Ю.Н. ДЕНИСЮК

ПРИНЦИПЫ ГОЛОГРАФИИ

ГОИ

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА
И ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
ОПТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ имени С. И. ВАВИЛОВА

Ю. Н. Денисюк

ПРИНЦИПЫ ГОЛОГРАФИИ

(Лекции)

Ленинград

1979

© Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова, 1979

ГЛАВА I

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ЯВЛЕНИЯ, ЛЕЖАЩИЕ В ОСНОВЕ ГОЛОГРАФИИ

Есть у вещей то, что мы за призраки их почитаем:
Тонкой подобно плеве от поверхности тел отделяясь,
В воздухе реют они, летая во всех направлениях.
... заключает поверхность предметов
Множество крохотных тел, что способны от них отрываться
В точном порядке, всегда сохраняя их облик и форму.

Лукреций Кар (94—51). «О природе вещей».

§ 1. Образ объекта и возможности его воспроизведения

Спелеологам и врачам хорошо известно, что пребывание в абсолютной темноте в течение нескольких суток может привести к необратимой потере зрения. И это понятно — ежедневно, каждую секунду своей сознательной жизни человек воспринимает и осмысливает образы внешнего мира, которые ему доносит свет, и поэтому конструкция глаза просто не рассчитана на сколько-нибудь продолжительное пребывание в темноте. Степень приспособления человека к свету далеко не ограничивается упомянутым физиологическим феноменом. Фактически сама конструкция нашего мозга, способ нашего мышления, все представления об окружающей действительности находятся в прямой зависимости от законов, по которым распространяется и взаимодействует с веществом эта неуловимая субстанция.

Для того чтобы почувствовать степень зависимости наших представлений от света, представим себе на минуту мир, в котором свет распространяется не по прямой, а по каким-то кривым траекториям (например, по линиям, изображенным

пунктиром на рис. 1). Обитателю этого мира h все линии, совпадающие с траекторией лучей, например кривая AB, будут казаться идеальными прямыми, поскольку при просмотре «с торца» каждая такая кривая будет проецироваться в точку. Вместе с тем «настоящую» прямую, например AC, наблюдатель h сочтет кривой. С изменением геометрии изменятся и законы механики: тела, на которые не действуют никакие силы, будут двигаться по замысловатым траекториям. Исказятся соответственно и формы предметов. Таким образом, допустив небольшое изменение законов распространения света, мы получим мир, наполненный чрезвычайно неестественными искаженными образами.

Однако, кроме света, в создании образа участвуют глаз и мозг, и поэтому гипотетический мир покажется искаженным, по-видимому, только нам — существам, мозг которых в течение миллионов лет приспосабливался к свету, распространяющемуся по кривой. Исконные обитатели такого мира вряд ли будут испытывать какие-либо неудобства: их мозг автоматически учтет все особенности распространения света и построит образы наблюдаемых предметов, не менее удобные для анализа, чем образы, которыми оперирует наш мозг. Возможности мозга в этом направлении достаточно ярко характеризует эксперимент с очками, переворачивающими изображение (1, 2). Человеку, впервые надевшему эти очки, мир кажется перевернутым, и он полностью теряет ориентацию в пространстве. Однако при постоянном ношении таких очков мозг через несколько дней обучается учитывать особенности жизни в перевернутом мире и восприятие снова нормализуется. Нет сомнения, что поколения живых существ в процессе эволюции могут успешно приспособиться и к несравненно более существенным оптическим искажениям окружающего пространства.

Зависимость нашего мышления от законов светового поля настолько полна и всеобъемлюща, что она стала совершенно неощутимой. В нашей повседневной жизни мы никогда не делаем различий между предметом и его образом и представляем последний в виде некоего слепка предмета, способного отделяться от оригинала. Наиболее образно эту концепцию представил римский поэт-философ Лукреций Кар в поэме «О природе вещей», отрывки из которой были приведены в эпиграфе.

Физические процессы, сопровождающие регистрацию образа, действительно несут сведения о структуре предметов, однако копий предметов в обычном смысле этого слова при этом не образуется. Все эти процессы можно представить

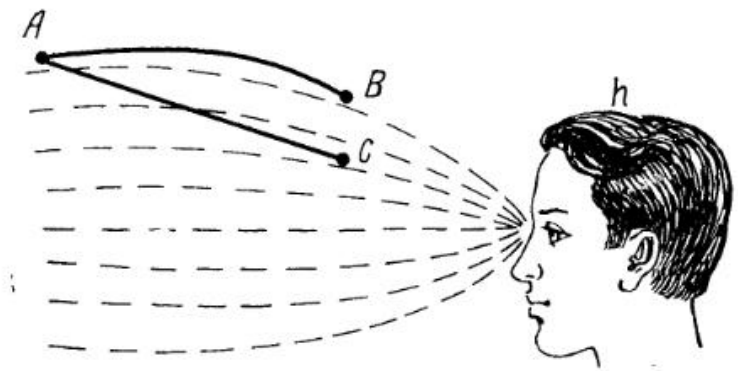

Рис. 1. К зависимости представлений человека об окружающем его мире от законов, по которым распространяется свет. В гипотетическом мире, где свет распространяется по кривым траекториям (на рисунке они изображены пунктиром), все кривые линии, совпадающие с такими траекториями (например, кривая AB), будут казаться наблюдателю h прямыми, поскольку при просмотре с торца эти кривые будут проецироваться в одну точку. Вместе с тем настоящую кривую AC наблюдатель h сочтет кривой. Однако исконные обитатели такого гипотетического мира вряд ли будут испытывать какие-либо неудобства: их мозг в процессе эволюции научится автоматически учитывать особенности законов распространения света того мира, в котором они живут, и построит образцы предметов, не менее удобные для анализа, чем те, которыми оперирует наш мозг

в виде цепочки последовательных событий, в каждом из звеньев которой информация о предмете зашифрована своим сугубо специфическим способом (рис. 2). На предмете образу соответствуют определенные колебания атомов и электронов Q_1, Q_2, Q_3, ..., в пространстве между предметом и глазом — световое поле с определенной структурой — волны W_1, W_2, W_3, ..., на сетчатке глаза — определенная конфигурация возбужденных рецепторов света r_1, r_2, r_3, ..., в коре головного мозга — некоторая система возбужденных нейронов n_1, n_2, n_3, ... И нигде, за исключением сетчатки глаза, ничего внешне похожего на предмет мы не наблюдаем. На сетчатке линза хрусталика действительно формирует свет в знакомые нам образы предмета, однако это, собственно, ни о чем не говорит — ведь мозг приспособился распознавать предметы, именно анализируя световой рисунок на сетчатке, и поэтому независимо от того, каково бы ни было истинное соотношение этого рисунка с предметом, этот рисунок всегда должен казаться нам похожим на оригинал.

Возвращаясь к цепочке событий, в результате которой образ предмета передается нашему восприятию, следует отметить ряд ее весьма важных особенностей. Во-первых, очевидно, что процессы, сопровождающие передачу образа, естественно делятся на два существенно различных класса: объективные — физические, которые существуют вне нашего сознания, и субъективные — физиологические, протекающие в организме человека. К объективным процессам следует отнести явления, происходящие на предмете и в световом поле, которое возникает в пространстве, окружающем предмет. К субъективным процессам можно отнести те, которые протекают на сетчатке глаза и далее в коре головного мозга.

Существенной особенностью упомянутой цепочки является также и то, что каждое ее последующее звено пропускает информации меньше, чем предыдущее: максимум информации о предмете, естественно, содержит сам предмет, световое поле, сетчатка глаза и кора головного мозга представляют собою ступени последовательного уменьшения первоначальной информации о предмете.

И, наконец, рассматривая цепочку, по которой передается информация об образе, нетрудно понять, что сам последовательный характер передачи образа от предмета через световое поле и далее в глаз и мозг допускает возможность создания образа объекта без участия самого объекта — для этого достаточно воссоздать в одном из звеньев упомянутой цепи сигналы, аналогичные тем, которые создает предмет.

Для извлечения информации о предмете, заключенной в соответствующем ему образе, необходимо определенное время. Очевидно, что чем больший объем информации мы хотим получить таким путем, тем большее время необходимо для изучения образа и, соответственно, тем большее время этот образ должен удерживаться в памяти. Однако механизмы зрительной памяти мозга имеют свои естественные пределы, и поэтому неудивительно, что уже на первых этапах трансформации в разумное существо человек стал предпринимать попытки создания системы памяти для долговременного хранения образов.

Вообще говоря, в направлении запоминания образа существует множество возможностей — сигналы истинного объекта можно заменить идентичными сигналами соответствующего имитатора практически в любом из звеньев упомянутой цепи процессов, по которой распространяется информация об образе. При этом, соответственно тому, в каком из звеньев — объективном или субъективном — происходит такая замена, методы создания образа объекта можно также подразделить на объективные и субъективные. Древние люди начали развивать технику запоминания образов сразу по обоим перечисленным направлениям.

Наиболее очевидный и наиболее всеобъемлющий способ воссоздания образа объекта заключается в замене исходного объекта его двойником — по этому пути пошло развитие скульптуры. Этот способ несомненно объективен, так как в данном случае имитируется объективный процесс окружающего мира и иллюзия объекта воспроизводится независимо от устройства зрительного аппарата наблюдателя. Поскольку в этом случае речь идет об имитации первого, самого информативного звена цепи, по которой распространяется образ, то очевидно также, что с принципиальной точки зрения скульптура является методом, способным создать наиболее совершенную иллюзию объекта. Однако для воспроизведения каждого бита информации необходимо затратить определенные усилия, и поэтому скульптура по самой своей сути является одновременно наиболее трудоемким и сложным способом регистрации образов. Каждый шаг развития такой техники должен даваться с большим трудом, и нет ничего удивительного в том, что за десятки тысяч лет развития цивилизации техника создания скульптурных образов фактически не изменилась, мы до сего времени не знаем устройств, способных подобно фотоаппарату регистрировать и воссоздавать скульптурные образы без участия человека.

