под некоторым углом на границу двух сред. На рис. 41 световые волны, распространяющиеся в воздухе, падают на кусок стекла, передняя грань которого наклонена по отношению к фронту волн под некоторым углом. Световые волны движутся в стекле с меньшей скоростью, чем в воздухе; из формулы, приведенной на стр. 9, мы получаем, что и длина волны у них тоже уменьшилась. Если из куска стекла изготовить треугольную призму и пропустить сквозь нее свет, то она будет изменять направление распространения света.

На рис. 42 мы видим пучок звуковых волн, отклоненный вниз акустической призмой. Левая грань призмы параллельна плоскости фронта падающих волн. Следовательно, внутри призмы волны движутся в том же направлении, что и прежде. Но так как правая грань призмы наклонена, то выходящий из призмы звуковой поток движется уже в другом направлении. Картина волнового фронта этого потока показана на рис. 43.

ПРИЗМАТИЧЕСКАЯ РЕШЕТКА

Поскольку в решетке, изготовленной фотографическим способом, эмульсионные дефекты приводят к тому, что толщина слоя эмульсии становится переменной, то отдельные участки такой фотографической решетки как по форме, так и по действию на световые лучи в принципе ни-

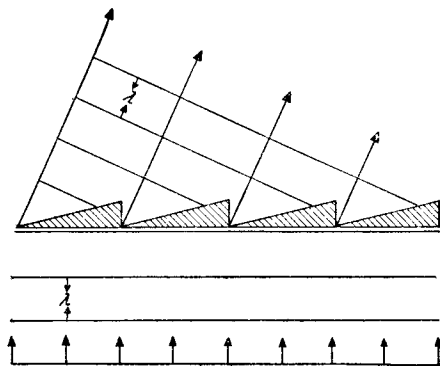
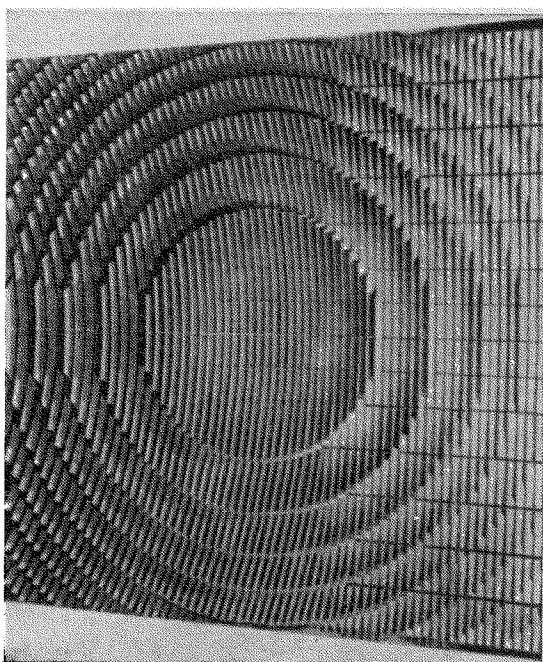


Рис. 44. Набор призм, действующих подобно дифракционной решетке. Он усиливает дифрагированные волны, распространяющиеся в направлении преломленных волн.

чем не отличаются от призмы. Рассмотрим решетку, в которой вместо щелей имеется большое число секций из призм (рис. 44).

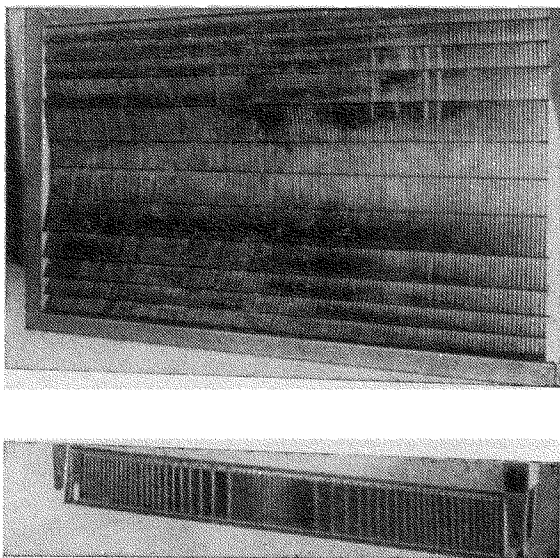
Каждая из призм будет отклонять волновой поток (в данном случае вправо) точно так же, как это делала



Р и с. 45. Микроволновая линза. Круговая картина зон в некоторых микроволновых линзах аналогична круговой картине зонной пластинки.

одна призма (рис. 42). Кроме того, если подобрать соответствующие длину волны света и угол призмы, то можно добиться значительного усиления световых волн, отклоненных вправо (рис. 44), в направлении, отвечающем дифрагированным волнам первого порядка. Если подобрать размеры призм и длину волны так, чтобы волны, движущиеся в указанном направлении от каждой из призм, были сдвинуты на длину волны от волн, испущенных соседней призмой, то это еще больше усилило бы эффект излучения света в данном направлении. Эта ситуация совер-

шенно аналогична той, которая возникла бы в том случае, если бы мы заменили звуковые источники (рис. 39) призмными излучателями такого типа, какой показан на рис. 42. Если при такой замене направление максимального излучения энергией системой показанного на рис. 44 типа совпало бы с направлением первого бокового дифракционного максимума (в данном случае нижнего) (рис. 39), то это значительно усилило бы концентрацию энергии в данном направлении.



Р и с. 46. Цилиндрические линзы с призматической зонной структурой.

Подобный метод усиления применялся в некоторых микроволновых линзовых антеннах. В радиоэлектронике такой процесс усиления называется *ступенчатым*, или *зонным*. Поскольку микроволны, которые используются в различных устройствах, часто имеют узкую полосу частот и практически являются монохроматическими, то в таких устройствах также можно применять зонный метод усиления. На рис. 45 показана ступенчатая круговая микроволновая линза, которая использовалась впервые для усиления (ретрансляции) телевизионных передач между

Нью-Йорком и Бостоном. На рис. 46 представлены две цилиндрические дифракционно-преломляющие линзы. Каждая из половин (верхняя и нижняя) линзы, показанной на рис. 46 вверху, состоит из двадцати четырех зон, а каждая из половин (левая и правая) линзы, показанной на рис. 46 внизу, состоит из пяти зон. Очевидно, что каждая из этих полусекций по своей структуре до некоторой степени похожа на призматическую структуру типа тех, что показаны на рис. 44. Разница заключается лишь в том, что пространственное расположение призм у линз неоднородно, поскольку линзы должны еще и фокусировать пучки.

БИПРИЗМАТИЧЕСКАЯ РЕШЕТКА

Рассмотренный только что механизм усиления отклоненного пучка волн можно применять и для усиления двух симметричных пучков волн первого порядка, отклоненных, как это показано на рис. 47, вправо и влево. Для этого

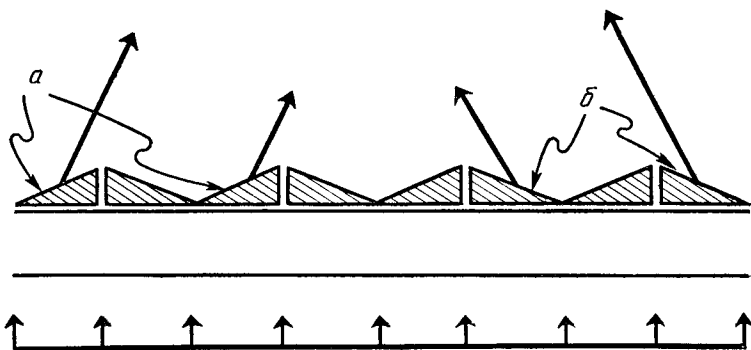


Рис. 47. Набор бипризм. Действуя как решетка, он может усиливать оба пучка дифрагированных волн первого порядка. Морщины на поверхности эмульсии в решетке, изготовленной фотографическим способом, могут давать эффекты, сравнимые с эффектами бипризматической решетки.

вместо системы призм используется система бипризм. Тогда левые части бипризм будут отклонять пучок вправо, а правые — влево. Здесь, как и прежде, предполагается, что угол призмы и длина волны подобраны так, что бипризма отклоняет пучки в направлениях, соответствующих направлениям движения дифрагированных волн первого порядка.

Если мы предполагали, что после проявления и закрепления фотографическим способом изготовленной решет-

ки (рис. 40, б) на ней появляются эмульсионные дефекты, то это равносильно предположению, что верхняя и нижняя поверхности решетки стали волнистыми, так что на поверхности пленки возникли гребни и впадины, причем впадины появились в тех местах, где эмульсия оказалась максимально сжатой. Мы уже отмечали, что даже малые по величине морщины на эмульсионном слое могут быть существенными и для коротковолнового света. Необходимо отметить еще один важный факт. Эмульсионные призмы обычно расположены упорядоченно. Поэтому пленка с такой волнистой поверхностью эмульсионного слоя будет в некоторой степени аналогична бипризматической решетке (рис. 47).

Конечно, в сечении система эмульсионных гребней («призм») не будет представлять собой систему треугольников, подобных показанным на рис. 47. Скорее всего это будет синусоидальная картина. Кроме того, высота гребней и глубина впадин на ней не будут равны друг другу, как это было в случае идеальных призм. Однако даже малое сходство гребней с призмами может привести к тому, что решетка будет усиливать два отклоненных пучка волн в направлениях, отвечающих дифрагированным волнам первого порядка. Каждая из призм имеет очень малую апертуру в вертикальном направлении, равную нескольким длинам волн, поэтому пучок от каждой из этих крохотных призм будет всегда широким. (Напомним, что призматический пучок, представленный на фиг. 42, также широкий.) Поскольку рассмотренная выше картина эмульсионных «призм» практически присуща любой решетке, изготовленной фотографическим способом, то почти всегда, даже в случае малых эмульсионных дефектов, происходит некоторое разветвление потока энергии, то есть появляются волновые потоки, движущиеся в направлениях, соответствующих направлению дифрагированных волн первого порядка.

Изменение толщины эмульсии голограммы, вызванное ее деформацией, приводит к интересным последствиям. Для некоторых голограмм интерференционная картина — система светлых и темных полос — может почти исчезнуть при обработке. Фотопластинки после обработки могут стать совсем прозрачными, но тем не менее они все еще будут сохранять много удивительных свойств, присущих обыкновенным (непросветленным) голограммам.

ОБЪЕМНЫЕ ДЕФЕКТЫ

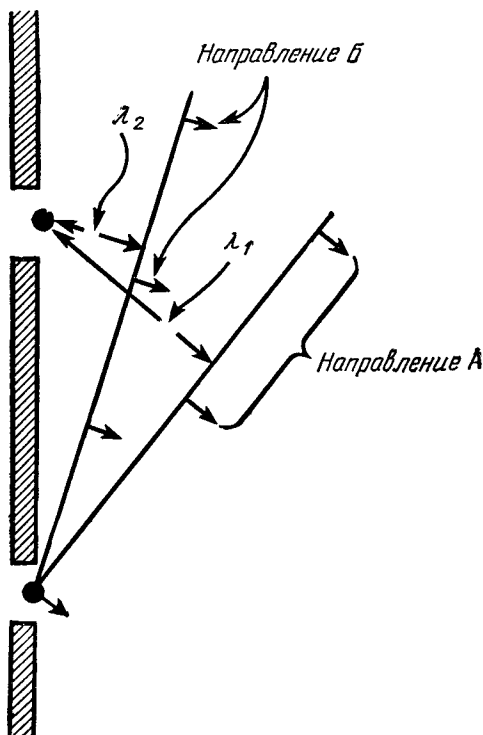
Третье различие между простой дифракционной решеткой и фотографической решеткой заключается в том, что эмульсия фотографической решетки имеет некоторую толщину, на которой может уложиться много длин волн. Интерференционная картина, порожденная двумя наборами волн, является трехмерной. При записи на фотопленку ее фиксирует не только поверхность эмульсии, как это для простоты предполагалось при рассмотрении рис. 8, но и *вся ее толщина*. Поскольку толщина эмульсионного слоя пленки значительна, то записанная на такой фотопленке объемная интерференционная картина может быть очень выразительной. Поэтому изготовленные фотографическим способом решетки, зонные пластинки и голограммы следует рассматривать как объемную запись интерференционной картины. Более подробно мы познакомимся с объемными эффектами в следующей главе.

ЗАВИСИМОСТЬ ДИФРАКЦИИ ОТ ДЛИНЫ ВОЛНЫ

Дифракционная решетка отклоняет световые пучки различного цвета в различных направлениях. Пучок света с длиной волны λ_1 отклоняется дифракционной решеткой на угол, который больше, чем угол отклонения пучка света с длиной волны λ_2 , меньшей λ_1 . На рис. 48 показана дифракция света с длиной волны λ_1 , и с длиной волны λ_2 . Поскольку голограмма является своего рода дифракционной решеткой, то рассмотрим подробнее, к каким последствиям приводит зависимость дифракции света от длины волны.

Дифракционная картина (рис. 39), образованная монохроматическими звуковыми волнами, аналогична дифракционной картине, порожденной монохроматическими световыми волнами. Для многокомпонентного света дифракционная картина получится совершенно иной. Когда белый свет (смесь световых волн различного цвета) падает на дифракционную решетку, образуется целая серия цветных полос. Если бы мы заменили монохроматические звуковые источники другими звуковыми источниками, испускающими также монохроматические звуковые волны с большей длиной волны, то во вновь полученной дифракционной картине светлые полосы находились бы уже в дру-

гом месте. С аналогичным явлением мы сталкиваемся и в случае световых волн. Световые волны определенного цвета образуют на экране светлую полосу (точнее, «окрашенную» полосу) там, где световые волны другого цвета образуют темную полосу. Таким образом, пройдя сквозь ди-

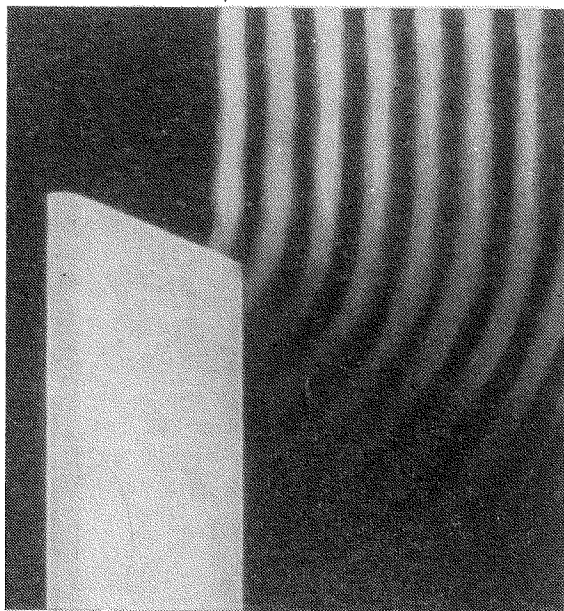


Р и с. 48. Зависимость угла дифракции волн, исходящих из двух щелей или из дифракционной решетки, от длины волны. Поскольку голограмма — это просто тип решетки, то ее рабочие характеристики (свойства) зависят от длины волны.

фракционную решетку, белый свет порождает дифракционную картину, которая представляет собой совокупность дифракционных картин, образованных каждым из компонентов белого света. По этой причине дифракционная картина от белого света оказывается цветной.

ДИФРАКЦИЯ НА РЕБРЕ ПРЯМОУГОЛЬНОГО БРУСКА

Теперь рассмотрим второй тип дифракции — дифракцию от краев непрозрачных тел. Проходя возле края непрозрачного тела, волна как бы огибает поверхности этого тела, в результате чего часть волновой энергии попадает в область тени. Картина такого явления показана на рис. 49. На пути звуковых волн, движущихся слева на-



Р и с. 49. Дифракция звуковых волн на ребре прямоугольного бруска. Поступающие слева плоские звуковые волны в верхней части снимка продолжают двигаться, не претерпев никаких искажений. Ниже, в теневой области, слабо видны круговые фронты волн, вызванные дифракцией волн на краю создающего тень предмета.

право, помещен длинный деревянный брусок, который не пропускает звуковые волны. Выше бруска, как видно на фотографии, плоские звуковые волны проходят беспрепятственно. Поскольку для звуковых волн брусок непроницаем, то справа за ним находится область акустической «тени». Край бруска является как бы источником волн.