Изображения на стенах пещер, петроглифы на скалах Карелии и многие другие подобные находки свидетельствуют о том, что десятки тысяч лет тому назад наши далекие предки предложили и другой гораздо менее очевидный способ регистрации образов, который позволяет отображать трехмерное пространство на двумерной поверхности. Живопись, а затем и фотография завершили линию развития этого способа, не меняя его идейную основу по существу.

Несмотря на свою кажущуюся простоту, механизм создания иллюзии с помощью плоской картинки достаточно сложен. На самом деле, если отвлечься от предвзятых представлений и почти врожденной привычки узнавать предметы по их плоским изображениям, возникает естественный вопрос, какие элементы предмета воспроизводит художник на картине и что, собственно, общего имеется у маленькой плоской фотографии и большого объемного предмета, который на ней изображен.

Для того, чтобы ответить на эти вопросы, вспомним сначала общую схему зрительного аппарата человека. Глаз, как известно, состоит из хрусталика, который проецирует в плоскость сетчатки световые изображения предметов. В плоскости сетчатки располагается набор световых рецепторов — палочек и колбочек, которые регистрируют распределение интенсивности света в созданном хрусталиком изображении. Анализ изображения осуществляется в нервных цепях самой сетчатки и далее в зрительных отделах мозга. Хрусталик, вообще говоря, формирует трехмерные оптические изображения объектов, однако сетчатка в силу своей двумерной структуры регистрирует распределение интенсивности света только в плоскости, где находятся палочки и колбочки, поэтому в каждый данный момент мы видим отчетливо и резко предметы, находящиеся только в одной какой-то плоскости пространства. Для того чтобы сфокусировать глаз на другие плоскости пространства, необходимо изменить аккомодацию, т. е. изменить оптическую силу линзы хрусталика. Разрешающая способность глаза также весьма ограничена — в лучшем случае с расстояния около метра мы способны увидеть предметы размером не меньше миллиметра. И, наконец, отметим, что глаз совсем не регистрирует такую важную характеристику светового поля, как фаза его колебаний, ограничиваясь только регистрацией интенсивности.

Таким образом, в силу самого устройства глаз пренебрегает многим из той информации о предметах, которую ему предоставляет свет. Очевидно, что в этих условиях, задача воспроизведения образа, кажущегося человеку (именно толь-

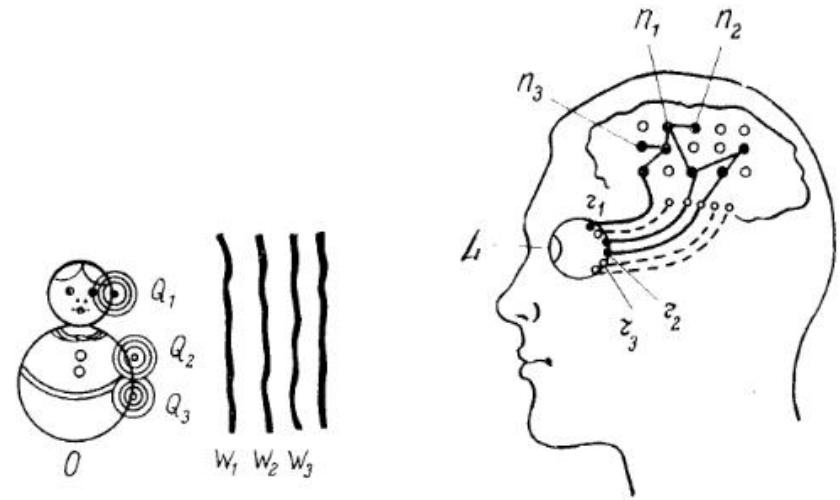

Рис. 2. Цепочка событий, сопровождающих появление образа наблюдаемого объекта — матрешки O. На предмете образу объекта соответствует определенная конфигурация колеблющихся атомов и электронов Q_1, Q_2, Q_3, ..., в пространстве между объектом и наблюдателем — определенная структура светового поля: волны W_1, W_2, W_3... На сетчатке глаза образу соответствует определенная конфигурация рецепторов света r_1, r_2, r_3, ..., в мозгу человека — определенная конфигурация возбужденных нейронов n_1, n_2, n_3... Для воссоздания образа достаточно воспроизвести соответствующие ему процессы в одном из звеньев рассмотренной цепочки. В зависимости от того, где воспроизводятся эти процессы — во внешнем мире или в организме человека — методы воссоздания образа можно разделить на объективные и субъективные

ко человеку!) похожим на оригинал, существенно упрощается. Нетрудно понять, что для создания такой иллюзии нет необходимости воспроизводить всю информацию о предмете, заключенную в окружающем его световом поле, — достаточно воспроизвести только ту, относительно малую часть этой информации, которую регистрирует глаз. Ситуация в данном случае совершенно аналогична той, которая возникает, например, при создании имитаторов Солнца, предназначенных для фотоэлектрических оптических приборов. Если такой прибор реагирует только на видимый свет, то хороший конструктор никогда не потребует, чтобы соответствующий имитатор воспроизводил излучение Солнца также и в инфракрасном диапазоне спектра.

Предложенная нашими далекими предками идея плоской картинки собственно и является решением задачи создания наиболее простого по устройству имитатора, способного воссоздавать образ предмета в глазу человека. Разумеется, это открытие было сугубо экспериментальным. Экспериментальный характер носила и вся дальнейшая работа художников по совершенствованию техники живописи. В результате развития этой техники были фактически найдены законы построения изображений предметов на сетчатке глаза. Следует отметить, что некоторые художники искажали эти изображения так, чтобы учесть также и те поправки, которые вносит мозг, например, непропорционально увеличивали далекие предметы.

Дальнейшим этапом развития техники получения плоских картинок явилась фотография. Механизм создания иллюзии объекта с помощью его фотографии аналогичен механизму создания иллюзии с помощью картины, созданной художником: фотография также воспроизводит на сетчатке глаза то распределение интенсивности, которое создает там объект-оригинал. Естественно, возникает вопрос, каким образом объективные физические процессы, протекающие при получении фотографии, могут привести к созданию такого имитатора, который существенно учитывает особенности человеческого зрения. Ответ на этот вопрос весьма прост: фотографическая камера, с помощью которой получают фотографии, подобна по своему устройству человеческому глазу, роль хрусталика в этом случае играет объектив, роль сетчатки выполняет фотографическая пластинка. Очевидно, что идентичность конструкции предполагает идентичность результатов регистрации, т. е. фотографическая камера регистрирует именно ту часть информации об объекте, которую воспринимает глаз. Именно в силу этой причины, а не в результате «сходства» фотография кажется нам похожей на объект.

Поскольку фотография по существу имитирует процессы, протекающие в организме человека, она, как и живопись, несомненно, относится к разряду субъективных методов. Для того чтобы почувствовать глубину той пропасти, которая разделяет субъективные методы и объективные, представим себе на минуту, что наши произведения искусства попали в руки инопланетных существ, зрительный аппарат которых принципиально отличается по своему устройству от зрительного аппарата человека. Представим, например, что они «видят» при помощи светолокатора, измеряющего форму объектов по глубине. Очевидно, что для таких существ шедевры нашей живописи окажутся совершенно непонятными, и они долго будут размышлять о назначении заключенных в рамки плоских листов холста. Вместе с тем скульптуру — объективный метод — эти существа воспримут сразу и смогут составить по ней правильное суждение о внешнем виде человека (рис. 3).

Обычная фотография все же весьма несовершенный имитатор объекта, ее несовершенство очевидно даже для того зрительного аппарата, для которого она предназначена: достаточно изменить точку наблюдения или аккомодацию глаза, и мы убеждаемся, что перед нами не сам объект, а какая-то его проекция на плоскость. Вместе с тем можно представить себе такую плоскую запись объекта, которая будет имитировать его правильный световой образ вне зависимости от воспринимающего аппарата и будет казаться совершенно неотличимой от оригинала при любом методе восприятия этого светового образа.

На самом деле, если вспомнить, что вся информация об образе, которую переносит свет, заключена в особенностях строения светового поля, то возникает естественная мысль: если бы удалось записать, а затем воспроизвести это поле со всеми его подробностями, то глаз или любое другое устройство не смогли бы отличить такое восстановленное поле от истинного поля света, рассеянного предметом, и зарегистрировали бы появление образа, создающего полную иллюзию действительности оригинала. Более подробно механизм создания такой иллюзии и связанные с этим эффекты поясняются на рис. 4.

На рис. 4, *а* изображен процесс непосредственного наблюдения объекта — матрешки *О*. Регистрируемый объект весьма сложен — матрешка объемная, она частично закрывает второй объект, метлу, в правой руке матрешки находится пред-

мет со специфическим строением поверхности — металлический самовар. Поле света, отраженного матрешкой, метлой и самоваром, изображено в виде извилистых линий — волн W_1, W_2, W_3, при этом предполагается, что извилины отображают особенности строения этого поля. Регистрация светового поля объекта осуществляется наблюдателем h и некоторым гипотетическим объективным прибором — зондом Z, приемное устройство которого сканирует некоторую поверхность P по зигзагообразной линии l, измеряя значения поля на упомянутой поверхности. Показания зонда записываются в блоке памяти M.

Зная законы распространения светового поля, по показаниям зонда можно вычислить определенные параметры предмета. Наблюдатель h также регистрирует световое поле, и его мозг тоже производит какие-то операции. Однако мозг гораздо более совершенный аппарат, чем любое счетное устройство, он не докладывает своему хозяину о всех промежуточных действиях, а представляет результаты в простой и наглядной форме. Наблюдатель просто «видит» предмет, причем так, что полностью убеждается в действительности его присутствия.

Рассмотрим подробнее, чем же определяется «эффект присутствия». Собственно говоря, это несколько эффектов. Один из самых впечатляющих — «эффект оглядывания», когда наблюдатель находится в точке h (рис. 4, a), он видит только матрешку и самовар, метлу он не видит: она закрыта матрешкой. Для того чтобы увидеть метлу, наблюдателю достаточно переместиться из точки h и «заглянуть» за матрешку. Механизм заглядывания достаточно прост: структура световых полей в разных точках несколько различна. Очевидно, что различным световым полям будут соответствовать несколько различные образы (в данном случае с метлой и без нее).

Аналогичный механизм обусловливает и эффекты стереоскопического видения, создающие впечатление объемности воспринимаемой сцены. Когда наблюдатель смотрит на предмет обоими глазами одновременно, то в двух разных точках он регистрирует различные световые поля и соответственно видит несколько различные изображения. Мозг регистрирует эти различия и извлекает из них информацию о расстоянии до предметов.

И, наконец, особую живость наблюдаемой сцене придает так называемая игра бликов. В случае, изображенном на рисунке, она будет выражаться в том, что блики света на бле-

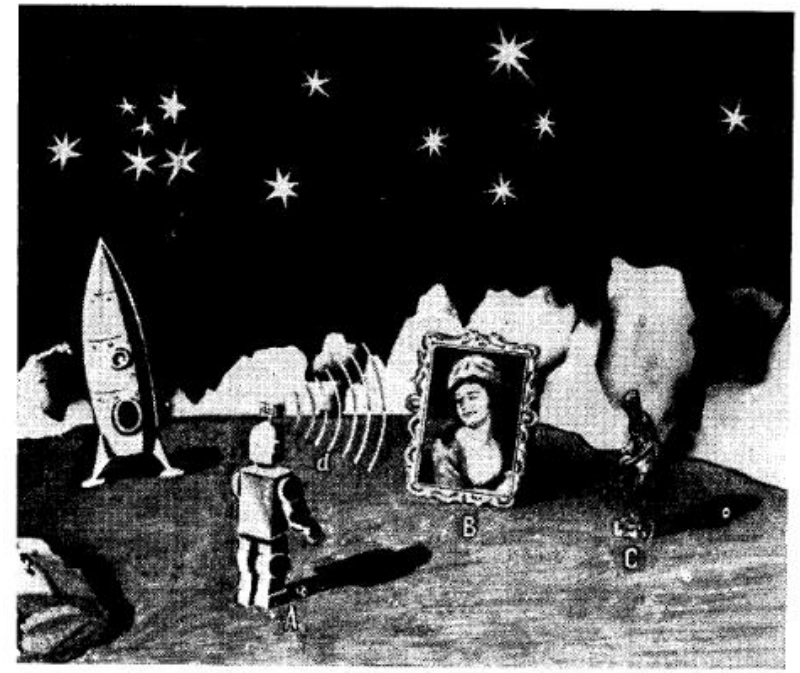

Рис. 3. К различию объективных и субъективных методов воссоздания иллюзии объекта. Инопланетное существо A, снабженное вместо глаз светолокатором d, измеряющим форму объектов по глубине, не может понять назначения земных шедевров живописи — в данном случае картины B, — поскольку живопись — это субъективный метод, рассчитанный на восприятие с помощью человеческого глаза. Вместе с тем скульптуру — объективный метод воспроизведения образа объекта — существо A воспринимает так же хорошо, как и человек. Глядя на скульптуру C, это существо составит правильное, хотя и несколько преувеличенное представление о красоте обитателей Земли

стящей поверхности самовара будут перемещаться при перемещении наблюдателя из точки h в h_1. Этот эффект также обусловлен различием структуры волновых полей в точках h и h_1.

Все это вместе взятое: эффект оглядывания, объемность, игра бликов — и создает так называемый эффект присутствия, т. е. убеждает наблюдателя в том, что перед ним действительно находятся реальные предметы.

Предположим теперь, что в некоторой плоскости F каким-то неизвестным способом записано со всеми подробностями значение волнового поля света, распространяющегося от объекта. Предположим далее, что полученная таким способом запись H восстанавливается таким образом, что, являясь источником светового поля, воспроизводит его значения, начиная от плоскости записи и далее по ходу распространения света (см. рис. 4, *b*). В результате такого процесса во всем трехмерном пространстве слева от фотопластинки H восстановится световое поле объекта O (волны W_1', W_2', W_3'...), сам объект при этом уже естественно отсутствует.

Тождеству истинного поля объекта и поля, восстановленного записью H, будут соответствовать и тождественные ощущения наблюдателя. Так как на глаз наблюдателя h', расположенного перед записью H, действует точно такое же поле, как и на глаз наблюдателя h, расположенного перед истинным объектом, то наблюдатель h' «увидит» изображение матрешки точно таким, каким видел настоящую матрешку наблюдатель h. Попытка отличить это изображение от истинного за счет смещения точки наблюдения к успеху не приведет, так как в новой точке наблюдения также будет восстановлено то световое поле, которое создавал там объект. Поскольку полю объекта в новой точке соответствует, как уже отмечалось, образ матрешки с выглядывающей из-за нее метлой, то наблюдателю h покажется, что он «заглянул» за несуществующую матрешку.

Одновременно с эффектами оглядывания при перемене точки наблюдения воспроизведется и игра бликов на самоваре. За счет одновременного воспроизведения поля перед обоими глазами наблюдателя будут воссозданы стереоскопические эффекты и возникнет впечатление объемности сцены. Суммируя все эти впечатления, наблюдатель, рассматривающий фотографию, зафиксирует появление изображения O', совершенно неотличимого от оригинала.

Распространение светового поля через пространство, несомненно, является объективным физическим процессом, и поэтому метод воспроизведения образа объекта посредством

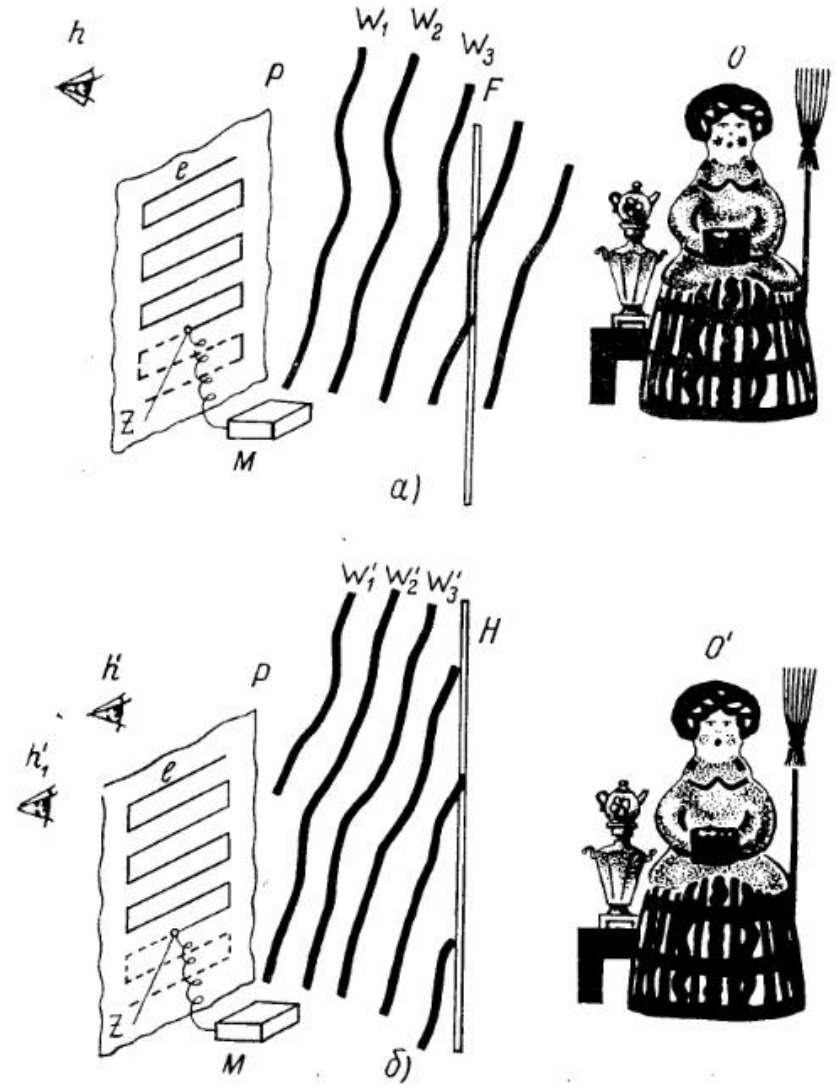

Рис. 4. К механизму создания иллюзии присутствия объекта с помощью голограммы: *а* — поле света, рассеянного объектом O (волны W_1, W_2, W_3), регистрируется наблюдателем h и зондом Z, который, сканируя поле по линии l, измеряет параметры поля в плоскости P. В поле света, рассеянного объектом, внесена фотопластинка, которая регистрирует значения этого поля в плоскости F. *b* — голограмма H, на которой записано значение светового поля объекта в плоскости F, восстанавливает это поле во всем трехмерном пространстве слева от своей плоскости (W_1', W_2', W_3'). Наблюдатель не может отличить восстановленное поле от истинного и видит изображение несуществующего объекта O, совершенно неотличимое от оригинала.