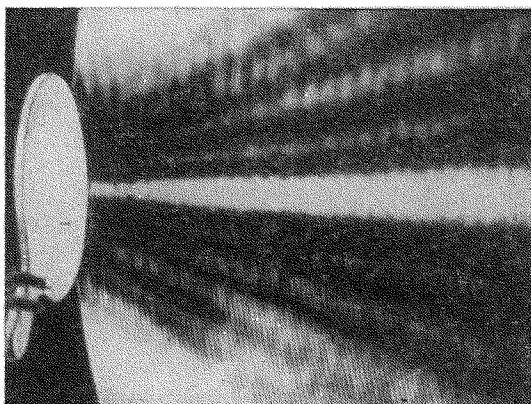
Волновой фронт отклоненных краем бруска в область акустической тени волн (на рис. 49 они едва заметны) имеет цилиндрическую форму. Общая ось всех этих «цилиндров» находится на краю бруска.

ДИФРАКЦИЯ ОТ ДИСКА

Если на пути волн поместить вместо доски круглый диск, то волны, обогнув периметр диска, создадут в области тени дифракционную картину, которая будет сложнее, чем в случае с бруском. Эту волновую картину мы уже видели на рис. 5 при рассмотрении вопроса об интерференции неоднородных наборов волн. Рассмотренная только что дифракция волн от края бруска помогает нам понять, как формируется дифракционная картина в случае дифракции волн от диска. Звуковые волны (рис. 5), движущиеся слева направо, над диском и под диском проходят беспрепятственно и, как на рис. 49, имеют плоский фронт волн. А вот волновой фронт волн, отклоненных в область «тени», уже не плоский, а сферический, причем центр сфер находится на границе диска. Сферические фронты волн, исходящих от всех точек периметра диска (окружности), на рис. 5 полностью не разделены. Все точки периметра диска являются как бы новыми источниками волн, в результате чего мы получаем много новых волновых наборов, которые интерферируют друг с другом. Именно таким образом и получается такая сложная картина как та, которую мы видим на рис. 5. Здесь вдоль центральной оси проходит узкая светлая полоса, структурно очень похожая на волновую картину прошедших над диском и под диском волн. Таким образом, множество новых источников, расположенных вдоль периметра диска, приводит к некоторой концентрации волновой энергии вдоль центральной горизонтальной оси.

Этот эффект Рэлей наблюдал как для световых, так и для звуковых волн. Когда на пути солнечных лучей он помещал в качестве диска монету достоинством в пенни, на экране в центре тени, отбрасываемой монетой, появлялось световое пятнышко. В солнечную погоду мы всегда видим тени от объектов. Поэтому как-то трудно поверить в то, что в центре тени интенсивность, или яркость, такая же, как если бы, по словам Рэлей, «экрана не было вовсе».

В своей книге «Теория звука»* Рэлей описал методы наблюдения аналогичного явления и для звуковых волн. Относительно дифракционной картины от диска Рэлей говорит, что «хотя она и не ограничена математической точкой на оси, она имеет небольшие размеры», и далее: «Непосредственно вблизи центрального пятна имеется кольцо почти полного молчания, а за ним наблюдается снова некоторое усиление эффекта»**. В отличие от рис. 5, на ко-



Р и с. 50. Профиль распределения амплитуд в области тени за диском. Он имеет ярко выраженный центральный максимум.

тором отчетливо виден волновой фронт, на рис. 50 представлена только амплитудная картина интенсивности звуковых волн позади диска. (Как на рис. 5, так и на рис. 50 показан один и тот же диск, помещенный в один и тот же пучок монохроматических звуковых волн.) На рис. 50 мы отчетливо видим три рэлеевские области: светлый центральный конус, затем «кольцо тишины», или две темные полосы, примыкающие сверху и снизу к конусу, и далее снова светлые области, в которых сосредоточена волновая энергия. Эти же самые области мы видим также и на рис. 5.

* Книга вышла в русском переводе: Дж. Рэлей, Теория звука, т. I, М.—Л., 1940; т. II, М.—Л., 1944.—Прим. ред.

** Том II, стр. 147.

ДИСКИ И ЗОННЫЕ ПЛАСТИНКИ

Как заметил Рэлей, концентрацию волновой энергии в области тени можно значительно увеличить с помощью дополнительных колец, расположенных вокруг диска и блокирующих распространение энергии волн в другие области, или зоны. Диск с дополнительными кольцами представляет собой *зонную пластинку*, которая часто используется как фокусирующая система некоторых форм волновой энергии. В следующей главе мы увидим, что оптические зонные пластинки очень похожи на голограммы и их можно получить путем фотографической записи интерференционной картины сферических волн и набора плоских волн (опорный пучок). Знакомство с основными свойствами зонных пластинок поможет нам лучше понять как способы изготовления голограмм, так и наиболее существенные их свойства.

ЗОННЫЕ ПЛАСТИНКИ

В первой главе, говоря о свойствах голограмм, мы отмечали, что каждая точка освещенного предмета за счет интерференции сферических волн и плоских опорных волн образует на фотографической пластинке новую круговую интерференционную картину, то есть свою собственную зонную пластинку. Как мы уже указывали ранее, сходство между голограммами и оптическими дифракционными приборами (зонными пластинками) было впервые отмечено в 1950 году английским ученым Дж. Л. Роджерсом. Рассмотрим общие свойства голограмм и зонных пластинок более подробно.

КЛАССИЧЕСКАЯ ЗОННАЯ ПЛАСТИНКА

Зонная пластинка — это система плоских концентрических колец, которые отклоняют волновой пучок от направления его первоначального распространения. Открытые участки пластинок пропускают волны, которые складываются в фокусе конструктивно, а непрозрачные участки препятствуют прохождению волн, которые бы складывались в фокусе с волнами, прошедшими через прозрачные участки деструктивно.

Такую картину сложения волн можно получить лишь при определенном расположении колец на зонной пластинке, в центре которой находится темное пятно (диск). Как следует располагать кольца на зонной пластинке, видно из рис. 51. В предыдущей главе мы указывали, что за счет дифракции от диска часть волновой энергии концентрируется вдоль центральной оси. Далее, в некоторой точке на центральной оси концентрацию волновой энергии можно увеличить, если использовать непрозрачные кольца,

которые не будут пропускать волны, дающие в этой точке деструктивную интерференцию. Размеры и положение блокирующих колец можно определить способом, указанным на рис. 51. Проведем систему концентрических окружностей с центром в предполагаемом фокусе. Радиус каждой последующей окружности будет больше радиуса предшествующей окружности на длину полуволны. Пересечения

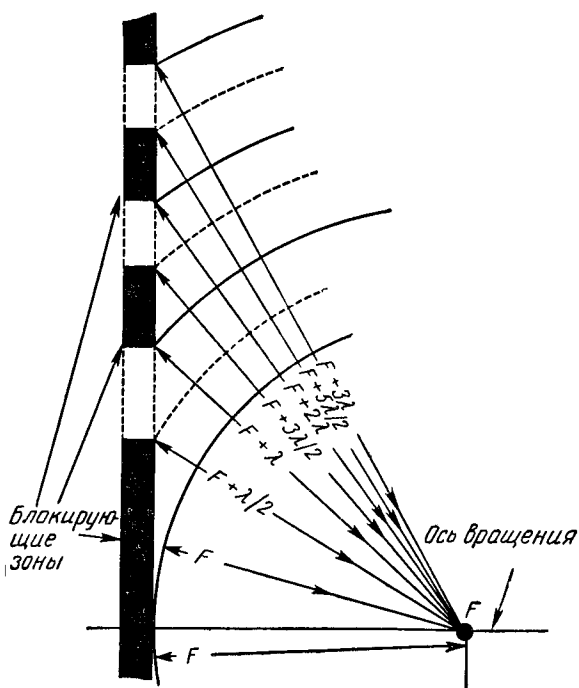


Рис. 51. Дифракция от диска, дополненного системой колец. Если дифракция от диска дополняется дифракцией от колец, окружающих диск, то полученная картина соответствует дифракционной картине волн от зонной пластинки.

окружностей с пластинкой указывают границы зон. Точка касания первой окружности с пластинкой дает нам положение центра непрозрачного пятна. Точка пересечения второй окружности с пластинкой дает нам внешнюю границу пятна. Положения точек пересечения третьей и четвертой окружностей определяют нижнюю и верхнюю гра-

ницы первой блокирующей зоны (первого кольца и т. д.). Очевидно, что положения блокирующих зон определяются длиной волны, поэтому, пропуская сквозь такую зонную пластинку свет, имеющий другую длину волны, мы не получим желаемого эффекта (то есть усиления освещенности).

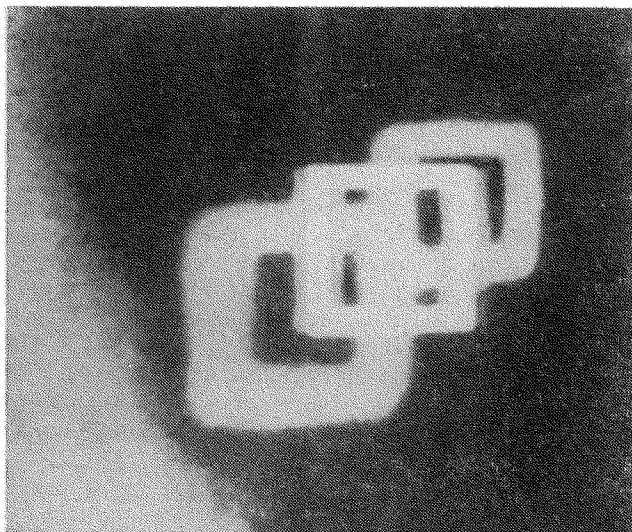
Зонные пластинки можно использовать в оптике, в микроволновой технике и в акустике. Зонная пластинка, предназначенная для звуковых волн, как заметил Рэлей, может играть роль собирательной линзы, точнее части линзы. Системы антенн микроволновых радиолокационных станций времен второй мировой войны включали в себя зонные пластинки. В настоящее время некоторые микроволновые линзовые антенны также используют принцип работы зонных пластинок. В таких системах толщина линз меняется на одну длину волны от зоны к зоне (см., например, рис. 42 и 43). Для фокусировки волновых пучков зонные линзы являются более эффективными, чем зонные пластинки, поскольку в зонных пластинках имеются потери энергии либо за счет отражения волн, либо за счет поглощения волн блокирующими зонами, а для зонных линз такие потери практически отсутствуют.

ЗОННЫЕ ПЛАСТИНКИ КАК РАССЕИВАЮЩИЕ ЛИНЗЫ

Рэлей сравнивал свою зонную пластинку с собирательной линзой. И теперь в оптике и микроволновой технике зонные пластинки чаще всего используются как фокусирующие системы. Тот факт, что зонные пластинки порождают также и пучок расходящихся волн, вообще не был оценен по достоинству. Свойство зонных пластинок давать расходящиеся пучки света очень важно в голографии, поскольку именно благодаря расходящимся от голограммы волнам (восстановленные волны) наблюдатель видит трехмерное изображение предмета.

Из простых графических построений видно, что зонные пластинки должны порождать наряду со сходящимся потоком также и расходящийся поток волн. Точно так же, как мы рисовали зонную пластинку, которая давала сходящийся пучок волн (рис. 51), можно нарисовать зонную пластинку, порождающую расходящийся пучок волн. Выберем точку, от которой должны расходиться волны таким образом, чтобы она находилась слева от пластинки

и на расстоянии, равном фокусному. Тогда рассмотрим, как и прежде, пересечение окружностей с центром в этом сопряженном фокусе и радиусами, увеличивающимися на длину полуволны, с пластинкой, мы обнаружим, что полученный рисунок тождествен рис. 51. Иными словами,



Р и с. 52. Три изображения, создаваемые голограммной зонной пластинкой диаметром 5,08 см. Здесь зонная пластинка — это просто часть темного круга, ограниченного белым кольцом. В качестве предмета для записи на пластинку использовалась белая квадратная рама. В центре снимка мы видим отчетливое изображение рамы, образованное волнами нулевого порядка, левее и ниже — мнимое изображение, сформированное расходящимися волнами, и, наконец, правее и выше — действительное изображение предмета, образованное сходящимися волнами.

для дефокусирующей зонной пластинки блокирующие зоны находятся точно в том же самом месте, что и для фокусирующей.

Следовательно, когда на любую зонную пластинку падают плоские волны, она порождает как расходящийся, так и сходящийся пучок волн. А это приводит к тому, что если мы поместим оптическую зонную пластинку перед предметом, то увидим несколько изображений предмета. Аналогичная ситуация как раз и представлена на рис. 52.

Зонная пластинка, которая использовалась в этом случае, была фотозаписью интерференционной картины, образованной световыми волнами от точечного источника, интерферирующими с плоскими волнами. На рис. 52 зонная пластинка — это часть темного круга. Изображение выглядит как три белые квадратные рамки: первое наиболее яркое и отчетливое изображение (зонная пластина чрезвычайно прозрачна) — это сам предмет и, кроме него, два смещенных вправо и влево слегка расплывчатых изображения белой рамки. Центральное изображение формируют волны нулевого порядка; изображение, смещенное в направлении центра пятна, — сходящиеся волны (волны первого порядка) и изображение, смещенное влево, — расходящиеся волны (волны тоже первого порядка). Следует заметить, что на рис. 52 мы видим только изображения, образованные волнами нулевого и первого порядков. Если бы мы работали с классической зонной пластинкой, то такой картины не наблюдалось бы. Постепенное изменение прозрачности при переходе от светлой полосы к темной на фотографической зонной пластинке приводит к тому, что изображения высших порядков оказываются подавленными.

Поскольку предмет находился близко от оси зонной пластинки, то изображения оказались наложенными друг на друга (рис. 52). Если бы мы отодвинули его подальше от оси пластинки, то все три изображения были бы расположены в различных местах, то есть не было бы никакого наложения изображений друг на друга.

ПЛАСТИНКИ С ПЕРЕСТАВЛЕННЫМИ ЗОНАМИ

Если у зонной пластинки мы поменяем местами открытые и блокирующие зоны, то действие зонной пластинки на проходящий сквозь нее волновой пучок от такой перестановки не изменится (см., например, рис. 51). Это свойство зонных пластинок особенно важно в голографии. Если бы центральное пятно и другие блокирующие зоны на рис. 51 были открытыми зонами, то волновые наборы, прошедшие сквозь такие зоны, все равно были бы сдвинуты в фокусе точно на целое число длин волн. Кроме того, поскольку радиусы, проведенные из фокуса к верхним границам первоначально открытых (теперь блокирующих) зон, отличаются от радиусов, проведенных к верхним границам

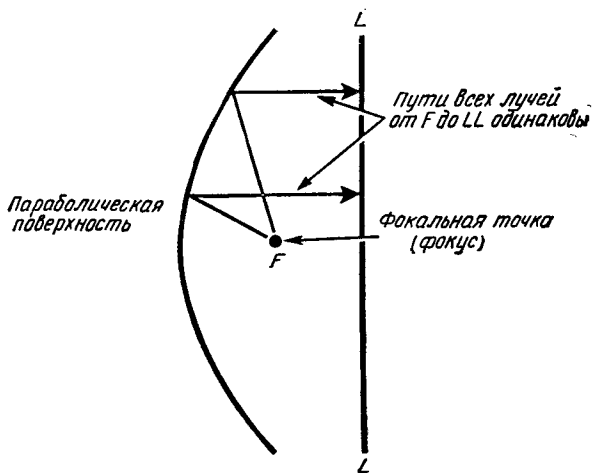
новых открытых зон, опять же на длину полуволны, то, естественно, действие такой пластинки на волновой пучок не изменится.

Можно не ограничиваться одной лишь перестановкой зон при изучении свойств зонных пластинок, а пойти еще дальше. Например, центральную зону, будь она открытой или блокирующей, можно сделать вообще любого размера. Надо лишь помнить, что следующая зона должна быть такой, чтобы расстояние от фокуса до ее внутренней границы отличалось от расстояния между ее внешней границей и фокусом на длину полуволны. Для всех последующих зон картина должна быть аналогичной. В результате действия такой зонной пластинки на проходящий поток волн оказывается, что прошедшие волны складываются, а волны, которые давали бы деструктивную интерференцию, поглощаются блокирующими зонами.

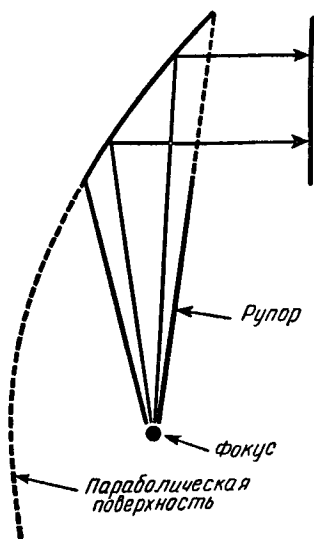
Именно благодаря тому, что в зонных пластинках допустима перестановка открытых и блокирующих зон, их можно легко получать фотографическим способом. Рассмотрим еще раз рис. 15, на котором показано получение голограммы предмета, представляющего собой три экрана. В каждом экране имеется по одному отверстию, причем все три экрана находятся на разных расстояниях от фотопленки. В одной из трех интерференционных картин центральную зону за счет большой экспозиции можно сделать блокирующей. Для двух других интерференционных картин центральная зона может оказаться либо полностью открытой, либо полуоткрытой, либо блокирующей. Поскольку от зонной пластинки требуется, чтобы следующие друг за другом зоны были расположены надлежащим образом, а именно чтобы расстояние от фокуса последовательно увеличивалось на длину полуволны от границы к границе для каждой зоны, и поскольку именно это свойство присуще круговой волновой картине, то все три записанные на фотопленку интерференционные картины на рис. 15 (см. также рис. 14) автоматически становятся эффективными зонными пластинками.

ОФСЕТНЫЕ ЗОННЫЕ ПЛАСТИНКИ

Чтобы понять, как действует офсетная зонная пластинка, нам необходимо рассмотреть некоторые характерные особенности двух фокусирующих систем, а именно пара-



Р и с. 53. Свойство параболической поверхности. Сферические волны, исходящие из фокуса F , превращаются параболической поверхностью в плоские волны, поскольку время, затраченное волнами на движение от фокуса до плоскости LL , одинаково для всех лучей.



Р и с. 54. Часть параболического отражателя в сочетании с рупором, дающая плоский волновой фронт.

болической поверхности и зонной пластинки. Параболические отражатели часто используются как микроволновые антенны. Способность такого отражателя формировать пучок плоских волн легко понять из геометрических свойств параболы (рис. 53). Очень часто используется только часть поверхности параболических отражателей. На рис. 54 мы видим антенну, которая отражает исходящие из рупора волны, причем в этом устройстве для отражения используется только часть параболической поверхности. Это и

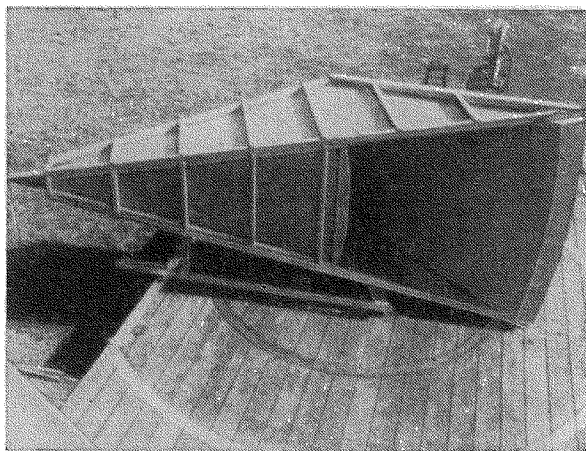
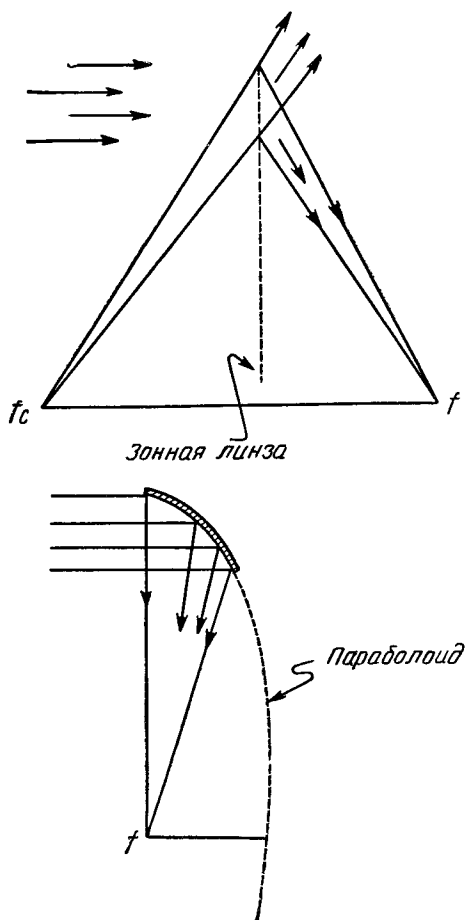


Рис. 55. Одна из распространенных конструкций микроволновой антенны. Рупор используется в комбинации с параболическим отражателем, фокальная точка которого совпадает с вершиной рупора.

есть офсетный отражатель и один из типов антенн. В настоящее время такие антенны (рис. 55) широко применяются в микроволновой связи.

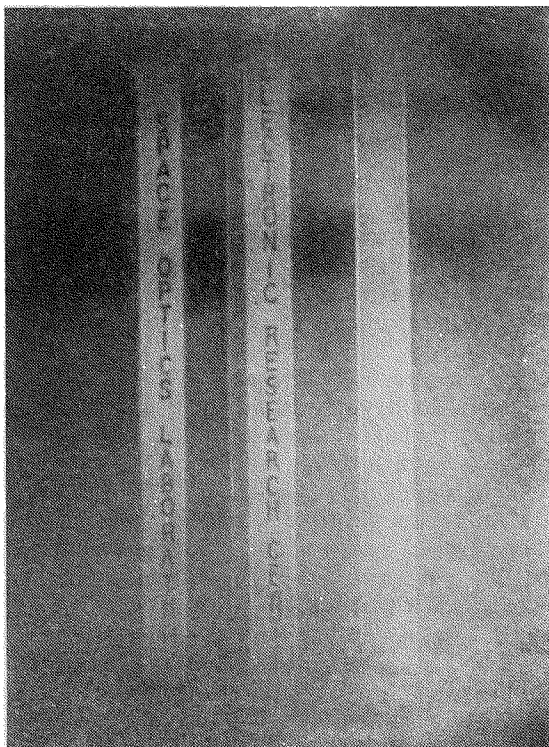
Аналогичным образом часть зонной пластинки (офсетная зонная пластинка) может фокусировать пучок волн. Действие такой офсетной зонной пластинки показано на рис. 56. Плоские волны, движущиеся слева направо, преобразуются частью зонной пластинки в сходящиеся волны. Эти волны фокусируются в точке f (фокусе). Кроме того, эта же часть зонной пластинки действует и как рассеивающая линза, порождая тем самым расходящийся пучок волн, которые как бы исходят из сопряженной к фокусу точки f_c .



Р и с. 56. Часть параболы (нижний рисунок) и части зонной пластинки (верхний рисунок), фокусирующие (или дефокусирующие) падающий пучок волн.

ДВУЛУЧЕВЫЕ ГОЛОГРАММЫ *

Для получения первых голограмм с помощью лазерного света Лейт использовал призму. Призма создавала наклонный опорный пучок, который затем интерферировал с предметным пучком. Изготовленные таким способом го-



Р и с. 57. Фотография голограммы, сделанная с помощью фотокамеры, в которой в качестве линзы использовалась зонная пластинка.

лограммы Лейт назвал двулучевыми, или офсетными, голограммами.

Этот термин использовался для того, чтобы отличать двулучевые голограммы от голограмм Габора, которые из-

* Автор предпочитает называть такие голограммы офсетными.— *Прим. ред.*

готовавливались с помощью одного светового пучка. Свет, прошедший над предметом или под предметом, служил опорным пучком. В действительности же офсетную голограмму можно получить и с помощью однолучевой техники (см., например, рис. 14). Луч света от лазера проходит как сквозь отверстие в экране, так и над экраном, создавая тем самым предметный и опорный пучки. Как мы уже говорили, после проявления и закрепления такую пленку можно осветить лазерным светом и получить оба изображения предмета (точечного источника света) — действительное и мнимое.

ЗОННЫЕ ПЛАСТИНКИ КАК ЛИНЗЫ

В различных областях связи, в астрономии, в аппаратуре космических станций было предложено использовать в качестве очень легких линз изготовленные фотографическим способом зонные пластинки. Их фотографическое изображение можно получить на кусочке легкого пластика маленького размера; затем это изображение можно вновь увеличить до нужной апертуры и использовать для концентрации лазерных пучков или для фотографии. На рис. 57 показано, как зонные пластинки, сделанные фотографическим способом, могут действовать в качестве оптических линз. Эта фотография была сделана с помощью «камеры», в которой вместо линзы использовалась зонная пластинка. Следует отметить, что эта же зонная пластинка использовалась и при получении рис. 52.

ОБЪЕМНЫЕ ЗОННЫЕ ПЛАСТИНКИ

Зонные пластинки, используемые для микроволн и звуковых волн, а также стеклянные зонные пластинки с параллельными линиями, используемые для световых волн, обычно рассматриваются как двумерные (плоские) структуры. Однако в случае световых волн из-за их малой длины следует учитывать эффект объема, приняв во внимание толщину эмульсионного слоя зонной пластинки. Эмульсионный слой фотопластинки может иметь толщину порядка двадцати длин волн света. Поэтому записанная на такой фотопластинке интерференционная картина оказывается трехмерной.

Впервые трехмерную интерференционную картину для получения рефлексных голограмм с последующим восстановлением изображений в лучах белого света в голографии использовал Дж. Строук с коллегами*. Изготовленные фотографическим способом зонные пластинки действительно являются формой таких объемных голограмм. Благодаря эмульсионному слою толстослойные зонные пластинки существенным образом отличаются по количеству информации от простых двумерных зонных пластинок, то есть объемные эффекты ставят рефлексные** голограммы намного выше обычных голограмм. Объемная интерферограмма служит основой рефлексных — рассматриваемых в отраженном свете — и трехцветных голограмм.

СТОЯЧИЕ ВОЛНЫ

Интерференция опорного пучка волн с предметным пучком, как мы только что отмечали, происходит не только на поверхности эмульсионного слоя, но и по всей его толщине. Таким образом, если на толщине слоя эмульсии укладывается много длин волн, то на фотопластинке с таким слоем эмульсии можно записать объемную интерференционную картину. На возможность записи трехмерной волновой картины внутри эмульсионного слоя фотопленки указывал еще в 1894 году французский ученый Габриэль Липпман. Он предлагал, используя такие объемные интерференционные картины, получать цветные фотографии. Волновые картины, которые рассматривал Липпман, были образованы *стоячими волнами*. Поскольку такие волны имеют отношение и к голографии, то мы обсудим некоторые свойства стоячих волн.

На частотном графике, приведенном на рис. 35, показаны различные резонансы, причем контур каждого из них имеет волнообразный вид. Такую картину образовали волны, мечущиеся между двумя концами стенок. Когда движущиеся волны порождают стационарную картину, их называют стоячими. Две волны, одна из которых движется вправо, а другая — влево, создают стоячую волну. Таким

* Основы теории рефлексной голограммы были разработаны впервые советским физиком Ю. Н. Денисюком в 1962 году (Ю. Н. Денисюк, *ДАН СССР*, 144(6), 1275, 1962.— *Прим. перев.*

** Рефлексные голограммы в популярной литературе иногда называются отражательными голограммами.— *Прим. ред.*

образом, стоячие волны мы можем всегда рассматривать либо как волны, образованные падающими и отраженными от стенки волнами, либо как волны, образованные движущимися навстречу друг другу волнами, имеющими одинаковую частоту. Для изготовления голограмм и зонных пластинок наибольший интерес представляют волны, движущиеся навстречу друг другу.

На рис. 58 мы видим, как с помощью двух зеркал *A* и *B* лазерный пучок, падающий сверху вниз, расщепляется на

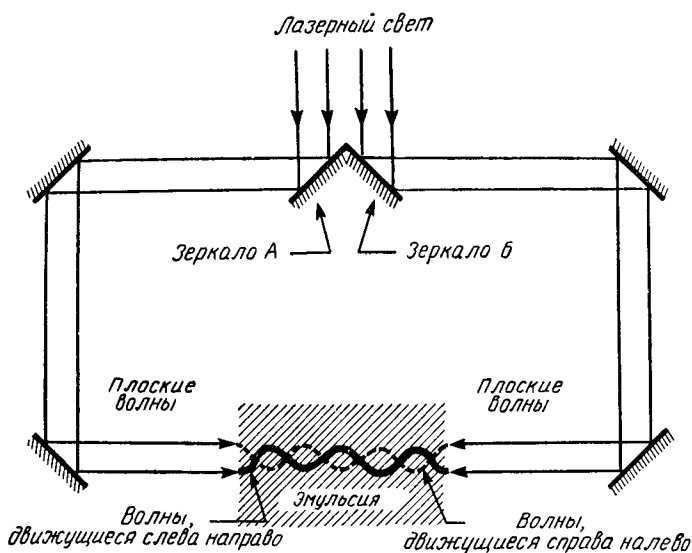


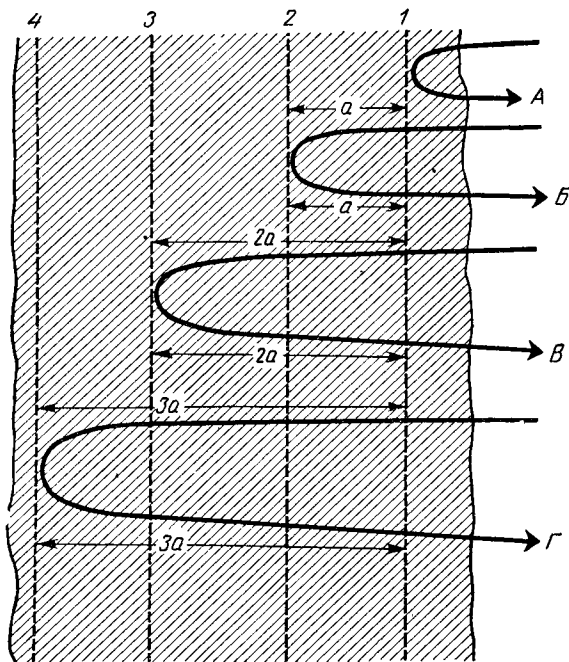
Рис. 58. Получение стоячих световых волн. Когерентные волны, движущиеся навстречу друг другу, образуют стоячие волны, которые можно записать в фотографической эмульсии в форме светлых и темных слоев.

два горизонтальных пучка. Далее, с помощью других четырех зеркал эти пучки преобразуются в два горизонтальных пучка, движущихся навстречу друг другу. Накладываясь друг на друга, движущиеся пучки порождают стоячие волны. Иными словами, на рис. 58 мы видим картину стоячих волн, образованную внутри эмульсионного слоя фотографической пластинки. Несомненно, внутри эмульсионного слоя будут области, в которых произошла деструктивная интерференция волн (слабо освещенные области), а также области, в которых произошла конструк-

тивная интерференция волн (сильно освещенные области). Как и прежде, эти области (конструктивной и деструктивной интерференции) будут чередоваться друг с другом. После проявления и закрепления эмульсии фотопластины будет представлять собой систему слоев, причем плоскости (области конструктивной интерференции), разделяющие эмульсию на слои, будут отстоять друг от друга на расстоянии, равном длине полуволны лазерного света, которым освещалась эмульсия.

ЭМУЛЬСИОННАЯ РЕШЕТКА КАК ОТРАЖАТЕЛЬ

Только что рассмотренная эмульсионная решетка очень хорошо отражает свет, если длина его полуволны равна



Фотографическая эмульсия

Р и с. 59. Отражение световых волн. Поверхности, образованные в эмульсии при записи картины стоячих волн (рис. 58), отражают волны, длина которых равна удвоенному расстоянию между поверхностями. Отраженные от таких поверхностей волны конструктивно интерферируют друг с другом.

толщине слоев эмульсии. Отражение света эмульсионной решеткой мы объясним с помощью рис. 59. Падающие справа на эмульсию волны отражаются последовательно от многочисленных плоскостей (областей конструктивной интерференции) 1, 2, 3, 4 и т. д., расположенных внутри эмульсионного слоя. Заметим, что эти плоскости не являются непрозрачными для света. Некоторые волны, например *A*, отражаются от первой поверхности. Другие волны, такие, как *B*, *B* и *Г*, проходят через несколько поверхностей, а затем отражаются. Когда волны *B*, отразившись от поверхности 2, выходят из эмульсии, они отстают от волн *A* на величину, равную $2a$. Волны *B* и *Г*, выходя из эмульсии, отстают от волн *A* на величину, соответственно равную $4a$ и $6a$. Если величина a равна длине полуволны падающего света, то все три сдвига равны целому числу волн. Поэтому вышедшие из эмульсии наборы волн *A*, *B*, *B* и *Г* будут «идти в ногу», то есть гребни и впадины всех наборов волн будут совпадать. Таким образом, световые волны с длиной волны, равной $2a$, отразившись от всех плоскостей эмульсионных слоев, будут давать конструктивную интерференцию — отражательная способность эмульсионной решетки для таких волн очень высокая.