имитации его светового поля несомненно относится к разряду объективных. В частности, например, поскольку запись H точно воссоздает световое поле объекта, то результаты регистрации обоих полей должны быть идентичными как при визуальном наблюдении, так и при измерении посредством любого прибора, например светового зонда Z, изображенного на рис. 4. Сканируя световое поле объекта, восстановленное записью H, этот зонд зарегистрирует точно такие же сигналы, как и в случае регистрации поля, непосредственно отраженного от объекта O. Используя данные таких измерений, можно с очень большой точностью определить мельчайшие детали строения в общем уже не существующего объекта. Для технических приложений последнее гораздо более важно, чем создать иллюзию присутствия объекта в мозгу человека: ведь точность и объективность — это именно то, что необходимо современной технике.

Таким образом, при точном воспроизведении светового поля излучения, отраженного от объекта, воссоздается образ этого объекта, который кажется неотличимым от оригинала как для человека, так и для любого аппарата, получающего информацию от объекта посредством регистрации световых полей.

Рассмотренная нами возможность отнюдь не является абстракцией. Именно по такому принципу создает иллюзию присутствия объекта новинка современной оптики — голограмма. Для того чтобы понять конкретный механизм, с помощью которого голограмма записывает и воспроизводит световые поля, необходимо ознакомиться сначала с некоторыми законами распространения света.

§ 2. Некоторые элементы волновой теории света

Принципиально возможность воспроизведения поля света, рассеянного объектом, следует из работы голландского физика Христиана Гюйгенса «Трактат о свете», изданной в 1690 году. В отличие от Ньютона, предполагавшего, что свет переносят летящие сквозь пустоту частицы, Гюйгенс утверждал, что свет представляет собою возмущение, передаваемое через некую промежуточную среду «эфир». Хотя утверждение Гюйгенса известно под названием «Волновая теория света», сам Гюйгенс понятие «волна» не использовал. Сущность его воззрений и их отличие от корпускулярной теории света Ньютона можно проиллюстрировать следующим примером (рис. 5).

В соответствии с теорией Ньютона частица, переносящая свет от источника к приемнику, ведет себя аналогично

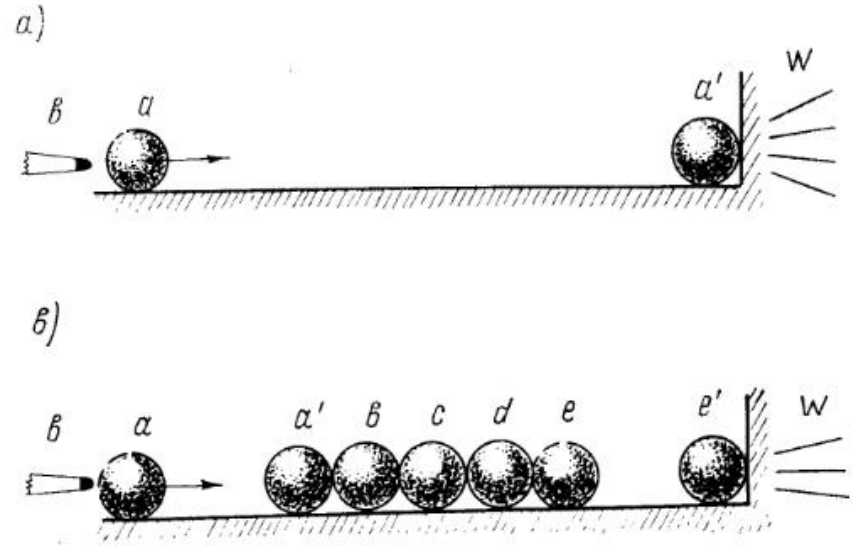

Рис. 5. К различию корпускулярной и волновой теорий света. В соответствии с корпускулярной теорией Ньютона (рис. *а*) частица, переносящая свет, ведет себя аналогично биллиардному шару *a*, который под действием «источника — кия *b* — летит через пространство и передает свой импульс приемнику — стенке *W*. В соответствии с волновой теорией Гюйгенса распространение света аналогично процессу, при котором шар *a* передает свой импульс шару *b* и останавливается сам в положении *a'*. В свою очередь шар *b* передает импульс шару *c* и т. д. В итоге все шары остаются на месте, кроме крайнего шара *e*, который отлетает от ряда шаров со скоростью шара *a* и передает свой импульс стенке *W*. В соответствии с представлениями Гюйгенса процесс распространения света в пространстве осуществляется за счет последовательной передачи возмущения через элементы этого пространства, как через промежуточные звенья. В трехмерном пространстве роль таких звеньев играют двумерные поверхности

бильярдному шару a, который под действием «источника» удара, нанесенного кием b, перемещается из положения a в положение a' к стенке W, передавая последней свой импульс (рис. 5, a).

В соответствии с теорией Гюйгенса процесс передачи света от приемника к источнику аналогичен несколько более сложной, однако также достаточно хорошо известной ситуации (рис. 5, b). В этом случае исходный шар a передает свой импульс шару b и останавливается сам в положении a'. В свою очередь шар b передает свой импульс шару c и т. д. В конечном итоге этого процесса все шары остаются на месте, кроме крайнего шара e, который отлетает от ряда шаров со скоростью первоначального шара a и «воспринимается» стенкой W.

Несмотря на то, что конечный результат обоих упомянутых процессов совершенно одинаков, корпускулярный и волновой механизмы передачи возмущения через пространство существенно различны как по существу, так, и это самое главное, по своим возможным последствиям. Действительно, нетрудно заметить, что корпускулярная теория предполагает передачу импульса посредством переноса частицы. В волновой теории частицы не перемещаются — перемещается только энергия. Однако для данного случая, как, пожалуй, для всей волновой теории в целом, более важным является тот факт, что соответствующее свету возмущение передается через элементы пространства как через некие промежуточные звенья. В примере, приведенном на рис. 5, b, такими звеньями являются шары b, c, d, в трехмерном пространстве роль звеньев, через которые передается световое поле, выполняют двумерные поверхности.

Процесс распространения светового поля через пространство напоминает, таким образом, рассмотренный ранее процесс последовательной передачи образа по цепи от объекта — световому полю, от светового поля — сетчатке глаза, от сетчатки глаза — мозгу. Как уже отмечалось, из самого факта существования такой последовательности следует возможность воспроизведения образа посредством имитации соответствующих ему сигналов в одном из звеньев упомянутой цепи. Нет ничего удивительного в том, что аналогичная мысль, только применительно к волновому полю, пришла 300 лет тому назад Х. Гюйгенсу. Суть этой идеи, известной в настоящее время под названием «принцип Гюйгенса», заключается в том, что световое поле в любой точке пространства (например, значение поля объекта O) можно рассматривать как сумму действия вторичных источников s_1, s_2, s_3, ...,

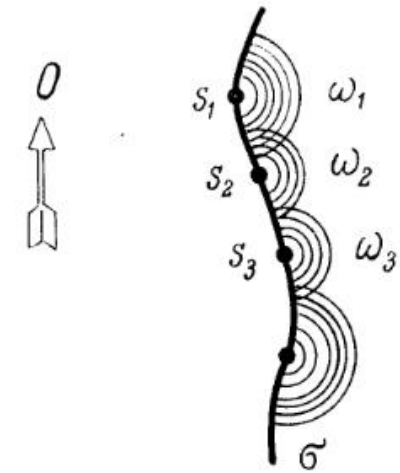

Рис. 6. Сведение задачи воспроизведения трехмерного поля к задаче воспроизведения поля на поверхности. В соответствии с принципом Гюйгенса, для того чтобы воспроизвести во всем трехмерном пространстве поле света, рассеянного объектом O, достаточно воспроизвести значения этого поля в одном звене пространства — на некоторой поверхности σ, каждая точка которой (точки s_1, s_2, s_3) явится источником вторичных волн (волны ω_1, ω_2, ω_3...). Складываясь, вторичные волны воспронзведут волновое поле объекта далее по ходу распространения света во всем трехмерном пространстве справа от поверхности σ

расположенных на произвольной поверхности σ и излучающих с силой, пропорциональной значениям амплитуды первичной волны на этой поверхности (рис. 6).

Фактически принцип Гюйгенса прямо подразумевает основную идею голографии. Из него непосредственно следует, что если воспроизвести значения поля света на какой-то поверхности (т. е. в одном звене цепи, через которое распространяется поле), то это поле воспроизведется во всем остальном трехмерном пространстве (т. е. во всех последующих звеньях). В примере, приведенном на рис. 6, при воспроизведении поля объекта *O* на поверхности σ это поле воспроизведется далее по ходу распространения света во всем трехмерном пространстве, т. е. справа от поверхности σ.

Сведение проблемы воспроизведения трехмерного поля объекта к воспроизведению значений этого поля на поверхности существенно упростило задачу, однако воспроизведение поверхностных полей также оказалось весьма сложным делом. В общем случае эта задача не решена и в настоящее время, в частности, мы не знаем таких методов, которые позволили бы точно воспроизвести поле солнечного света, рассеянного естественными предметами. И это понятно: естественный свет несет громадное количество информации как о событиях на Солнце, так и о событиях на поверхности предметов, которые этот свет рассеяли. Современная физика умеет записывать поле света только в том случае, если этот свет был испущен стабильным, не несущим меняющейся во времени информации источником, и был отражен от «замороженных» объектов, на поверхности которых также не происходило изменений.