Поскольку волны, имеющие другую длину, не будут так складываться, эмульсионная решетка отразит их значительно слабее. Следовательно, если мы будем освещать такую эмульсионную решетку белым светом, который представляет собой совокупность всех цветов видимого света, то отраженный пучок света получится одноцветным. Если в процессе проявления и закрепления на фотоэмульсии не появились морщины (чего, конечно, нелегко добиться), то цвет этого отраженного света будет в точности тем же, что и цвет лазерного света, с помощью которого изготовлена эмульсионная решетка.

Именно на основе такого процесса Липпман хотел создать цветную фотографию. Совсем недавно эта же самая процедура позволила восстанавливать изображения предметов путем освещения голограмм (рефлексных голограмм) не лазерным, а белым светом. Позднее это явление было использовано при изготовлении *цветных* рефлексных голограмм, для чего голограммную пластинку (фотопластинку) освещали последовательно лазерным светом двух или трех различных цветов.

РЕФЛЕКСНЫЕ ЗОННЫЕ ПЛАСТИНКИ

Рассмотренным выше способом можно изготовлять также и зонные пластинки. На рис. 60 показаны движущиеся навстречу друг другу плоские и сферические волны. Эти волны с разных сторон попадают на фотографическую пластинку. За счет интерференции внутри эмульсии возникает зонная продольная решетчатая структура. Если

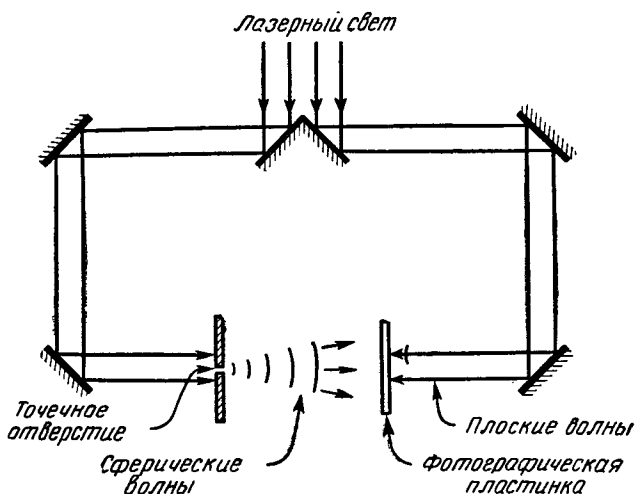


Рис. 60. Получение рефлексной зонной пластинки. Когерентные плоские и сферические волны с разных сторон освещают фотографическую пластинку, в результате чего получается рефлексная зонная пластинка. Этот процесс аналогичен процессу получения рефлкторных голограмм (голограмм, которые можно рассматривать в белом свете).

после проявления и закрепления фотопластинку осветить белым светом, она будет отражать и фокусировать только свет одного определенного цвета и пропускать сквозь себя световые волны других цветов. Когда такая рефлексная зонная пластинка используется в качестве линзы, она создает одноцветное (монокроматическое) изображение.

Чтобы сделать трехцветную зонную пластинку (зонную камерную линзу), мы должны осветить фотографическую пластинку, как это показано на рис. 60, не один раз, а последовательно три раза, используя для этой цели три лазерных источника, каждый из которых испускает свет,

отличный по цвету от света других источников. При этом в проявленной эмульсии формируются три продольные решетки, каждая из которых, когда пластинка освещается белым светом, отражает и фокусирует только свет вполне определенного цвета, а именно свет с длиной полуволны, равной постоянной решетки (расстоянию между отражающими поверхностями). Если бы мы использовали такую рефлексную зонную пластинку в качестве линзы в фотоаппарате и сфотографировали предмет на цветную пленку, то получили бы на пленке три изображения предмета, имеющие различный цвет, причем каждое цветное изображение предмета было бы вполне удовлетворительным.

В предыдущей главе мы отмечали некоторые различия между обычными решетками и решетками, изготовленными фотографическим способом. Аналогичные различия существуют между обычными зонными пластинками и фотографическими зонными пластинками. В классической зонной пластинке зоны либо полностью прозрачны, либо полностью непрозрачны, тогда как для фотографической зонной пластинки характерен постепенный переход от наиболее непрозрачных областей к наиболее прозрачным. В результате этого, как было отмечено Роджерсом, оказывается, что дифрагированные волны первого порядка являются наиболее выделенными. За счет дефектов в эмульсии (сдвигов, морщин) толщина зонной фотографической пластинки перестает быть постоянной, что также выделяет дифрагированные волны первого порядка. Поскольку на толщине эмульсионного слоя укладывается много длин световых волн, то фотографическая зонная пластинка отличается от классической зонной пластинки еще и тем, что плоская зонная структура классической зонной пластинки заменяется трехмерной зонной структурой у фотографической зонной пластинки. Рассмотренные выше свойства фотографических зонных пластинок являются характерными также и для голограмм.

Глава VI

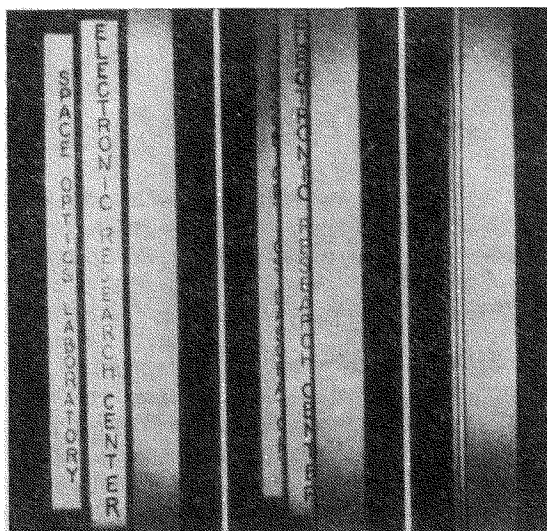
СВОЙСТВА ГОЛОГРАММ

В этой главе мы рассмотрим необычайные свойства голограмм. Некоторые из этих свойств столь удивительны, что их первые описания в литературе часто вызывали недоверие.

ТРЕХМЕРНЫЙ РЕАЛИЗМ

Одной из наиболее эффективных характеристик голограмм, вызвавшей такой огромный интерес к голографии, явилась их способность создавать чрезвычайно реалистические трехмерные изображения предметов. Без голограммы и соответствующего лазерного света очень трудно и говорить и писать об этом свойстве. Однако некоторое представление об этом эффекте можно получить, рассматривая несколько различных фотографий одной и той же голограммы, естественно, надлежащим образом освещенной. Три такие фотографии показаны на рис. 61. На голограмму записывались три помещенных один позади другого вертикальных бруска, на которых по вертикали были написаны названия научных центров. Голограмма была изготовлена аналогично голограмме сферы и пирамиды (рис. 6). Если осветить голограмму лазерным светом, то на ней под различными углами наблюдения можно отчетливо видеть три бруска. Но существует один особый угол зрения, когда наблюдатель видит только первый брусок, поскольку он полностью закрывает остальные. Именно под таким углом съемки и была сделана фотография в правой части рис. 61. Фотография, расположенная в центре, получена в тот момент, когда фотоаппарат был сдвинут немного влево: при этом стали видны некоторые части второго и третьего брусков. Наконец, фотоаппарат был

сдвинут влево настолько, что изображения трех брусков уже не перекрывались (см. левый снимок на рис. 61). Отметим, что в действительности голограмма дала бы нам более реалистическую картину трехмерного изображения, нежели эти три фотографии. Наблюдатель очень быстро



Р и с. 61. Три фотоснимка освещенной лазерным светом голограммы, на которой зарегистрированы изображения трех вертикальных брусков. Перемещая последовательно фотокамеру вправо (эти три снимка были сделаны под разными углами съемки), удалось добиться такого положения, когда ближайший брусок полностью загородил собой остальные.

убеждается в том, что голограмма преподносит нам гораздо больше сведений о предмете (сцене), чем, например, стереофотография, использующая два стереофотоснимка. В самом деле, рассматривая голограмму, наблюдатель может изучать трехмерное изображение под разными углами, тогда как объемное изображение в стереофотографии можно наблюдать лишь под одним углом зрения. Поскольку свойство голограмм воспроизводить объемный образ предмета, несомненно, дало большой толчок развитию голографии, мы позволим себе кратко в хронологическом порядке рассказать, как вошло в голографию третье измерение.

Еще в 1949 году Габор писал: «Фотография содержит полную информацию, необходимую для восстановления предмета, который может быть как двумерным, так и трехмерным». Однако в своих опытах Габор использовал в качестве объектов двумерные прозрачные предметы (диапозитивы) и очень мало говорил о том, как записать на фотопластинку трехмерный предмет и как восстановить его изображение. Аналогичным образом поступил и Лейт, который был большим специалистом в области радиолокации. Когда в декабре 1963 года он применил лазеры в голографии, то в качестве объектов, как и Габор, выбрал двумерные прозрачные предметы.

Таким образом, Лейт все еще работал с двумерными предметами и, естественно, получал двумерные изображения. К тому же о своих экспериментах в голографии он говорил на языке теории связи и радиолокации; в конце книги мы укажем на близкое сходство между голографией и когерентными радаром (радиолокационными станциями). Спустя некоторое время Лейт и его группа применили понятия и принципы техники связи к трехмерным рефлексным голограммам. В то же время Дж. Строук рассматривал голограммы как дифракционные приборы. В лекциях, изданных Мичиганским университетом в 1964 году, он описал, как световые волны, отраженные на фотографическую пластинку двумя смежными слегка наклонными плоскими зеркалами, образуют фотографическую решетку и как при замене одного из двух зеркал трехмерным предметом получается голограмма, позволяющая восстанавливать трехмерное изображение этого предмета. Некоторые ученые с трудом соглашались с точкой зрения Лейта и Строука. Так, во время дискуссии развернувшейся по докладу Строука о голографии, прочитанному в Риме в сентябре 1964 года, один крупный итальянский ученый сказал: «Световой луч не может нести информацию о трехмерном предмете, поскольку такой предмет описывается тремя степенями свободы, тогда как световой луч характеризуется только двумя степенями свободы». Хотя на первый взгляд его возражение кажется логичным, только знакомства с рис. 15 вполне достаточно, чтобы понять, что трехмерную информацию можно записать с помощью голограммного процесса на двумерной поверхности.

Не все сразу понимают, как получается в голографии трехмерное изображение. Рассмотрим рис. 62, на котором

показан процесс получения голограммы маленького (почти точечного) яркого источника. Между источником и голограммой находится непрозрачный экран. Совершенно очевидно, что если бы наблюдатель в действительности расположился ниже демаркационной линии $X-X$, то он не уви-

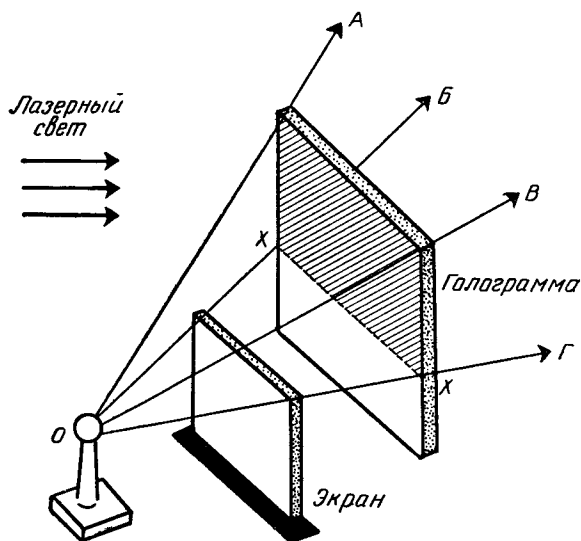


Рис. 62. Голограмма точечного источника света, частично блокированного от фотопленки непрозрачным экраном. Такая голограмма обладает парадоксальным свойством — при восстановлении изображения воображаемый источник света оказывается все еще блокированным несуществующим экраном.

дел бы точечного источника, поскольку непрозрачный экран полностью закрывал бы его от глаз наблюдателя. Однако скептик скажет, что, когда мы восстанавливаем изображение, экран на самом деле отсутствует, мы лишь думаем, что он есть (он существует только в нашем воображении), поэтому как он может в таком случае преграждать путь лучам, исходящим от источника?

Ответить на этот вопрос нам поможет аналогия с зонной пластинкой. В процессе изготовления голограммы только часть лучей от источника попала на фотографическую

пластинку, точнее, на верхнюю ее часть (заштрихованная область). Область, расположенная ниже линии $X-X$, оказалась недоступной для лучей, то есть экранированной. Следовательно, когда речь идет о светящейся точке, то ее голограмма («окно») оканчивается на линии $X-X$ и ее зонная пластинка (часть зонной пластинки) может отклонять лазерный свет лишь в телесный угол, образованный пирамидой $OABV$. Иными словами, точечный источник действительно блокируется даже тогда, когда на самом деле экрана нет!

ГОЛОГРАММЫ И ФОТОГРАФИИ

Мы укажем на две основные особенности, которые отличают голограмму от фотографии. Фотографию обычно делают как бы в два этапа: сначала получают негатив, на котором светлые участки сфотографированного предмета выглядят темными, а темные — светлыми, затем с негатива печатают позитив (обращенный негатив), на котором уже получается прямое изображение предмета. В голографии как негатив, так и позитив дают совершенно одинаковые трехмерные изображения предмета. Это свойство вытекает из аналогии между голограммами и зонными пластинками. Мы уже отмечали, что если в зонных пластинках и решетках темные пятна сделать светлыми, а светлые — темными, то изображение, восстановленное с помощью такой копии, не станет негативом, а останется позитивным и неотличимым от изображения, полученного с исходной зонной пластинки. Это и есть одно из основных отличий голографии от фотографии.

Второе отличие голограммы от фотографии заключается в том, что на голограмме в результате записи появляется зонная структура, то есть голограмма в свою очередь становится фотографической зонной пластинкой. Если мы поднесем голограмму к свету, то едва ли увидим какую-либо картину. Скорее всего мы не увидим ничего, что говорило бы нам о записанной на этой пленке какой-либо сцене. На негативе, как почти всем известно, на свету мы всегда видим изображение. Голограмма представляет собой однородную серую пластинку, которая не раскрывает записанных на ней свойств и характеристик сцены до тех пор, пока она не будет освещена светом с надлежащей длиной волны.

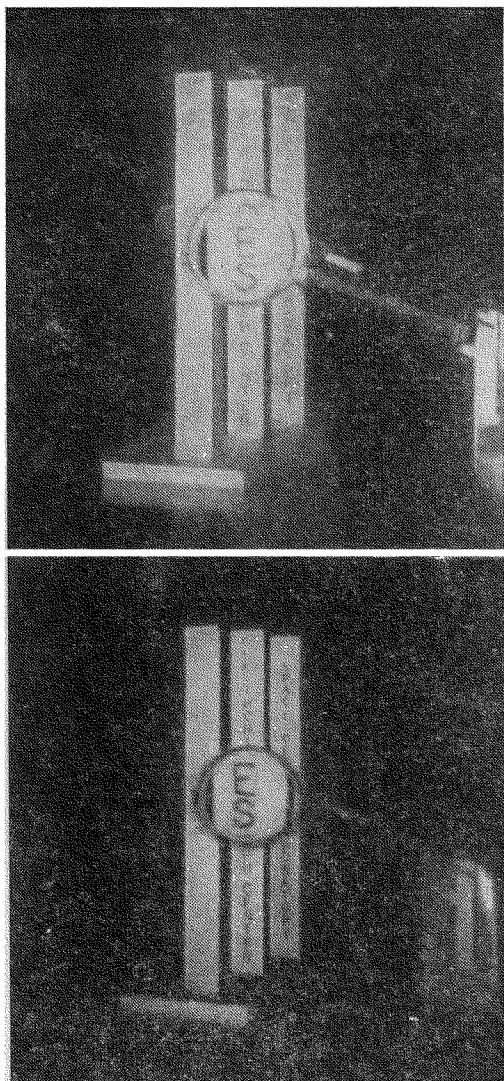
ПАРАЛЛАКС И ДЕЙСТВИЕ ЛИНЗЫ

Людам, рассматривающим голограмму, обычно рекомендуется двигать головой либо из стороны в сторону, либо вверх-вниз. Благодаря явлению параллакса это позволяет более полно ощутить объемность изображения. Из обыденной жизни мы знаем, что, когда мы идем, отдаленные от нас предметы как бы движутся вместе с нами. В то же время этого нельзя сказать о предметах, расположенных более близко. Явление параллакса очень хорошо знакомо пассажиру, едущему в трамвае: телефонные столбы, расположенные рядом с рельсами, буквально мелькают перед глазами, а столбы, находящиеся на большом расстоянии от трамвайной линии, кажутся движущимися вместе с трамваем. То, что, рассматривая голограмму, наблюдатель сталкивается с явлением параллакса, еще более усиливает ощущение реальности изображения.

Поскольку наблюдатель, глядя на голограмму, должен постоянно двигать головой, чтобы лучше почувствовать объемность изображения, изобретательные экспериментаторы часто изготавливают голограмму предметов, сделанных из граненого стекла. Действительно, когда кто-либо смотрит на такие предметы, освещенные ярким светом, и двигает при этом головой, он отчетливо видит, как появляются и исчезают яркие блики света. Этот эффект является характерным и для голограмм.

Ощущение реальности сцены, которая записана на фотопластинку (голограмму), еще более усиливается, если при изготовлении голограммы использовать линзу. В этом случае вместо движений головой из стороны в сторону мы можем приближать к себе голограмму или удалять ее, наблюдая тем самым увеличение или уменьшение предмета.

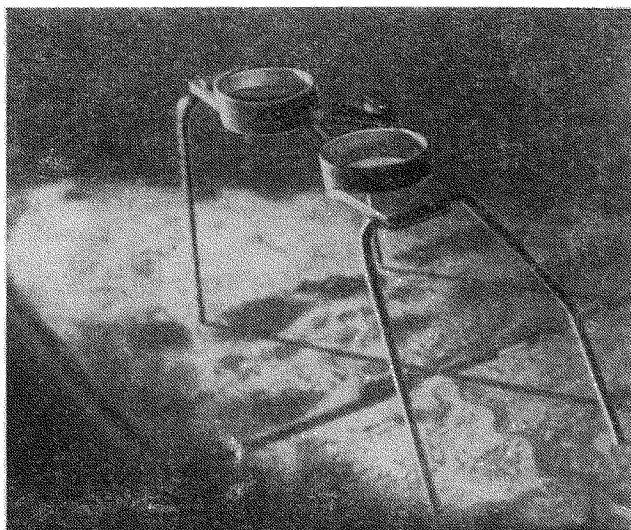
Это явление представлено на рис. 63. Здесь показаны различные снимки одной и той же голограммы. Перед брусками с надписью было поставлено увеличительное стекло. Верхний снимок был получен, когда фотоаппарат находился близко к голограмме. В этом случае сквозь увеличительное стекло мы видим буквы *E*, *S* и часть буквы *R*. Нижний снимок был получен с более далекого расстояния. И предметы, которые мы видим на нем, имеют уже меньшие размеры. С увеличением расстояния этот эффект только усиливается.



Р и с. 63. Фотографии голограммы линзы, демонстрирующие свойство голограммы изменять относительные размеры предметов. Если наблюдатель (либо фотокамера) находится сначала на близком расстоянии от голограммы (верхний снимок), а затем — на более далеком (нижний снимок), то он легко замечает уменьшение размеров предметов, записанных на голограмме.

СТЕРЕОГОЛОГРАММА

Особенно интересная голограмма представлена на рис. 64. Мы видим на ней две стереолинзы, расположенные перед макетом горной местности. Если смотреть на макет



Р и с. 64. Фотография предметов, использованных для изготовления не вполне обычной голограммы. Две маленькие линзы на маленьких подставках позволяют видеть, как сквозь стереочки, пространственную картину гипсовой модели горной местности.

сквозь стереолинзы (стереочки), то будет отчетливо видна трехмерная картина горной местности. В процессе изготовления голограммы голограммная пластинка находилась на очень близком расстоянии от линз. Чтобы рассматривать изображение в восстановленных лучах, голограмму необходимо поместить перед глазами на таком расстоянии, как будто линзы все еще находятся перед голограммой. Когда наблюдатель смотрит на такую голограмму сквозь вообразимые очки, у него создается впечатление, что он видит в увеличенном виде трехмерную картину горной местности, причем точно такую же, какую он видел, когда рассматривал сквозь стереолинзы макет горной местности.

ГОЛОГРАФИЯ ФОКУСИРОВАННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В 1966 году американский ученый Л. Розен использовал линзы для того, чтобы получать голограммы фокусированных изображений. Способ изготовления плоских голограмм показан на рис. 65. Собирающая линза дает

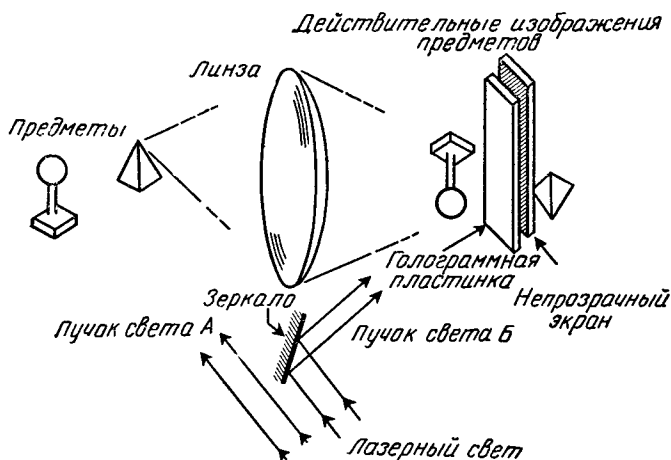


Рис. 65. Запись на голограммную пластину действительных изображений предметов, образованных линзой. Даже если поставить экран, который будет препятствовать образованию действительного изображения пирамиды, голограмма все равно зарегистрирует оба предмета. Рассматривая такую голограмму в лазерном свете, наблюдатель увидит оба предмета, причем изображение пирамиды будет находиться перед голограммой.

действительные изображения (правда, перевернутые) предметов, которые записываются на голограммную пластинку. Фотографическую пластинку можно помещать даже между изображениями, то есть изображение одного предмета может быть расположено перед пластинкой, а изображение другого (расположенного ближе к линзе) — позади нее. Если такую проявленную пластинку осветить лазерным светом с надлежащей длиной волны, то можно увидеть изображение одного предмета за голограммой, а изображение другого — перед ней.

Когда этот процесс получения голограмм был впервые описан в печати, высказывались предположения, что лин-

за в такой системе должна автоматически давать на фотографической пластинке плоское изображение. В написанной на эту тему совместной статье Струка, Розена и автора этой книги отмечалось, что обычно считается, что независимо от того, как получено изображение предмета, при использовании для записи изображения предмета на простую двумерную фотографическую пластинку общепринятой фокусирующей системы мы всегда безвозвратно теряем третье измерение. Далее в статье говорилось, что когда мы производим фотосъемку каких-либо предметов, то линза фотоаппарата образует действительные изображения предметов, расположенные в трехмерном пространстве, и лишь благодаря тому, что фотопленка практически двумерна, эти изображения отображаются на одну плоскость.

Если бы в процессе получения голограммы (рис. 65) мы убрали пучок *B*, то в итоге получили бы обыкновенную фотографию, то есть изображения предметов находились бы в одной плоскости. Для голограммного процесса, как мы уже говорили, изображения этих предметов оказываются пространственно разделенными.

Очень интересно рассмотреть, что будет, если между изображениями предметов поставить непрозрачный экран, как это показано на рис. 65. Этот экран должен препятствовать образованию изображения пирамиды. Наблюдатель, который мог видеть оба предмета, когда не было фотопластинки и экрана, теперь не увидит ничего. Однако в голографии все выглядит иначе. На голограмму всегда записывается волновая картина, которая существует в плоскости фотопластинки. И эта первоначальная волновая картина благодаря своим свойствам способна дать на фотопластинке изображение пирамиды, причем такое же, как если бы непрозрачного экрана вовсе не было. Следовательно, непрозрачный экран совершенно не влияет на процесс записи изображений на фотопластинку (процесс изготовления голограммы). Рассматривая такую голограмму в восстановленных лучах, мы увидим оба предмета. Итак, на голограмму изображение предмета записывается даже тогда, когда оно скрыто от фотопластинки непрозрачным экраном, и это «несуществующее изображение» мы можем восстановить, освещая голограмму лазерным светом (конечно, в процессе восстановления никакого экрана уже нет).

Если в процессе изготовления голограммы по соседству с перевернутым действительным изображением (естест-

венно, что при этом мы должны использовать фокусирующую систему) мы поставим реальный объект, то такая голограмма будет обладать рядом интересных особенностей. Конечно, чтобы запечатлеть такую сцену, объект необходи-



Р и с. 66. Л. Розен (справа), показывающий Д. Габору (в центре) и автору книги восстановленную голограмму.

мо поместить позади голограммной пластинки. Это ограничение, которое отпадает, когда пластинку окружают действительные изображения предметов, а не сами предметы, в данном случае вполне очевидно. Теперь и для истинных и для воображаемых предметов мы не получим тех же самых эффектов из-за явления параллакса. Рассматривая такую голограмму, можно увидеть захватывающую картину, которая может привести наблюдателя в некоторое замешательство. В то время, когда Розен производил свои первые эксперименты, используя в голограммной записи фокусирующие линзы, в Кембридже его посетил Дэннис Габор. На рис. 66 мы видим Розена, Габора и автора этой книги.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ ЧАСТИ ГОЛОГРАММЫ

Мы уже видели (рис. 56), что такие фокусирующие системы, как параболические поверхности или зонные пластинки, будут фокусировать падающие на них лучи даже в том случае, если лучи освещают только часть отражающей поверхности. Поскольку голограмма является одним из видов зонной пластинки, ее часть должна обладать свой-

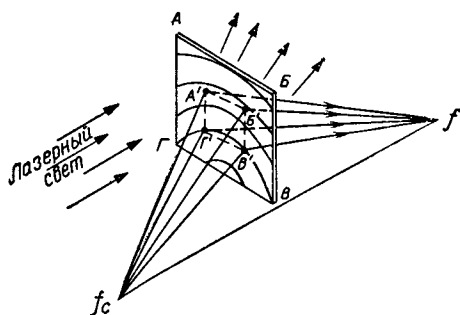


Рис. 67. Восстановление изображения с помощью маленькой части голограммы. Часть $A'B'V'Г'$ офсетной зонной пластинки $ABVГ$, будучи освещенной лазерным светом, дает сходящийся пучок (с фокусом в точке f) и расходящийся пучок волн, исходящих как бы из точки f_c . Аналогично и часть голограммы способна породить с некоторым ограничением действительное и мнимое изображения.

ством всей голограммы, то есть при просвечивании опорным пучком она должна восстанавливать ту же картину, что и вся голограмма. На рис. 67 показано, что как целая голограмма $ABVГ$, так и ее маленькая часть $A'B'V'Г'$ создают действительное и мнимое изображения.

Рассмотрим, к чему приводит уменьшение размеров зонной пластинки (рис. 67). Поскольку на поверхность $A'B'V'Г'$ падает меньше света, чем на всю голограмму, то, сфокусировавшись, такие лучи принесут с собой меньше световой энергии. Поэтому действительное изображение предмета будет менее ярким. Аналогично и при уменьшении размеров голограммы мы будем получать все менее яркие изображения. Однако цельность первоначальной картины все еще сохраняется и ее можно увидеть, если поместить лист белого картона в фокальную плоскость.

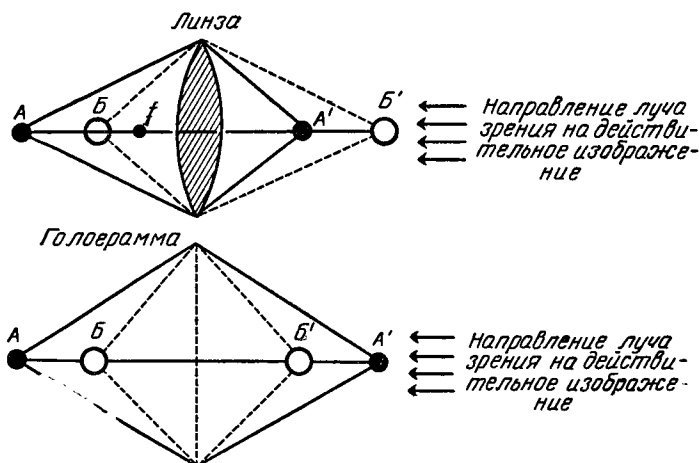
По мере уменьшения размеров голограммы мнимое изображение становится также менее светлым, к тому же четкость изображения и ощущение объемности ослабевают. Таким образом, сквозь маленькое «окно» АБВГ наблюдатель должен более внимательно рассматривать мнимое изображение точечного источника света. Наблюдатель довольно легко замечает значительное ухудшение объемности изображения, поскольку уменьшился параллакс. Хотя перед таким маленьким окном наблюдатель все еще может двигать головой и видеть все предметы, тем не менее поверхность «окна», сквозь которое он наблюдает, не движется вместе с ним и он видит лишь отдельные маленькие, почти плоские изображения. Аналогичная ситуация возникает и в том случае, когда мы смотрим на предметы сквозь обычное комнатное окно, так как возможность рассматривать расположенные перед нами предметы с разных сторон значительно ухудшается с уменьшением размеров окна.

Интересную картину можно наблюдать в том случае, если в нашем распоряжении имеется полная голограмма, но «тонким лучом» освещается лишь малая часть ее поверхности. Если такой луч будет двигаться вдоль голограммы вверх, то наблюдатель, который рассматривает мнимое изображение, следуя взглядом за этим лучом, будет видеть все записанные на голограмме изображения предметов с разных углов зрения. Поместив в фокальную плоскость белый картон, мы увидели бы при таком освещении (движущимся лучом) ряд сменяющих друг друга двумерных предметов сцены. Самый факт того что можно менять направление, под которым рассматриваем первоначальную сцену, должен найти интересные применения. Например, пилоту, пытающемуся посадить в тумане свой самолет, можно было бы предоставить картину взлетно-посадочной полосы, предварительно записанную на голограмму с различных углов при взлете, посадке, боковом заходе на аэродром, которую он видел бы в ясную погоду.

ПСЕВДОСКОПИЯ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ, ОБРАЗОВАННОГО ГОЛОГРАММОЙ

Голограммные зонные пластинки, как мы уже отмеча-ли, могут работать в качестве собирательных линз, так что действительное изображение, которое они формируют,

можно записать на фотопленку точно так же, как мы записывали на фотопленку изображения, образованные линзой фотоаппарата. Наряду с мнимым изображением голограмма воспроизводит и действительное изображение сцены. Причем если поместить в фокальную плоскость голограмм-



Р и с. 68. Эффект псевдоскопии. Изображения предметов, сформированные линзой, расположены точно так же, как и исходные предметы. Когда изготавливается голограмма, каждый предмет на фотопленке образует свою собственную зонную пластинку и в процессе восстановления оказывается, что действительное и мнимое изображения расположены на равных расстояниях от голограммы. Поэтому порядок расположения действительных изображений предметов, восстановленных голограммой, в отличие от линзы обратен порядку расположения самих предметов (псевдоскопия).

мы белый картон, то на нем можно наблюдать действительное изображение сцены совершенно аналогично тому, как мы наблюдаем на матовом стекле фотокамеры изображение сцены, сформированное линзой. Если мы записываем на голограмму двумерную сцену (например, освещенный диапозитив), то действительное изображение, которое воспроизводит голограмма, также двумерно, причем оно неотлично от изображения этой же сцены, которое образовала бы линза. Но когда сцена трехмерна, ее трехмерное действительное изображение, восстановленное с помощью голограммы, существенно отличается от действительного изображения сцены, сформированного линзой. Этот эффект

показан на рис. 68. Мы предполагаем, что наблюдатель, рассматривающий изображение предмета, находится справа. Когда предмет перемещается влево от фокуса линзы, например из положения B в положение A , то изображение B' этого предмета также перемещается влево от положения B' к положению A' . Заметим, что изображения A' и B' будут расположены в том же порядке, что и предметы A и B , а именно изображение A' будет дальше от наблюдателя, а изображение B' — ближе к нему.