Отсутствию каких-либо перемен в источнике излучения соответствуют монотонные, стабильные во времени периодические колебания излучающих электронов. Только такой так называемый монохроматический источник, в состоянии испускать те «настоящие» волны, без помощи которых Гюйгенс умудрился создать свою волновую теорию света. Рассмотрим процесс образования волны на примере распространения волн по веревке, один конец которой раскачивает все та же матрешка (рис. 7). Когда матрешка поднимает конец веревки *a*, то этот конец увлекает за собою участок веревки *b*, участок *b* в свою очередь — участок *c* и т. д. (рис. 7, *a*). При этом фаза движения каждого последующего участка веревки отстает от фазы движения предыдущего, так как возмущение распространяется по веревке с конечной скоростью. В результате этого отставания оказывается, что когда матрешка опустит конец веревки *a*, то дальние части веревки *d*,

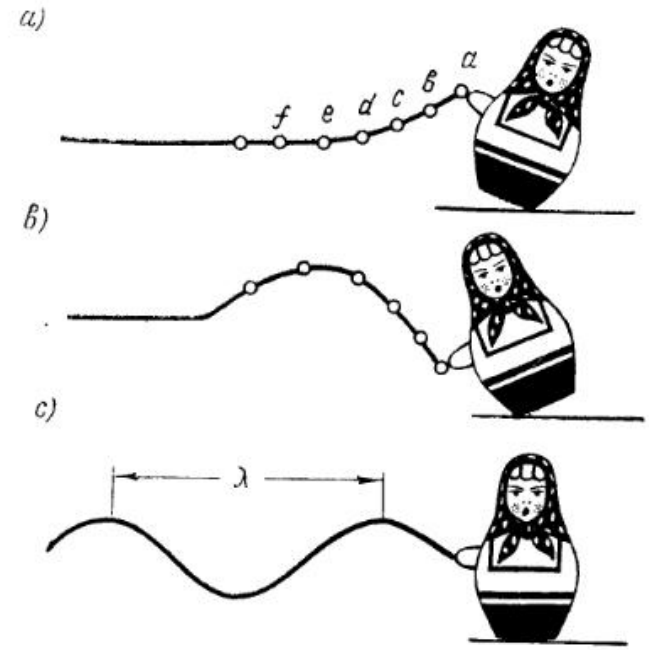

Рис. 7. Образование бегущей монохроматнческой волны под влиянием стационарных колебаний в источнике излучения. Источник монохроматнческого излучения (матрешка) начинает монотонно раскачивать поле (в данном случае веревку). Когда матрешка поднимает конец *a*, этот конец увлекает за собою участок *b*, тот, в свою очередь, участок *c* и т. д. (рис. *a*). При опусканнн конца веревки *a* ближние участки *b* и *c* следуют за ним, однако вследствие конечности скорости распространения возмущения дальние участки *d*, *e*, *f* продолжают еще подниматься — начинает образовываться характерная форма бегущей волны (рис. *b*). Если источник действует достаточно продолжительное время, устанавливается стационарная волна — бесконечная бегущая система горбов и впадин, начинающая свое движение от руки матрешки. Такое излучение характеризуется длиной волны λ

e, *f* будут продолжать двигаться по инерции вверх, в то время как части *b* и *c*, прилегающие к участку *a*, начнут уже опускаться. Возникает характерная форма волны, бегущей по веревке (рис. 7, *b*). Если матрешка будет продолжать монотонно раскачивать веревку, т. е. станет когерентным источником, то веревка приобретает форму бесконечной бегущей системы горбов и впадин, которые последовательно начинают свое движение от руки матрешки (рис. 7, *c*), — устанавливается стационарная волна. Распространяющееся посредством такой волны излучение называют монохроматическим, основной характеристикой его является «длина волны» λ, т. е. расстояние между смежными максимумами.

В природе строго монохроматический свет, как правило, не встречается, поскольку, как уже отмечалось, различные события нарушают стационарный характер колебаний в источнике излучения. Математикам известно так называемое преобразование Фурье, с помощью которого практически любая функция может быть представлена в виде разложения на гармоники. Аналогичную операцию можно произвести и со светом, т. е. представить произвольное колебание волнового поля в виде суммы отдельных монохроматических составляющих. Зависимость интенсивности таких гармоник от длины волны называется спектром излучения.

Разложение колебаний волнового поля на гармонические составляющие отнюдь не является математической абстракцией, а соответствует самой сути происходящих в волновом поле физических процессов. Впервые эксперимент по разложению излучения видимого белого света в спектр был осуществлен Исааком Ньютоном в 1666 г. (мемуар «Новая теория света и цветов»). Общая схема эксперимента Ньютона приведена на рис. 8. Излучение белого света *S*, характеризующееся определенной формой колебаний волнового поля, падает на стеклянную призму *P*. Призма обладает дисперсией, т. е. по-разному преломляет различные монохроматические составляющие. В результате белое излучение раскладывается в веер цветных лучей s_1, s_2, s_3, которые соответствуют монохроматическим составляющим с различным длинами волн λ_1, λ_2, λ_3... Эти лучи распространяются по различным направлениям, образуя светящуюся модель спектра излучения источника *S*. В нижней части рисунка изображен построенный на основе этих данных математический спектр, т. е. графическая зависимость распределения интенсивности монохроматических составляющих *I* от длины волны λ.

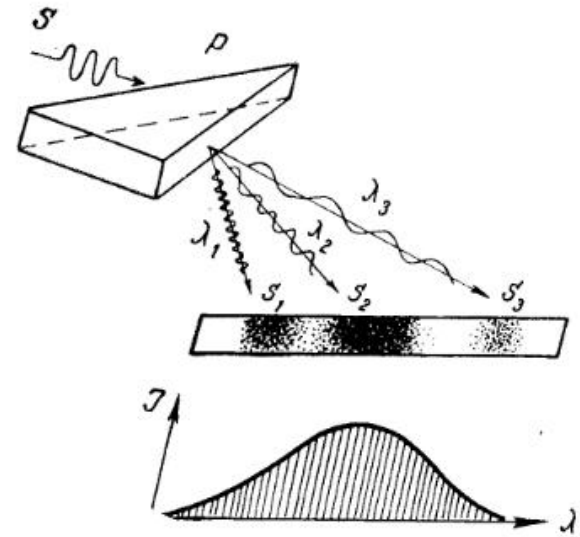

Рис. 8. Эксперимент Ньютона по разложению белого света в спектр. Излучение белого света *S*, характеризующееся определенной формой колебаний волнового поля, падает на призму *P*, которая разлагает это излучение в спектр-веер лучей s_1, s_2, s_3, ..., соответствующих монохроматическим составляющим с длинами волн λ_1, λ_2, λ_3... В нижней части рисунка спектр изображен графически в виде зависимости интенсивности монохроматических составляющих *I* от длины волны λ

Осуществив разложение белого света в спектр, Ньютон фактически впервые выделил монохроматическое (как он говорил «однородное») излучение в его чистом виде. Дополнив эти эксперименты, он пришел к выводу, что хотя свет и переносят корпускулы, вместе с тем процесс его распространения связан также с какой-то волной. Более определенно гипотезу о том, что монохроматическому свету сопутствует волна, высказал Леонард Эйлер (1754 г.), а затем Томас Юнг. Развивая эту гипотезу, Юнг открыл и одно из ее основных следствий — существование так называемого явления интерференции света (1807 г.). Поскольку это явление наряду с принципом Гюйгенса является для голографии одним из основных, рассмотрим опыт Юнга подробнее.

Схема опыта Юнга, впервые доказавшего возможность интерференции световых волн, была весьма проста (рис. 9). Монохроматический источник света S освещал непрозрачный экран N, в котором имелись два отверстия S_1 и S_2, игравшие роль вторичных источников. Источник S_1, действуя в отдельности, создавал на белом экране P равномерно светящийся круг L_1. Аналогично источник S_2 создавал круг L_2. Однако, когда оба источника светили одновременно, возникало поразительное явление: область, где круги L_1 и L_2 перекрывались, пересекалась системой темных полос, т. е. свет гасил свет. Это удивительное явление нетрудно объяснить, если вспомнить о том, что свет распространяется при помощи волн. Оказывается, что в темных местах экрана расстояния до источников S_1 и S_2 таковы, что свет от этих источников всегда приходит в противофазе, т. е. гребень волны источника S_1 совпадает со впадиной волны источника S_2 и наоборот. Естественно, что два равных и взаимно противоположных отклонения нейтрализуют друг друга и свет в этих местах всегда отсутствует. В светлые места экрана волны источников S_1 и S_2 всегда приходят в одной и той же фазе, т. е. гребень волны источника S_1 всегда совпадает с гребнем волны источника S_2. В результате колебания светового поля в таких точках усиливаются.