Для голограммы картина расположения действительных изображений будет обратной. В процессе изготовления голограммы светящийся предмет A образует на фотопластинке свою собственную зонную пластинку. Когда после проявления мы освещаем такую пластинку параллельным пучком света, то она фокусирует лучи в точке A' , находящейся на том же расстоянии от зонной пластинки, что и точка A . Предмет B также образует свою собственную зонную пластинку с фокусом в точке B' , причем точки

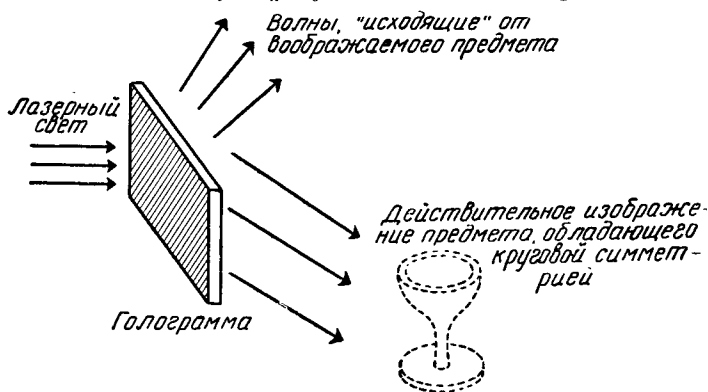


Рис. 69. Псевдоскопия и изображение симметричных предметов. Если предмет обладает круговой симметрией, то действительное изображение предмета, которое видит наблюдатель расположенным перед голограммой, выглядит очень реалистически, поскольку эффект псевдоскопии в этом случае ненаблюдаем.

B и B' расположены симметрично относительно зонной пластинки. Поэтому первоначально близко расположенный предмет будет казаться наблюдателю далеким, и наоборот. Такая перестановка местами действительных изображений называется *псевдоскопией*; обычно еще говорят, что изоб-

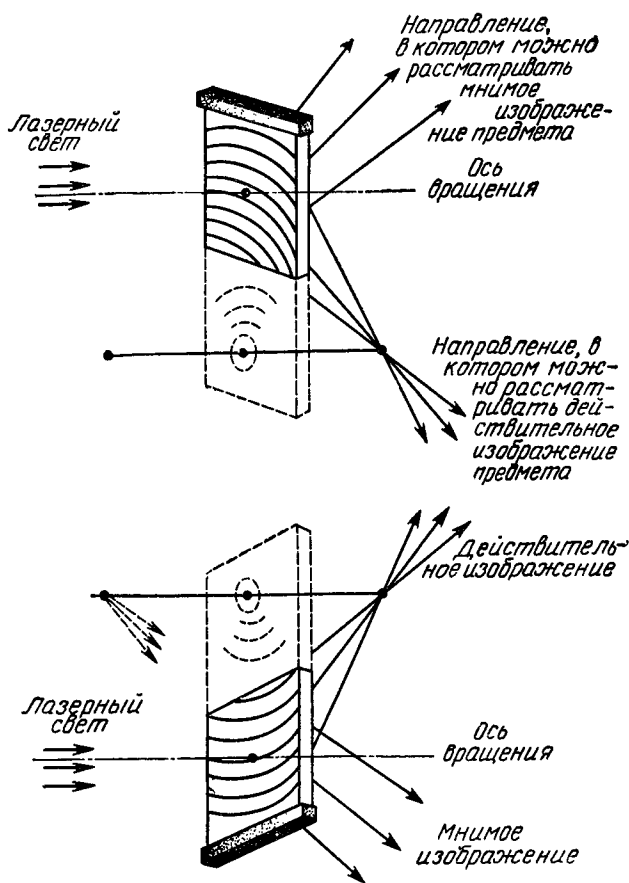
ражение *псевдоскопично*. Поскольку такие изображения непривычны, их мало использовали. В опытах одной группы физиков в качестве голограммного объекта использовали симметричный предмет — бокал для шампанского. В процессе восстановления перед голограммой возникало очень реальное изображение этого предмета (рис. 69). Так как бокал для шампанского обладает круговой симметрией, то псевдоскопия для наблюдателя неощутима и он воображает, что видит нормальное непсевдоскопическое изображение.

Еще раньше некоторые исследователи изыскивали различные способы наблюдения «вывернутых» изображений. Об одном из таких процессов мы уже упоминали, говоря о голографии фокусированных изображений. Для того чтобы записать псевдоскопическое изображение, сформированное голограммой, на вторую голограмму используется уже другая методика. Действительное изображение, образованное второй голограммой, получается дважды обращенным, то есть оно является нормальным изображением. Следует отметить, что в этом случае в качестве голограммного предмета можно использовать любой асимметричный предмет.

ИНВЕРСИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Из рис. 69 видно, что наблюдатель может рассматривать как действительное, так и мнимое изображения. Обычно (рис. 69) эти изображения находятся на значительном (по вертикали) расстоянии друг от друга, так что одновременное наблюдение этих изображений исключается. Чтобы видеть другое изображение (например, действительное), наблюдатель должен либо сам переместиться, либо переместить голограмму.

Однако второе изображение можно увидеть и в том случае, если просто повернуть голограмму так, как это показано на рис. 70. Итак, если наблюдатель рассматривал сначала мнимое изображение точечного источника (рис. 70), то, повернув голограмму на пол оборота, он увидит перед собой действительное изображение. Заметим, что указанным свойством должна обладать любая голограмма, а не только голограмма точечного источника, при условии, что она изготовлена тем же способом, что и голограмма точечного источника. Поскольку наблюдатель обычно находится на некотором расстоянии от фокуса f , к тому же правее фокуса, то действительное изображение, которое он видит,



Р и с. 70. Эффект вращения голограммы. Вращая голограмму вокруг оси, наблюдатель поочередно будет видеть то мнимое, то действительное изображение. Поскольку действительное изображение предмета вначале было перевернутым, то теперь, повернув голограмму на пол оборота, наблюдатель видит его прямым. Таким образом, наблюдатель, вращая голограмму (именно в этом ее отличие от фотонегатива), может видеть только прямое изображение предмета (либо перевернутое изображение), так как он рассматривает при этом поочередно то мнимое, то действительное изображение.

оказывается перевернутым, как и в случае обыкновенной собирающей линзы. Перемещая голограмму, можно легко убедиться в том, что одно изображение предмета, восстановленное голограммой, получается прямым, а другое — перевернутым. Однако при вращении голограммы изображение предметов также поворачивается вместе с ней. Таким образом, если мы поначалу наблюдали прямое изображение предмета, то, повернув голограмму «вверх ногами», мы будем видеть второе изображение предмета, например действительное, которое будет не перевернутым, а прямым. Вращение голограммы вокруг других осей также приводит к некоторым удивительным эффектам.

Публикация автора книги на эту тему, сделанная в 1965 году, вызвала самые различные отклики. Бывший коллега автора писал в своем письме: «Будь осторожней! У других голограммы так себя не ведут». Другой профессор весьма элегантно объяснил рассмотренное явление с помощью преобразований Фурье. А третий написал: «...именно этот эффект и должен был наблюдаться!»

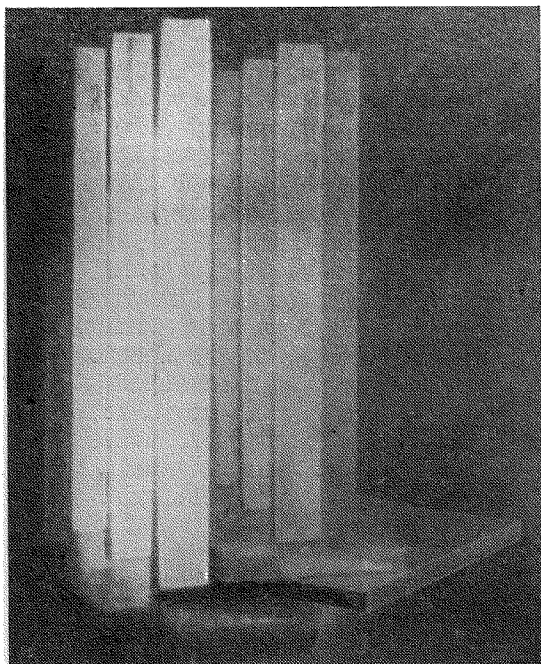
МОНОХРОМАТИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ГОЛОГРАММ

Одним из свойств голограмм (да и зонных пластинок), ограничивающим их применение, является их монохроматическая природа. Делая эскиз зонной пластинки (рис. 51), мы исходили из одной длины волны. Естественно, что изготовленная по такому эскизу зонная пластинка будет фокусировать свет только одной строго определенной длины волны. Так как голограмма является зонной пластинкой, она будет восстанавливать изображение сцены лишь в монохроматическом свете. Если освещать голограмму многокомпонентным светом, то восстановленное при этом изображение будет расплывчатым, поскольку свет разной длины волны будет отклоняться в различных направлениях.

Рис. 61 был получен при освещении голограммы монохроматическим лазерным светом, а рис. 71 — при освещении той же голограммы светом от дуговой ртутной лампы. Ртутная лампа испускала немонахроматический свет, чем и объясняется расплывчатость изображения на рис. 71.

Зависимость дифракции от длины волны создает трудности при изготовлении трехцветной голограммы путем экспозиции фотопластинки тремя лазерами, излучающими свет различного цвета. Освещая такую «составную» голо-

грамму тремя лазерными лучами, мы получили бы девять изображений, причем только три из этих изображений были бы неискаженными. Заметим, что указанным недостатком трехмерные (рефлексные) голограммы не обладают. Способ изготовления таких голограмм аналогичен технологии изготовления трехцветных рефлексных зонных пластинок, описанной нами в предшествующей главе.



Р и с. 71. Голограмма, освещенная дуговой ртутной лампой. Если же самую голограмму, которую мы видим на рис. 61, осветить светом от дуговой ртутной лампы, то она восстановит несколько изображений исходной сцены, что связано с некогерентностью света, испускаемого ртутной лампой.

ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К СВОЙСТВАМ ФОТОПЛЕНКИ

Для записи интерференционной картины световых пучков, длина волны которых чрезвычайно мала, необходимо использовать фотопленку, обладающую очень высокой раз-

решающей способностью. Все фотографические пластинки или пленки представляют собой стеклянные пластинки или гибкие пленки, на которые наносится слой эмульсии. Эмульсия — это просто смесь некоторых веществ, содержащая в качестве светочувствительного ингредиента один из видов соли серебра, причем сама смесь может быть как мелко-, так и крупнозернистой. Заметим, что качество зерен (их размеры и упаковка) светочувствительного элемента как раз и определяет то количество информации, которое можно записать на данную фотопленку. Если заснятую крупнозернистую пленку вставить в увеличитель и сделать сильное увеличение, то на белом листе бумаги, на котором проецируется изображение, будут отчетливо видны различные комочки, а само изображение предмета получится как бы нарисованным отдельными штрихами. Чтобы получить такую картину, используя мелкозернистую пленку увеличение должно быть особенно большим.

В настоящее время в голографии наиболее широко применяется спектроскопическая эмульсия Kodak 649F, имеющая чрезвычайно высокую разрешающую способность. На фотопленке с такой эмульсией можно записать более чем 1000 линий на одном миллиметре, то есть голограммную решетку, изготовленную фотографическим способом и имеющую 1000 линий на один миллиметр. Поскольку интерференционные полосы у большинства голограмм расположены очень близко друг к другу (это особенно характерно для тех частей голограмм, которые находятся на значительном расстоянии от центральной оси), мелкозернистые эмульсии жизненно необходимы в голографии. Из рис. 51 видно, что высшие зоны зонной пластинки видны под большим углом относительно центральной оси и расстояния между ними достигают порядка одной длины волны света. Аналогичная ситуация характерна и для голограмм; если угол между опорным и предметным пучками превышает 60° , то расстояние между полосами может быть по величине близко к длине света. Для лазерных длин волн на одном миллиметре интерференционной картины укладывается приблизительно 1500 линий. Из всего этого видно, что на пленке Kodak 649F такую картину можно записать вполне удовлетворительно. Эмульсия 649F подходит даже и для рефлексных голограмм (голограмм, восстанавливающих изображение в белом свете), у которых, как мы уже видели в предыдущей главе, изучая рефлексные зонные плас-

тинки, в результате экспозиции внутри эмульсии образуются отражающие поверхности, отстоящие друг от друга на расстоянии, равном длине полуволны (то есть уже 3000 линий на одном миллиметре).

Светочувствительность эмульсии 649F на длине волны красного света ($6328 \cdot 10^{-8}$ см), испускаемого гелий-неоновым газовым лазером равна 0,05 единиц ASA. Время экспозиции этой эмульсии гелий-неоновым лазером мощностью в 0,1 ватта приблизительно равно одной минуте.

Во время экспозиции интерференционная картина, которую мы хотим записать, не должна меняться (что могло бы в принципе быть, если бы предметы сцены перемещались относительно друг друга либо относительно опорного пучка). Следовательно, чтобы исключить всякие колебания в процессе изготовления голограммы, голограммные предметы обычно помещают на тяжелые каменные или мраморные плиты. Сдвиг любого предмета на $1/50\,000$ см так изменит соотношение между гребнями и впадинами, что интерференционная картина станет размытой, а следовательно, голограмма испорченной.

Если угол между опорным и предметным пучками сделать малым, то расстояние между интерференционными полосами увеличится, что позволит в свою очередь использовать для изготовления голограмм менее качественные пленки. На пленке AGFA Ageran FF можно записать 500 линий на одном миллиметре. Светочувствительность такой пленки составляет 25 единиц ASA [22 единицы по ГОСТу. — *Ред.*].

ОБЪЕМ ИНФОРМАЦИИ, ЗАКЛЮЧЕННОЙ В ГОЛОГРАММЕ

Удивительным свойством голограммы является ее способность как записывать, так и восстанавливать огромное количество информации. Однако это же свойство, как это ни странно, ограничивает использование голограммного принципа во многих довольно интересных областях, например голографическом кино и голографическом телевидении. Если бы могли получать кино- и телеизображения столь же реалистическими, как голограммные, то это, несомненно, принесло бы большую пользу и кино и телевидению. Обычно на пленке мы должны регистрировать очень мелкие детали голограммы, например, как мы уже только что видели, примерно 1500 линий на миллиметр, а это

можно сделать только на особых фотопленках. В настоящее время телеэкраны имеют намного меньшее разрешение *, что, конечно, препятствует использованию голограмм в телевидении.

Было предложено несколько способов уменьшения количества информации, содержащейся в голограмме, причем без потери основных наиболее интересных свойств последней. Однако технические возможности пока не позволяют решить эту трудную задачу. Телеэкраны в США имеют приблизительно 500 линий по вертикали и 500 точек по горизонтали (то есть в каждой линии). Таким образом, телевизионное изображение формирует 250 000 точек. Голограмма размером 200×200 мм, имеющая 1500 линий на миллиметр, содержала бы 300 000 линий по вертикали и 300 000 точек по горизонтали, то есть она содержала бы 90 миллиардов информационных точек. Следовательно, количество информации, заключенное в голограмме размером 200×200 мм, в 360 000 раз превышает количество информации (здесь число точек), содержащейся на телеэкране. Если бы удалось уменьшить во столько раз количество информации, заключенное в голограмме, то это было бы поистине замечательным достижением.

Были выдвинуты предложения, позволяющие хотя бы незначительно уменьшить количество информации в голограмме. Одно из таких предложений было выдвинуто автором этой книги (февраль 1966 года). Суть его сводилась к следующему. В голограмме необходимо оставить лишь много крошечных участков (примерно 300—500 линий по вертикали и столько же по горизонтали в каждом участке), а остальные большие области удалить. Каждый оставшийся участок, хотя и мал, но должен содержать еще некоторое количество световых полос, а вся совокупность таких областей должна обладать свойствами зонной пластинки первоначальной голограммы. В 1968 году Д. Дж. Дебитетто и Л. Г. Лин исследовали эту идею, правда, в несколько другом варианте. Дебитетто оставлял одну полную, но чрезвычайно узкую горизонтальную полосу голограммы (одну сотую часть), а затем изготавливал новую голограмму, «укладывая» эту полосу 100 раз по вертикали. Новая голограмма обладала хорошим горизонтальным параллаксом,

* Например, лабораторные макеты телеэкранов «Эйдорфор» имеют разрешение не выше 100 линий на миллиметр. — *Прим. перев.*

и наблюдатель мог видеть (глаза людей раздвинуты в горизонтальной плоскости), рассматривая такую голограмму в лазерном свете, совершенно реалистическое изображение исходного предмета. Естественно, что построенная таким образом голограмма не обладала вертикальным параллаксом, который первоначально можно было наблюдать, передвигая голову в вертикальном направлении.

ГОЛОГРАММЫ И КОГЕРЕНТНЫЙ РАДАР

Голографию нельзя рассматривать только как альтернативу фотографии. Голография — это качественно новый процесс. Именно это обстоятельство особенно важно понимать, создавая новые приборы и установки. Ведь технология изготовления радаров и зонаров базировалась в основном на старых классических принципах оптики и фотографии — в этих установках широко использовались линзы и отражатели. Поэтому они унаследовали свойства, а также и недостатки фотографии.

В новом типе радара, в когерентном радаре, нарушены старые принципы работы, в нем нет ни линз, ни отражателей. Поскольку когерентный радар является одной из форм голографии, ему не свойственны недостатки и ограничения, создаваемые линзами и рефлекторами. Глубокое понимание основных различий между голографией и фотографией и аналогично между когерентным радаром и обычным радаром способствовало бы новым и важным усовершенствованиям радаров и зонаров.

В когерентном радаре генератор высококогерентных микроволн создает как сигнал, который посылается на предмет, так и опорную волну. Полученные отраженные сигналы от самолета, вернее от каждой точки вдоль пути его полета, интерферируют с опорным сигналом. Эта интерференционная картина затем преобразуется в картину световых волн, которая записывается на фотопленку. Чтобы «восстановить» записанное изображение, такую пленку (голограмму) следует осветить лазерным светом. Заметим, что когерентный радар позволяет различать очень тонкие детали объекта.

Волны когерентного радара, отразившись от какой-либо точки, имеют сферический фронт волн, тогда как опорный сигнал представляет собой набор плоских волн. Каждая отражающая точка объекта порождает свою собственную

волновую картину, которая, будучи записанной на фото-пленке, представляет собой зонную пластинку (одномерную зонную пластинку), аналогичную двумерной голографической зонной пластинке, создаваемой точечным источником света. Если радарную запись осветить лазерным светом, то можно восстановить изображение исходных отражающих точек.

Сравнение голографии и когерентных радаров выявляет одну важную особенность, которая является общей как для когерентных радаров, так и для голографии и которая совершенно не свойственна обычным оптическим системам. Это особенность заключается в том, что голографические системы и когерентные радары дают неограниченную глубину фокусировки. В обычных оптических системах, использующих линзы или отражатели, остророфокусированное изображение предмета можно получить лишь в одной плоскости, во всех других плоскостях изображение оказывается в той или иной степени расплывчатым. Подобным оптическим законам подчиняются и обычные радары.

Как в голографии, так и в когерентных радаров нет проблемы фокусировки, связанной с линзами. Каждая точка голографируемой сцены (или каждая отражающая точка в радарном поле) образует свою собственную зонную пластинку. Но мы уже знаем, что каждая зонная пластинка фокусирует когерентный свет (то есть восстанавливает изображение) в точке, которая по своему положению точно соответствует в смысле симметрии — исходной точке. Это замечательное свойство голографии и когерентного радара наводит на мысль, что принципы работы когерентного радара можно было бы небезуспешно использовать в радаров и зонах с широкой апертурой.

АКУСТИЧЕСКИЕ ГОЛОГРАММЫ

Очень близки к микроволновым голограммам когерентных радаров акустические голограммы, образованные путем записи интерференционной картины звуковых волн. Эта картина, так же как и картина микроволн, преобразуется в интерференционную картину световых волн, которую после соответствующего уменьшения можно рассматривать в лазерном свете.

Р. Мюллер впервые использовал в качестве ультразвуковой голограммной поверхности поверхность, разделяющую жидкость и воздух, причем предмет, который «осве-

щался» чрезвычайно короткими когерентными ультразвуковыми волнами, находился в жидкости. Опорный когерентный пучок также направляется на границу, разделяющую жидкость и воздух. Ультразвуковые волны порождали на поверхности жидкости участки повышенного и пониженного давлений, образуя тем самым стационарную интерференционную картину в форме чрезвычайно мелкой ряби на поверхности жидкости. При освещении лазерным светом такая волнистая поверхность давала изображение погруженного в жидкость предмета. Часто для преобразования акустической интерференционной картины в интерференционную картину световых волн используется неоновая лампочка (о ней мы уже упоминали, говоря о рис. 21). Подобно тому как рис. 20 мы могли считать микроволновой голограммой, так и рис. 22 (а также и другие многочисленные картины звуковых волн в форме полос, помещенные в этой книге) мы можем считать акустической голограммой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вероятно, самым удивительным в голографии является то, каким образом Габору удалось так красиво и элегантно распутать столь сложную головоломку. Конечно, не последнюю роль здесь сыграли изобретательность и прозорливость ученого.

Но прежде чем вообще что-либо делать в данном направлении, нужно было догадаться (и это был первый шаг Габора), что все свойства волновой картины, образованной на плоскости монохроматическими световыми волнами, исходящими от предмета, полностью определяются только размерами и относительными положениями гребней и впадин волн (то есть амплитудами и относительными фазами). (Как мы уже видели ранее, некоторые ученые сомневались даже в этой исходной гипотезе Габора.) Однако это был лишь первый шаг. Чтобы как-то использовать выдвинутую идею, необходимо было найти не только способ записи амплитудной и фазовой картин, но и способ, позволяющий с помощью такой записи восстанавливать изображение предмета.

Рассмотрим сначала методику записи. Обычно для записи каких-либо процессов, меняющихся во времени, используют самописец. Перо этого прибора перемещается взад-вперед по движущейся бумажной ленте, записывая

тем самым на листе электрические сигналы, которые как раз и вынуждают перо двигаться. Такой прибор мог бы записать изменения сигналов на выходе микроволнового усилителя при сканировании микроволнового поля (рис. 21), его можно было бы поставить вместо фотокамеры и неоновой лампочки. Если бы мы это сделали, то получили бы на листе бумаги полную запись (по амплитуде и фазе) интерференционной картины микроволн. Хотя по существу мы записали бы всю информацию о сцене, тем не менее восстановить по такой записи исходную сцену было бы чрезвычайно трудно.

Габор предложил записывать интерференционную картину на фотопленке. Его голограмма также содержала как амплитудную, так и фазовую информацию о волновой картине. Но чтобы восстановить с помощью такой голограммы исходную сцену, нужно было придумать способ, который позволил бы это сделать и который, как мы уже знаем, оказался не столь очевидным. Еще совсем недавно очень остро стояла проблема восстановления информации, содержащейся, например, в тысячах томов книг, находящихся в библиотеках. И если кто-либо сказал бы эксперту по информации, что, имея 36 миллиардов точек информации, записанных на фотопластинке, можно воссоздать первоначальную волновую картину световых волн, просто освещая данную фотопластинку когерентным светом, то эксперт отнесся бы к этой идее более чем скептически.

Габор написал два уравнения голограммы, которые Струок впоследствии назвал «основными уравнениями Габора». Из первого уравнения вытекало, что амплитуду и фазу рассеянной волны можно зарегистрировать фотографически, если к рассеянной волне, падающей на фотопластинку, добавить когерентный опорный пучок. Мы уже видели (рис. 11), что фаза действительно регистрируется фотопластинкой, поскольку на пластинке возникают более светлые области (+ +) и менее светлые области (+ -).

В этом месте нам хотелось бы отметить, что процесс фотозаписи, предложенный Габором, имеет один недостаток, а именно между голограммной записью и исходной сценой нет взаимно однозначного соответствия. Например, на рис. 11 показана фотозапись интерференционной картины сферических волн от точечного источника и плоских опорных волн. Однако аналогичную информацию о фазах можно было бы зарегистрировать на фотопленке от нес-

колько иных волповых картин. Наиболее просто это можно понять, если представить себе, что блокирующие зоны зонной пластинки на рис. 51 не поглощают свет, а отражают его. Тогда плоские волны, движущиеся слева направо, наряду с тремя наборами волн (сходящимся, расходящимся и неотклоненным пучками), расположенными справа от пластинки, создали бы за счет отражения аналогичную группу волн слева от нее. И если бы для записи, естественно, вместе с опорным пучком плоских волн, мы использовали набор волн, подобный любому из четырех восстановленных сходящихся и расходящихся наборов волн, то в результате получили бы плоскую голограммную зонную пластинку, аналогичную исходной. Угадать, с помощью какого набора волн была создана данная пластинка, — то же самое, что, прочитав одно-единственное слово, имеющее несколько смысловых значений, пытаться ответить на вопрос, какое из смысловых значений подразумевалось при написании этого слова. Такая неоднозначность могла бы обескуражить многих исследователей, но она не испугала Габора. Когда Габор записал свое второе уравнение, выражающее в математической форме взаимодействие набора плоских волн (этот набор в действительности аналогичен опорному пучку) с голограммой, то из него он установил, что голограмма наряду с нужным нам набором волн восстанавливает также и другие наборы волн. Тем не менее сам факт того, что голограмма все-таки восстанавливала желательный для нас набор, имел огромное значение.

Впоследствии Габор экспериментально доказал справедливость своих теоретических заключений. Однако для того, чтобы достигнуть максимальной яркости изображения, имея в своем распоряжении слабый источник света, Габору приходилось рассматривать изображение, глядя прямо в направлении источника. Это приводило к тому, что действительное и мнимое изображения предмета, восстановленные голограммой, накладывались по лучу зрения друг на друга, создавая тем самым взаимные помехи. Шестнадцать лет спустя Лейт добился углового разделения различных компонентов восстановленных волн, воспользовавшись для этого новым более мощным источником когерентного света (лазером) и применив двулучевой принцип когерентного радара. Таким образом, «игра» была сделана и цель достигнута. На этом мы и закончим нашу книгу.

ПОСЛЕСЛОВИЕ

Голографию принято считать совсем молодой наукой. Принцип получения голограммы предложил в 1947 году Деннис Габор, но его работа, опубликованная в 1948 году, долгое время оставалась почти незамеченной*. Реализовать идею Габора можно было, лишь располагая когерентным источником света. И только после появления такого источника — лазера — Лейт и Упатниекс предложили «двулучевую» схему, которую они и осуществили в 1963 году, а за год до этого советский ученый Ю. Н. Денисюк сделал первую (и притом объемную) голограмму.

Открытие голографии и получение первых голограмм было встречено с восторгом. И действительно, большая хорошо сделанная голограмма выглядит как чудо. При виде ее трудно удержаться от возгласа восхищения. В открытии голографии есть одна замечательная черта. Дело в том, что физические принципы, используемые в этой новой науке, были известны давно, но как-то вошло в привычку считать, что дифракционные (волновые) явления света определяют предел разрешающей способности оптического прибора. И физики долго не задавали себе простого вопроса, который сейчас кажется вполне естественным: «Куда девается информация о предмете (источнике света), дающем дифракционную картину, и как восстановить изображение?» Развитие интерференционных методов приучило к тому, что эта информация никуда не исчезает и, если правильно распорядиться установкой, то количество информа-

* Две основные работы Д. Габора опубликованы в русском переводе в форме приложения к книге Дж. Строука «Введение в когерентную оптику и голографию» (изд-во «Мир», 1967). Эта книга рассчитана на более подготовленного читателя.

ции об источнике по сравнению с обычными оптическими приборами может даже увеличиться.

Еще и сейчас нам кажется, что если между предметом и фотоаппаратом поместить матовую пластинку, то изображение исчезнет — ведь через матовую пластинку ничего нельзя увидеть. В то же время пластинка не нагревается, в ней не происходит никаких диссипативных (необратимых) процессов, так что никаких исчезновений не должно быть. Оказалось, что порок кроется не в матовом экране, а в способе регистрации изображения на фотопластинке. Фотопластинка регистрирует только интенсивность света, и обычный фотоаппарат совсем теряет все сведения о фазе приходящего света. То, что придумали Габор и его последователи, сводилось к одному — как заставить фотопластинку регистрировать фазу волны. Кстати, жесткие требования к качеству фотопластинки были следующей по важности причиной, задержавшей развитие голографии.

Но как бы то ни было, все трудности оказались преодоленными, и сейчас голография развивается нарастающими темпами. Расширяется область ее применения, постепенно смягчаются требования к источнику света. Несомненно, что в дальнейшем голография так же широко войдет в наш быт, как сегодня вошли магнитофоны и транзисторы. Поэтому представление о том, что такое голография и, в особенности, какие физические принципы лежат в ее основе, должен иметь каждый, кого интересует современная наука и техника.

Популярных книг по голографии немного*. Книгу, к которой пишется это послесловие, отличает использование примеров из акустики, что открывает перед читателем интересные и для многих, наверное, неожиданные аналогии. Этим настоящая книга дополняет уже изданные в нашей стране.

Нельзя не отметить, что автор не всегда достаточно аккуратно излагает физические основы теории. Нередко он забывает о важных деталях, а иногда допускает неточности. Кроме того; автор, очевидно, не знаком с советскими работами, даже теми из них, которые публиковались за ру-

* Пока на русском языке их три: А. Л. Микаэлян, Голография, изд-во «Знание», 1968; Я. А. Смородицкий, Л. М. Сорoko, Успехи голография, изд-во «Знание», 1970; Ю. И. Островский, Голография, изд-во «Наука», 1970.

бежом. Этим вызвана необходимость примечаний. Что касается физики, то представляется полезным более подробно рассмотреть три важных для голографии вопроса, которые становятся особенно актуальными в связи с развитием оптики вообще: это когерентность, вопрос о ширине спектральных линий и спонтанное и вынужденное излучение. Этим трем темам мы и посвятим наше послесловие.

Когерентность. В разное время под когерентностью понимали различные свойства света (или другого волнового источника). Это было связано с тем, что когерентностью практически не интересовались; она понадобилась лишь тогда, когда в физических и технических измерениях стали интенсивно использоваться явления дифракции и интерференции. По мере совершенствования техники таких измерений приходилось уточнять условия, накладываемые на источники и приемники колебаний, а вместе с тем и само понятие когерентности.

В книге Кока (глава II) когерентным колебанием называется колебание, которое правильнее назвать монохроматическим (так оно и названо в нашем переводе). Монохроматический свет (мы будем дальше говорить о свете), состоящий из одной компоненты (по частоте), будет в то же время и когерентным. Если пучок монохроматического света разделить (призмой или зеркалом) на две части, то новые два пучка будут интерферировать друг с другом и создадут на экране неподвижную интерференционную картину. Если вместо монохроматического света взять спектр в виде полосы частот, то получить интерференционную картину будет не так просто; но это вовсе не означает, что такое излучение некогерентно.

Отождествление когерентности и монохроматичности оправдано лишь в простейших, с современной точки зрения, приложениях. Монохроматичность источника света ограничивается прежде всего тем тривиальным обстоятельством, что строго монохроматический свет представляется бесконечной во времени плоской волной. В действительности свет излучается источником и поглощается регистрирующим прибором за некоторое конечное время. Если излучение световое, то это время определяется временем жизни возбужденного атома, если это радиоволны — то продолжительностью сигнала. В обоих случаях излучение не может быть строго монохроматическим, а должно иметь спектр частот шириной порядка $\Delta\nu \sim 1/\tau$, где τ — время излучения.

Более подробно мы об этом еще скажем, когда будем говорить о ширине линии. Та же формула определяет в радиопередачах ширину полосы частот, необходимую для получения сигналов длительностью порядка τ (или чтобы передать в 1 сек порядка $1/\tau$ сигналов).

Сигналы с такой шириной, распространяющиеся в пространстве, будут расходиться по фазе, так как у них несколько разная длина волны. Связь между длиной волны света и его частотой определяется формулой $c = \nu\lambda$. Так как скорость света одна и та же для всех частот, то это произведение на обоих концах спектра будет одинаковым. Отмечая концы спектра индексами 1 и 2, можем написать $\nu_1\lambda_1 = \nu_2\lambda_2$, или

$$\nu_1\lambda_1 - \nu_2\lambda_2 = \frac{1}{2}[(\nu_1 + \nu_2)(\lambda_1 - \lambda_2) + (\nu_1 - \nu_2)(\lambda_1 + \lambda_2)].$$

Если полоса частот узка, то мы можем заменить $1/2(\lambda_1 + \lambda_2) \approx \lambda$, а $1/2(\nu_1 + \nu_2) \approx \nu$ и обозначить $\nu_1 - \nu_2 = \Delta\nu$ и $\lambda_2 - \lambda_1 = \Delta\lambda$ (если $\nu_1 > \nu_2$, то $\lambda_2 > \lambda_1$), тогда получим $\lambda\Delta\nu = \nu\Delta\lambda$, или (заменяя ν через λ):

$$\Delta\lambda = \Delta\nu \cdot \frac{\lambda^2}{c}.$$

Это известная формула, связывающая ширину линии в шкале частот с шириной линии в шкале длин волн. Если волны отличаются по длине $\Delta\lambda$, то на расстоянии одной длины волны максимумы волн, которые совпадали вначале, разойдутся на $\Delta\lambda$; отсюда легко понять, что на расстоянии $\lambda/2\Delta\lambda$ длин волн (то есть на расстоянии $\lambda^2/2\Delta\lambda$) эти максимумы разойдутся на половину длины волны и максимум, отвечающий одному краю спектра, совпадает с минимумом, отвечающим другому краю спектра. Промежуточные участки спектра вносят вклад в этом месте, также промежуточный по величине, и интерференционная картина окажется смазанной. Таким образом, расстояние

$$l \approx \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \left(= \frac{c}{\Delta\nu} \right),$$

называемое длиной когерентности, грубо определяет размеры области, в которой можно наблюдать интерференционную картину*. При этом длина когерентности определяется шириной линии.