Более подробно в применении к случаю интерференции плоских волн этот процесс рассмотрен на рис. 10,*а*. Вообще говоря, поверхности волнового фронта точечного источника, т. е. поверхности, где колебания поля характеризуются одной и той же фазой, представляют собою сферы, центр кривизны которых находится в точке источника. Случаю плоских волн соответствуют бесконечно удаленные источники, когда радиус кривизны сферы становится бесконечно большим. Две такие

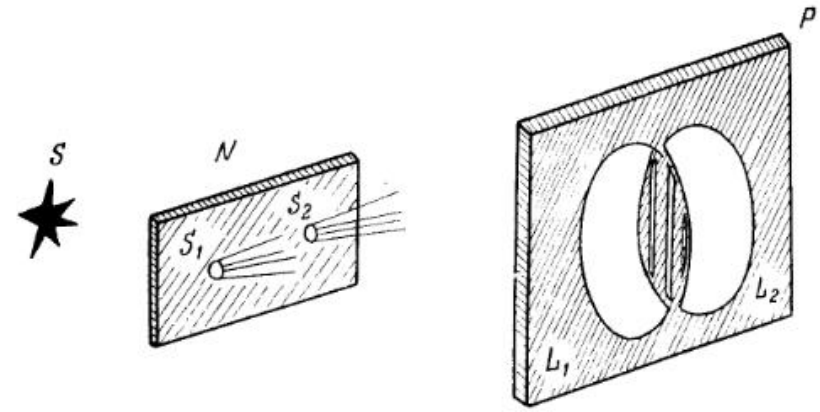

Рис. 9. Опыт Юнга. Излучение монохроматического источника S проходит через отверстия S_1 и S_2, которые играют роль вторичных источников излучения. Излучение источника S, действуя в отдельности, образует равномерно светящийся круг L_1, излучение источника S_2 — равномерно светящийся круг L_2. При одновременном действии источников S_1 и S_2 в области перекрытия кругов L_1 и L_2 появляется картина интерференции — система темных и светлых полос. Светлые полосы соответствуют местам, где колебания полей источников S_1 и S_2 имеют одинаковую фазу, темные — местам, где фазы этих колебаний отличаются

волны излучения, распространяющегося от бесконечно удаленных источников S_1 и S_2, обозначены на рисунке W_1 и W_2.

Если принять, что расстояния от источников S_1 и S_2 до соответствующих им волновых фронтов W_1 и W_2 одинаковы, то очевидно, что в точку a, равноудаленную от фронтов W_1 и W_2, интерферирующие волны приходят в одной фазе, т. е. горбы и впадины обеих волн прибывают одновременно. Размах колебаний поля в этой точке должен быть максимальным. Рассмотрим условия сложения колебаний в некоторой соседней точке a'. Нетрудно заметить, что расстояния от этой точки до фронтов W_1 и W_2 по сравнению с предыдущим случаем изменились. Проведя перпендикуляры из точек a и a' на прямые $a'c'$ и ab, находим, что расстояние от точки a' до фронта W_1 уменьшилось на величину $ad' = aa' \sin\frac{\theta}{2}$, а расстояние до фронта W_2 увеличилось на величину $a'd = ad'$. В целом разность хода от источников S_1 и S_2 до точки, где рассматривается интерференция, изменится на величину

$$\delta = 2aa' \sin\frac{\theta}{2}. \qquad (1)$$

Если смещение aa_1 таково, что разность хода δ становится равной половине длины световой волны, то очевидно, что колебания источников S_1 и S_2 также придут в точку сдвинутыми на половину длины волны, т. е. в противофазе. В этом случае горбы волны W_1 совпадут со впадинами волны W_2, волны взаимно погасятся. Интенсивность светового поля в этой точке будет равна нулю. Если смещение таково, что разность хода равна целой длине волны, то в эту точку волны снова придут в фазе и амплитуда колебаний в этой точке опять будет максимальной.

Рассматривая последовательно таким способом все точки вдоль оси X, перпендикулярной биссектрисе угла θ, найдем распределение интенсивности в картине интерференции источников S_1 и S_2 (см. график в нижней части рисунка). Основным параметром картины интерференции является ее период Λ, т. е. расстояние между смежными максимумами интенсивности. Для того чтобы найти эту величину, достаточно приравнять в формуле (1) разность хода δ к длине световой волны λ. Подставляя в формулу (1) $\delta = \lambda$ и обозначая величину пространственного периода Λ, т. е. принимая $aa' = \Lambda$, найдем, что в случае интерференции двух плоских волн пространственный период интерференционной картины Λ определяется следующим выражением:

$$\lambda = 2\Lambda \sin\frac{\theta}{2}, \qquad (2)$$

где θ — угол между интерферирующими волнами.

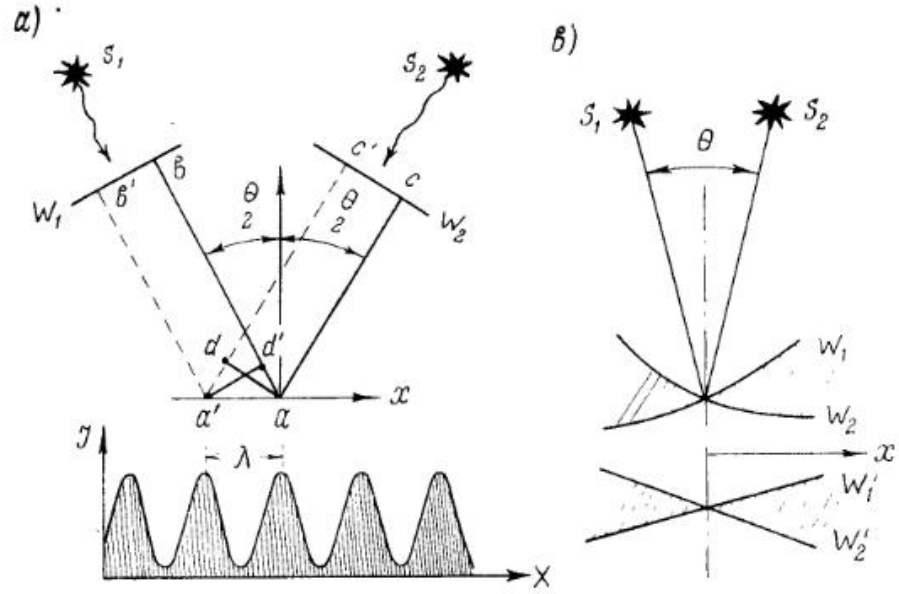

Рис. 10. К рассмотрению процесса интерференции. *а* — случай интерференции плоских волн W_1 и W_2, испускаемых бесконечно удаленными источниками S_1 и S_2. В точке a колебания волн W_1 и W_2 взаимно усиливаются, поскольку расстояния ab и ac равны, и излучение источников S_1 и S_2 приходит в точку a в одной фазе. В точке a' расстояние до волны W_1 по сравнению с предыдущим случаем уменьшается на величину ad', а расстояние до волны W_2 увеличивается на величину $a'd$. Когда общая разность хода будет равна половине длины световой волны, колебания волн W_1 и W_2 в точке a' взаимно погасятся. График функции распределения интенсивности во всей интерференционной картине в зависимости от пространственной координаты X приведен в нижней части рисунка, *б* — случай интерференции излучения источников S_1 и S_2, расположенных на конечном расстоянии. В первом приближении картина интерференции таких источников совпадает с картиной интерференции двух плоских волн W_1' и W_2'

В случае, когда интерферирующие источники находятся на конечном расстоянии, как это имеет место в опыте Юнга, распределение интенсивности в интерференционной картине имеет более сложный характер. Однако в первом приближении можно считать, что оно также представляет собою гармонику, пространственный период которой описывается формулой (2). Причина такого соответствия заключается в том, что толщина «клина», заключенного между сферическими волнами W_1 и W_2 (см. заштрихованную часть на рис. 10, *b*), в первом приближении пропорциональная разности хода до источников S_1 и S_2, изменяется с расстоянием X в достаточно широких пределах аналогично толщине клина, заключенного между двумя плоскими волнами W_1 и W_2 (рис. 10, *b*).

Явление интерференции не ограничивается плоскостью экрана — свет интерферирует со светом всюду, где встречаются интерферирующие пучки, и в общем случае картина интерференции трехмерна. Экран в опыте Юнга является лишь приемником, который выявляет распределение интенсивности светового поля в одной из плоскостей пространства.

Пространственную картину интерференции называют обычной стоячей волной. Характерная конфигурация стоячей волны, возникающей в результате интерференции излучения двух когерентных (т. е. синфазных) источников S_1 и S_2, показана на рис. 11 в виде сечения стоячей волны плоскостью, проходящей через источники. Затушеванным частям на рисунке соответствуют участки поля, в которых интенсивность света максимальна, такие участки называются «пучностями» стоячей волны. Пучности разделены «узлами», в узлах интенсивность поля минимальна. Узлы и пучности образуют сложную систему пространственных поверхностей, при этом каждая такая поверхность определена тем, что условия интерференции на ней должны быть одинаковыми. Соответственно этому каждая поверхность пучностей, как и каждая поверхность узлов, представляет собой геометрическое место точек, равноудаленных от источников S_1 и S_2. В целом, в случае интерференции излучения двух точечных источников, поверхности узлов и пучностей образуют систему вложенных друг в друга гиперболоидов вращения.