* Подробные сведения о когерентности читатель, знакомый с анализом, найдет, например, в книге М. Франсона и С. Сланского «Когерентность и оптика» (изд-во «Наука», 1967).

Приведенные рассуждения правильны, но к ним следует сделать некоторые дополнения. Тот факт, что интерференционные полосы исчезли, еще не означает безвозвратной потери информации от источника. Можно, например, поставить фильтр, который вырезал бы более узкую полосу из излучаемого спектра, таким фильтром мог бы быть и сам детектор. Тогда длина когерентности естественно возросла бы и интерференционная картина восстановилась. Исчезновение интерференционной картины в большей мере связано с методом регистрации. Эту разницу очень важно понять, разбирая вопрос о голографии. Идея Габора (о которой мы говорили) возникла из размышления о том, куда теряется информация в фазе волны, исходящей от какого-либо предмета. После того как свет зарегистрирован фотопластинкой или глазом, эта информация исчезла, потому что и пластинка и глаз регистрируют лишь квадрат амплитуды. Но до того, как свет зарегистрирован, то есть до того как он поглотился, распределение фаз в волне переносится в пространстве и никуда не теряется, а это значит, что его можно зарегистрировать. Вот этим-то и занимается голография.

Интересное свойство голограммы, которое всегда отмечают, состоит в том, что каждый ее участок содержит информацию обо всем предмете. Голограмму можно разбить на несколько кусков, и каждый из них будет давать изображение. В этом смысле голограмму следует сравнивать не с фотографией, а с зеркалом. Половина фотографии содержит изображение лишь половины всей сцены; половинка зеркала отражает предмет как обычное целое зеркало. Но, чем меньший кусочек голограммы мы возьмем, тем хуже будет качество изображения. Края голограммы ограничат сечение пучка света, которым освещается голограмма, и нарушат тем самым монохроматичность пучка по отношению к направлениям, то есть пучок будет расходиться и не будет эквивалентен тому опорному пучку, в котором была изготовлена голограмма.

Здесь мы сталкиваемся с новым свойством пространственной когерентности. Пространственная когерентность сказывается в том, что лучи с одинаковой частотой имеют разброс по направлениям. Подобно тому как разброс по частоте (ширина линии) связан с длительностью жизни источника, так и разброс по углам связан с линейными размерами источника (или детектора). Приближенная

формула для оценки угла, который характеризует расширение пучка, имеет вид $\theta \approx \lambda/d$, где λ — длина волны, а d — характерные поперечные размеры прибора.

Это свойство также иногда называют пространственной когерентностью. Однако важно другое — дело в том, что разброс по направлениям и разброс по частотам никак не связаны друг с другом и определяются совершенно различными факторами. Здесь мы встречаемся с двумя разными свойствами волнового процесса.

Определения когерентности сложились исторически. Раньше считали, что интерферировать может только свет, излученный одним достаточно удаленным точечным источником, разбитым на два пучка с двумя отверстиями в экране (опыт Юнга). Но уже много лет назад выяснилось, что интерференция — явление гораздо более распространенное. Для интерференции пучков света необходимо лишь одно — чтобы разность фаз между ними не изменялась хаотически. Свет от двух электрических лампочек не дает интерференционной картины, так как из-за высокой температуры тепловые колебания атомов вносят большую случайную добавку в частоту излученного света и разность фаз между двумя пучками будет хаотически изменяться настолько быстро, что ни о какой интерференции не может быть и речи. Строго говоря, только в этом случае можно говорить о полной некогерентности источников. Если предмет, освещенный двумя лампами, отбрасывает две перекрывающиеся тени, то на границе теней интерференции не возникает. Не возникнет и дифракционной картины на границе каждой из теней, так как пространственная когерентность в каждой из ламп практически отсутствует — соседние участки нити излучают свет статистически независимо и свет от них не интерферирует. В этом смысле можно сказать, что свет, излучаемый обычной лампочкой, состоит из отдельных независимых порций — квантов. Свет же, излучаемый лазером, обладает высокой степенью когерентности и может быть описан как классическое электромагнитное поле, задаваемое векторами электрического и магнитного полей. Свет от двух лазеров дает интерференционную картину. В этом случае лучше не рассуждать (как это иногда делают), интерферирует ли квант только сам с собой или он может интерферировать с другими квантами. Случайная разность фаз между светом от двух лазеров скажется лишь в расположении интерференционной

картины. Если выключить один лазер, а потом его опять включить, то интерференционные полосы восстановятся, хотя положение их на экране будет уже не тем, которое было вначале.

Различие между определениями когерентности света можно проиллюстрировать на примере прохождения света через упомянутую выше матовую пластинку.

Если я пути света, идущего через объектив фотоаппарата, поставлю матовую пластинку, то изображение исчезнет. Это может показаться странным, если подумать о том, что никакого нового физического процесса в матовой пластинке не происходит: никаких случайных колебаний, которые бы «испортили» световые волны, к свету не добавляется. Куда же делась информация? Ответ, конечно, ясен. Если для простоты считать, что первичный пучок был параллельным, то без матовой пластинки он собрался бы в фокусе оптической системы. Это значит, что лучи из разных частей пучка пришли бы в точку фокуса с одинаковой фазой и в фокусе образовалось бы световое пятно, тем меньшее по размерам, чем меньше был разброс по направлениям в исходном пучке и чем больше были поперечные размеры оптической системы (чтобы сама оптическая система не увеличила этот разброс). Когда на пути света оказалась матовая пластинка, то из-за нерегулярных преломлений на шероховатой ее поверхности длины путей, которые прошли лучи по разным путям в пластинке, оказались случайными, и лучи пришли в фокус с разными фазами: фокусировка исчезла. Поэтому мы уже не сможем увидеть изображение простым глазом.

Можно сказать, что исчезла пространственная когерентность. Но на самом деле когерентность никуда не исчезла и всю картину можно восстановить.

В голографии этого можно достичь, прибегнув к установке на пути света, образующего действительное изображение, той же самой матовой пластинки. Происходит процесс «декодирования» — изображение появляется вновь в той самой форме, в которой мы его привыкли видеть. Таким образом, пространственно не когерентный свет можно сделать когерентным. В то же время сделать когерентными лучи, исходящие из разных частей накаленной нити, нельзя (по крайней мере без затраты внешней работы).

Можно сказать, что когерентность определяет корреляцию компонент электромагнитного (или звукового) поля

разных источников. Если такая корреляция существует, то можно говорить о когерентности; если поля полностью независимы, то когерентности нет. Только отсутствие когерентности позволяет нам видеть разные предметы одновременно или вести разговор в шумной толпе.

Интересно отметить, что использование корреляций более высокого порядка позволило произвести измерение диаметров звезд с необычайно высоким разрешением (определить угловые размеры до $1/30\,000\,000$). Если два радиотелескопа фотографируют яркость звезды (то есть квадрат амплитуды ее электромагнитного поля), то эта яркость меняется со временем по случайному закону; но если сравнивать две кривые яркости, то обнаружится, что они очень похожи друг на друга. Если фотографии были сделаны с близкого расстояния, то кривые (положение максимумов) почти совпадают. С увеличением расстояния кривые начинают отличаться друг от друга: чем больше база между двумя телескопами, тем больше различие между кривыми.

Нетрудно понять, что если изменение яркости происходит в области размеров D , то угол, анутри которого это будет наблюдаться, одновременно будет определять формула, тождественная той, которую мы выводили для пространственной когерентности: $\theta \approx \lambda/D$. С другой стороны, если два телескопа находятся в разных частях света, то база B — расстояние между ними — может быть около $10\,000$ км. Угол, который можно покрыть таким базисом, будет примерно B/R , где R — расстояние до звезды. При сравнении этих двух формул становится понятным, что можно довольно легко определить диаметр звезды: $D \approx \lambda \cdot R/B$. Таким образом с помощью радиотелескопов определили радиус квазаров, находящихся на расстоянии миллиардов световых лет от нас.

Ширина спектральной линии. Линия в спектре атома никогда не бывает бесконечно узкой. Бесконечно узкую линию не может излучить никакая система, но ее не может зарегистрировать и никакой приемник, так как она не переносит с собой никакой энергии. Физических явлений, которые обуславливают ширину линии, много; в книге говорится лишь о доплеровской ширине.

В основном ширина спектральной линии определяется принципом неопределенности. Если система распадается так, что ее среднее время жизни равно τ (то есть если за-

кон ее распада определяется фактором $e^{-t/\tau}$), то энергия излучения будет иметь разброс порядка $\Delta E \sim h/\tau$, или, так как энергия связана с частотой формулой $E = h\nu$, то $\Delta\nu \approx 1/\tau$.

Это есть простое следствие анализа Фурье (см. ссылку на стр. 131). Такая ширина называется естественной шириной линии. Наиболее узкой линией, известной до сих пор, является линия в спектре водорода, соответствующая длине волны 21 см и происходящая от перехода из состояния, в котором спины электрона и протона параллельны, в состояние, в котором они направлены в противоположные стороны. Из-за очень слабого взаимодействия спинов этот переход имеет очень малую вероятность, и среднее время жизни возбужденного таким образом атома достигает 31 года. По формуле, приведенной выше, это отвечает ширине линии $\Delta\lambda \approx 10^{-16}$ см. На Земле в условиях лаборатории эта ширина линии значительно больше. Переходы из возбужденного состояния в основное происходят не сами по себе, а при низком давлении, при столкновении атомов со стенками сосуда.

В газах основными эффектами, приводящими к уширению линии, является эффект Доплера, о котором рассказано в книге, и столкновения атомов друг с другом, которые приводят к уменьшению времени жизни возбужденного состояния.

В конденсированных состояниях — в твердом теле, линии расширяются из-за взаимодействия, которое также делает энергию электрона в атоме не вполне определенной. Здесь ширина линии настолько увеличивается, что спектр становится практически сплошным. Раскаленный кусок металла излучает практически весь видимый спектр: мы говорим, что он раскален добела.

В колебательных контурах ширину линии обычно характеризуют величиной, называемой добротностью. Добротность определяется как отношение энергии контура к энергии, расходуемой контуром за одно колебание. Этим более точно определяется понятие ширины линии, полагая $Q = \nu/\Delta\nu$. Ясно, что точное определение $\Delta\nu$ из формы спектра зависит от формы линии и от определения самого понятия ширины кривой; об этом мы здесь говорить не будем.

Вынужденное излучение. Основной эффект, на котором основано действие лазера и который позволил получить

когерентный свет большой интенсивности, теоретически был открыт Эйнштейном еще в 1908 году.

История его открытия началась еще в конце прошлого века, когда Планк получил формулу, описывающую распределение энергии в спектре электромагнитного поля, которое находится в равновесии со стенками полости, когда температура этих стенок поддерживается постоянной. Постановка задачи о равновесном излучении основывалась на известных фактах: что электромагнитное поле обладает энергией и подчиняется законам термодинамики. Следовательно, используя методы термодинамики, можно вычислить, как должна распределяться энергия по частотам, чтобы ее поток, передаваемый электромагнитным полем стенкам полости, был бы в точности компенсирован обратимым потоком энергии от стенок к электромагнитному полю. Однако эта задача оказалась намного труднее, чем казалось вначале*. Решение пришло только тогда, когда Планк и Эйнштейн поняли, что изучение и поглощение света происходит не непрерывно, а порциями — квантами. Эта гипотеза привела к знаменитой формуле Планка, описывающей спектр, который находится в равновесии с резервуаром при некоторой температуре T . Таким образом, стало возможным приписывать температуру полю излучения. Более того, Эйнштейн показал, что поле излучения можно рассматривать как газ, состоящий из фотонов — квантов. Равновесие между таким газом и стенками могло наступить лишь тогда, когда вероятность поглощения кванта с какой-либо частотой находилась бы в определенном соотношении с вероятностью его излучения стенкой. (Кванты взаимодействуют друг с другом очень слабо, поэтому в отличие от газа, в котором тепловое равновесие устанавливается благодаря столкновению молекул между собой, в поле излучения основную роль играет взаимодействие со стенками.) Надо было найти такое выражение для вероятностей, чтобы они привели к формуле Планка.

Вероятность поглощения кванта должна быть пропорциональна числу квантов (или более высокой степени этого числа), имеющих в поле, так как она должна обращаться в нуль, если квантов в поле нет. При отсутствии квантов вероятность излучения не обращается в нуль.

* См. статью автора «Физика на рубеже века» в журнале «Природа», № 4, 1970.

Атом может излучить квант даже в пустоте. Но если бы вероятность излучения вообще не зависела от числа квантов, уже имеющих в поле, то равновесия не наступило бы.

Подробный анализ, проведенный Эйнштейном (1916 год) и Эйнштейном совместно с Эренфестом (1923 год), привел к выводу, что для существования равновесия между стенками и полем излучения вероятность поглощения должна быть пропорциональной числу квантов, а вероятность излучения должна состоять из суммы двух членов — не зависящего от числа квантов (спонтанное излучение) и пропорционального числу квантов (вынужденное излучение), связанного с вероятностью поглощения.

Формулы Эйнштейна выглядят так:

вероятность поглощения $b\rho$,

вероятность излучения $a + b\rho$.

Здесь ρ — плотность излучения частоты ν . Если положить $\frac{a}{b} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3}$, то можно прийти к формуле Планка. Более строгий вывод формул стал возможен лишь тогда,

когда в 1925 году Базе получил формулу Планка, применяя законы статистической физики к газу фотонов.

Удивительно, что прошло много лет, пока вынужденное излучение не было доказано экспериментально. Лишь в 1940 году это сделал советский физик В. А. Фабрикант.

Так длинная цепочка теоретических и экспериментальных открытий (мы отметили в ней лишь несколько наиболее важных звеньев) привела к созданию Н. Г. Басовым, А. М. Прохоровым и Ч. Таунсом лазера, который в свою очередь позволил реализовать идею Габора и получить объемную (Денисюк) и плоскую (Лейт и Упатниекс) голограммы.

Я. А. Смородинский

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Глава I. Голограмма как волновая картина	8
Глава II. Когерентность (монохроматичность)	26
Глава III. Лазеры	39
Глава IV. Дифракция волн	59
Глава V. Зонные пластинки	82
Глава VI. Свойства голограмм	99
Заключение	125
Послесловие	128

Уинстон Е. Кок

**ЛАЗЕРЫ И
ГОЛОГРАФИЯ**

Редактор *И. Г. Беловцева*
Художественный редактор *Ю. М. Максимов*
Технический редактор *Г. Б. Алюлина*

Сдано в набор 13/XI 1970 г. Подписано к печати 5/IV 1971 г. Бум. № 2
84×108^{1/32}=2,13 бум. л. 7,14 усл. печ. л. Уч.-изд. л. 6,72. Изд. № 12/5883.
Цена 32 коп. Зак. 1557.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»
Москва, 1-й Рижский пер., 2.

Ярославский полиграфкомбинат Главполиграфпрома Комитета по печати
при Совете Министров СССР. Ярославль, ул. Свободы, 97.

Цена 32 коп.

Трудно удержаться
от возгласа восхищения
при виде голограммы.
Но как получается это чудо,
знает далеко не каждый.
Эта книга доходчиво и просто
расскажет вам
об основных понятиях, принципах,
проблемах и даже истории
молодой еще науки — голографии.
Узнав, что такое дифракция,
интерференция,
когерентность,
вынужденное излучение,
зонные пластинки,
и неподготовленный читатель
поймет удивительные свойства
голограмм.