Характерной особенностью картины стоячих волн является то, что в области, где интерферирующие пучки распространяются навстречу друг другу, т. е. где угол θ равен 180°, например в районе точки h_1 на рис. 11, расстояние между поверхностями пучностей минимально и в соответствии с формулой (2) составляет половину длины световой волны (в случае видимого света эта величина равна прибли-

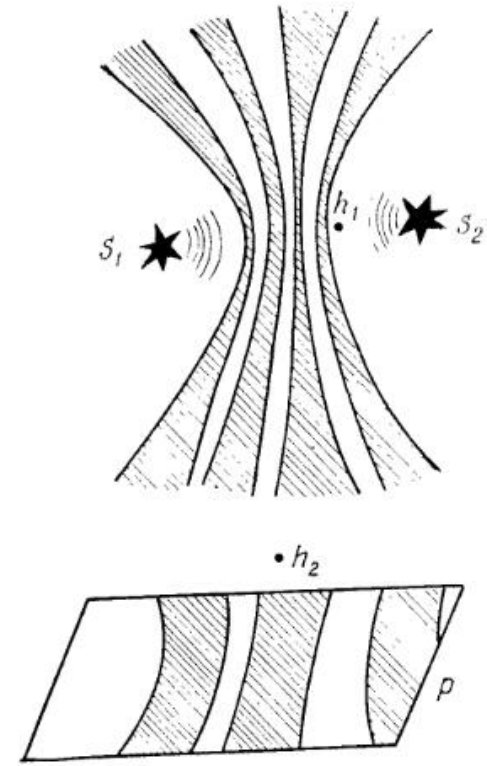

Рис. 11. Общая схема образования стоячей волны — пространственной картины интерференции двух монохроматических когерентных (т. е. синфазных) источников излучения S_1 и S_2. В верхней части рисунка показано сечение стоячей волны плоскостью, проходящей через источники S_1 и S_2. Пучности — участки, где интенсивность поля максимальна — затушеваны, между ними располагаются узлы. В узлах интенсивность поля минимальна. В трехмерном пространстве пучности образуют гиперболоиды вращения. Расстояние между смежными поверхностями пучностей минимально там, где интерферирующие лучи распространяются навстречу друг другу (район точки h_1), и максимально там, где эти лучи идут приблизительно по одному направлению(район точки h_2). Юнг фактически регистрировал распределение интенсивности в плоском сечении пространственной стоячей волны в области, где расстояние между смежными поверхностями пучностей достаточно велико (см. нижнюю часть рисунка)

зительно четверти микрона). В областях, где интерферирующие пучки распространяются приблизительно по одному и тому же направлению, т. е. там, где угол θ мал, например, в районе точки h_2, расстояние между поверхностями пучностей существенно увеличивается. Причина такой закономерности весьма проста: там, где интерферирующие лучи распространяются навстречу друг другу, т. е. в области, расположенной между источниками S_1 и S_2, небольшим смещениям точки наблюдения h соответствуют существенные изменения разности хода $S_1h_1—S_2h_1$ от точки h_1 до источников S_1 и S_2. В боковых областях картины стоячих волн, где интерферирующие лучи идут приблизительно по одному направлению, указанная разность меняется в пространстве значительно медленнее. Сравнивая рис. 9 и 11, нетрудно заметить, что Юнг в своем опыте фактически наблюдал распределение интенсивности света в сечении картины стоячих волн плоскостью экрана P, параллельной линии, соединяющей источники S_1 и S_2, в области, где угол между интерферирующими пучками весьма мал. На рис. 9 это сечение показано внизу в аксонометрической проекции.

ГЛАВА II

ИСТОКИ ГОЛОГРАФИИ В ОБЛАСТИ ФОТОГРАФИИ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ОПТИКИ

§ 1. Отображение спектрального состава излучения объемной картиной стоячих волн (метод цветной фотографии Липпмана)

Если голографию рассматривать как метод, основанный на свойстве фотографической записи картины стоячих волн воспроизводить волновые поля со всеми их параметрами, в том числе со спектральным составом, то следует признать, что первый голографический эффект был обнаружен еще на заре фотографии французскими исследователями А. Беккерелем (3) и Н. Ньепсом (4) и объяснен их соотечественником Габриэлем Липпманом (5).

А. Беккерель регистрировал фотографии на фотопластинках, у которых эмульсионный слой был нанесен на полированное серебро. Как это ни удивительно, оказалось, что такие пластинки без помощи каких-либо красителей воспроизводили также и цвет зарегистрированного на них объекта. Теория этого эффекта, тщательно обоснованная экспериментом, была впоследствии создана Г. Липпманом. Г. Липпман показал, что причина этого явления заключается в следующем. При экспозиции над полированной поверхностью серебра возникает объемная слоистая картина стоячих световых волн, которая впечатывается затем в толщу эмульсионного слоя. При наблюдении фотографии излучение белого естественного света интерферирует на запечатленных в эмульсии слоях картины стоячих волн таким образом, что фотография выбирает из белого света и отражает излучение только

тех монохроматических составляющих, которые были на ней зарегистрированы.

На основе этих представлений Г. Липпман разработал метод цветной фотографии, который хотя и не получил практического применения, однако представляет в данном случае интерес с точки зрения наглядной иллюстрации данного явления. Схема метода Липпмана приведена на рис. 12. Излучение некоторого объекта (лучи l_1, l_2, l_3) фокусируется объективом фотоаппарата O на фотопластинку, повернутую таким образом, что изображение проецируется на эмульсионный слой c через стеклянную подложку a. К обратной стороне эмульсионного слоя c вплотную прилегает ртутное зеркало z. Фотопластинка изготавливается по специальной технологии, разработанной Липпманом, и отличается очень высокой разрешающей способностью, а также тем, что ее эмульсионный слой прозрачен. (Такие фотопластинки, известные под названием «липпмановские», широко используются и в настоящее время). Пройдя через прозрачный эмульсионный слой c, излучение объекта отражается в обратном направлении ртутным зеркалом z. В результате сложения падающего и отраженного излучения над поверхностью зеркала возникает стоячая световая волна, пучности которой d_1, d_2, d_3 представляют собою систему плоскостей, параллельных поверхности зеркала и отстоящих друг от друга на расстоянии, равном половине длины волны падающего излучения, т. е. на расстоянии порядка четверти микрона. Если падающее излучение немонохроматично, то по мере удаления от поверхности зеркала концентрация света в пучностях уменьшается и распределение интенсивности света становится равномерным. Характерная зависимость интенсивности стоячей волны от расстояния до поверхности зеркала приведена в нижней части рис. 12.

После экспозиции и последующего проявления на месте поверхностей пучностей высаживается металлическое серебро, и в эмульсионном слое образуется ряд параллельных зеркальных поверхностей, расположенных на расстоянии $\lambda_0/2$, равном половине длины волны экспонирующего излучения λ_0. Оказывается, что такая периодическая система зеркал имеет высокий коэффициент отражения только для излучения с длиной волны λ_0, т. е. только для той спектральной составляющей, которая была зарегистрирована на фотопластинке при съемке. Излучение остальных длин волн проходит через такую систему зеркал беспрепятственно. В результате, если направить на полученную таким способом фотографию излучение белого источника со сплошным спектром, то она выбе-

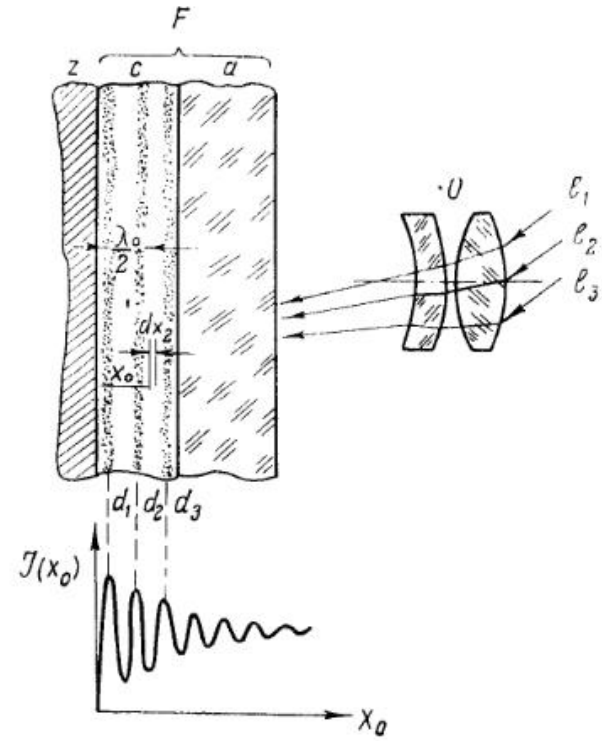

Рис. 12. Схема метода цветной фотографии Липпмана. Излучение некоторого объекта (лучи l_1, l_2, l_3) с длиной волны λ_0 фокусируется объективом фотоаппарата O на фотопластинку F. Пройдя стеклянную подложку фотопластинки a и прозрачный эмульсионный слой c, это излучение отражается от ртутного зеркала z. В результате сложения падающего и отраженного излучения над зеркалом возникает стоячая световая волна, пучности которой представляют собою систему слоев, параллельных поверхности зеркала z и расположенных на расстоянии $\lambda_0/2$. Распределение интенсивности такой стоячей волны в зависимости от расстояния до поверхности зеркала z приведено в нижней части рисунка. После экспозиции и проявления в эмульсионном слое c образуется система плоских металлических зеркал, расположенных на расстоянии $\lambda_0/2$ друг от друга. Оказывается, что если на такую систему падает излучение белого света, то она выбирает из этого света и отражает излучение только той длины волны, которое экспонировало фотопластинку

рет из этого излучения и отразит только те монохроматические составляющие, которые участвовали в процессе регистрации. Соответственно воспроизведутся правильные цвета зарегистрированных на фотографии объектов.

Рассмотрим конкретный механизм записи и воспроизведения спектрального состава излучения при помощи липпмановской фотографии. На рис. 13 представлена схема образования стоячей волны, возникающей в результате сложения падающей волны W и волны W', отраженной от зеркала Z. Падающая волна (обозначена сплошной жирной линией, см. рис. 13, *а*) распространяется слева направо в свободном пространстве A по направлению стрелки, идущей от точки a. Для того чтобы определить форму волны, отраженной от зеркала Z, необходимо по обычным правилам построить в «зазеркальном» пространстве B изображение падающей волны W. При этом, в частности, точка a изобразится симметричной точкой a', точка $b-b'$ и т. д. Построенное таким способом зеркальное изображение волны W обозначено кривой, состоящей из точек. Зеркальное изображение падающей волны движется навстречу своему оригиналу аналогично тому, как ведут себя все зеркальные изображения.

Кроме всего сказанного, необходимо также учесть, что в силу того, что на металлической поверхности зеркала напряженность поля должна быть равна нулю, происходит так называемая потеря полуволны, т. е. фаза волны, бегущей в «зазеркалье», должна быть противоположна по отношению к фазе исходной волны. Такое следствие общих положений электродинамики, в общем, представляется достаточно естественным — мы привыкли к тому, что в «зазеркалье» все должно быть наоборот. Учитывая это обстоятельство, необходимо изменить знак колебаний, т. е. точку a' трансформировать в точку a'', точку b' в точку b'' и т. д.

Построенная по указанным правилам волны W_Z изображена в пространстве «зазеркалья» сплошной кривой. Выходя из пространства «зазеркалья» B в реальное пространство A, волна W_Z образует отраженную волну W'. На рис. 13, *а* эта волна изображена пунктиром. Складывая амплитуды, т. е. в данном случае ординаты падающей волны W и волны W', отраженной от зеркала, найдем результирующую волну в пространстве перед зеркалом. Результат этой операции изображен на рис. 13, *б*. Рассматривая этот рисунок, нетрудно заметить характерную особенность, которая заключается в том, что в точках c и d, расположенных от зеркала Z на расстояниях, кратных половине длины волны падающего излучения, амплитуда колебаний поля равна нулю.

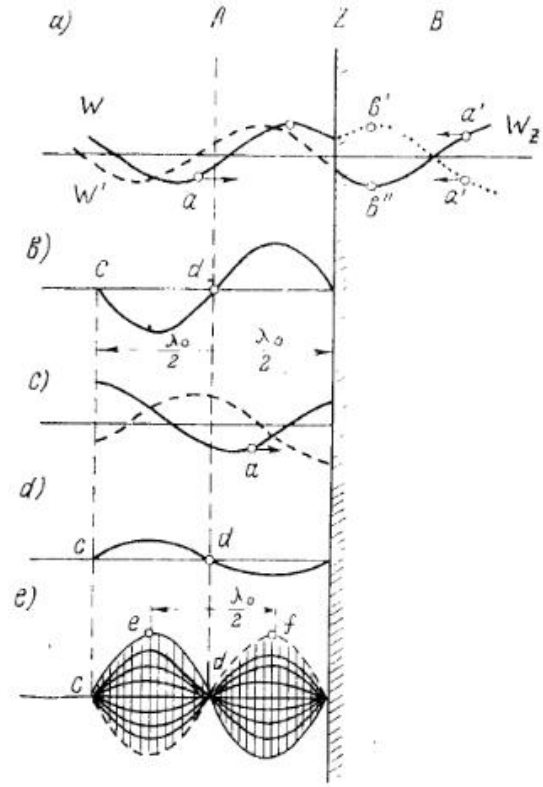

Рис. 13. Образование стоячей волны в пространстве перед зеркалом. *а* — процесс отражения волны от зеркала. Падающей волне W, распространяющейся в реальном пространстве A, в «зазеркалье» B соответствует ее зеркальное изображение. Вследствие потери полуволны на поверхности зеркала Z фазы зеркальной волны следует сменить на противоположные (волна W_Z). Выходя из зазеркалья, волна W_Z образует отраженную от зеркала волну W'. *б* — результирующая картина колебаний поля в пространстве перед зеркалом, полученная посредством сложения амплитуд падающей и отраженной волн. На рис. *в* и *д* — изображена аналогичная рис. *а* и *б*, соответственно, картина колебаний поля в какой-то следующий момент времени, характеризующийся тем, что точка a падающей волны сместилась ближе к зеркалу Z. *е* — стоячая волна, образованная в результате положения всех последовательных фаз взаимодействия волны W с зеркалом Z. Амплитуда колебаний стоячей волны меняется в пределах от кривой, изображенной жирной сплошной линией, до кривой, изображенной пунктиром (см. рис. *е*). Из рисунка следует, что в узлах стоячей волны — в точках c и d — амплитуда колебаний поля всегда равна нулю, а в пучностях — точках e и f — размах колебаний максимален

Ситуация в какой-то следующий момент времени изображена на рис. 13, *c* и *d*. Точка *a* волны W' сместилась ближе к зеркалу, отраженная волна, изображенная пунктиром, также изменилась, однако суммарное колебание (рис. 13, *d*) таково, что возмущение в точках *c* и *d* по-прежнему равно нулю.

Результат наложения всех последовательных фаз взаимодействия волны W с зеркалом Z изображен на рис. 13, *e*. Из рисунка следует, что значения поля в пространстве перед зеркалом проходят все фазы от изображенной жирной сплошной кривой до изображенной пунктиром таким образом, что в узлах — точках *c* и *d* значения поля всегда равны нулю, а в пучностях — точках *e* и *f* размах колебаний поля всегда максимален. Структура такого рода собственно и называется стоячей волной.

На рис. 14 рассмотрен более сложный случай, когда стоячую волну образует не одна монохроматическая составляющая, а излучение, характеризующееся сплошным спектром в интервале длин волн $\Delta\lambda$ от длины волны λ_0 до λ_p (см. график в верхней части рисунка). Каждая из монохроматических составляющих такого излучения, взаимодействуя с зеркалом, образует стоячую волну. На рисунке приведены распределения интенсивностей (квадратов амплитуды) стоячих волн, соответствующих четырем монохроматическим составляющим рассматриваемого излучения — крайним длинам волн спектрального интервала λ_0 и λ_p, причем выбранным так, что $\lambda_p = \lambda_0 + \lambda_0/7$, а также двум промежуточным длинам волн λ_1 и λ_2, выбранным так, что $\lambda_1 = \lambda_0 + \lambda_0/9$ и $\lambda_2 = \lambda_0 + \lambda_0/11$.

В нижней части рисунка изображена функция распределения интенсивности в результирующей стоячей волне, полученная посредством суммирования интенсивностей стоячих волн, соответствующих отдельным монохроматическим составляющим. Как видно из рисунка, вблизи зеркала максимумы и минимумы всех монохроматических стоячих волн практически совпадают, поскольку в соответствии с граничными условиями первый минимум всегда лежит на поверхности зеркала, а также в силу того, что длины волн рассматриваемого интервала в общем отличаются не очень сильно. Нетрудно понять, что в этой области, т. е. вблизи зеркала, результирующая стоячая волна должна характеризоваться значительными модуляциями интенсивности. Однако по мере удаления от поверхности зеркала картина изменяется: максимумы одних монохроматических составляющих перемещаются к минимумам других, и глубина модуляции результ-

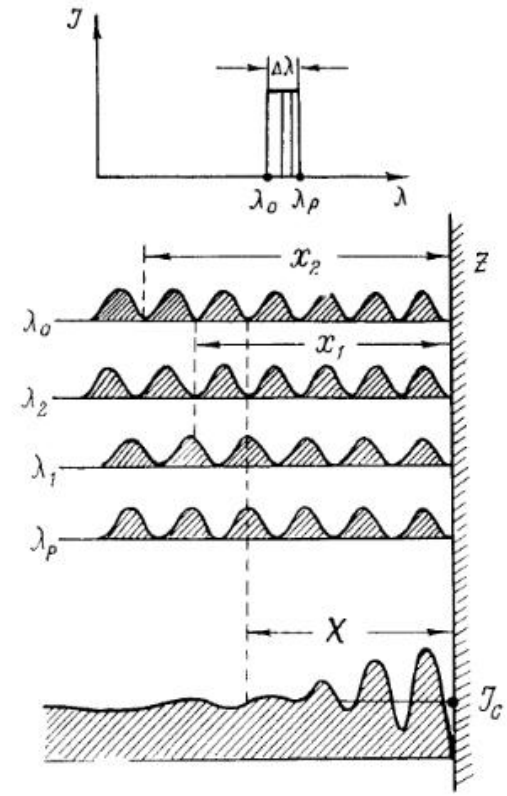

Рис. 14. Образование стоячей волны в случае, когда на зеркало Z падает излучение, характеризующееся сплошным спектром в пределах некоторого спектрального интервала протяженностью $\Delta\lambda$ (см. график в верхней части рисунка). Каждая из монохроматических составляющих этого спектрального интервала образует стоячую волну с синусоидальным распределением интенсивности. На рисунке изображены распределения интенсивности в стоячих волнах, созданных четырьмя монохроматическими составляющими рассматриваемого интервала. В нижней части рисунка изображено распределение интенсивности в результирующей стоячей волне, полученное посредством сложения интенсивностей всех монохроматических составляющих. Вблизи зеркала максимумы всех монохроматических стоячих волн практически совпадают, и поэтому распределение интенсивности суммарной стоячей волны сильно модулировано. По мере удаления от зеркала положения максимумов различных составляющих смещаются поразному и глубина модуляции суммарной стоячей волны уменьшается

тирующей стоячей волны постепенно уменьшается. Наконец, на некотором расстоянии X минимум стоячей волны, образованной одной крайней монохроматической составляющей спектрального интервала падающего излучения, совпадет с максимумом стоячей волны другой крайней составляющей этого интервала и суммарная интенсивность станет равной некоторому среднему значению I_c. (На рис. 14 четвертый минимум картины, соответствующей λ_0, совпадает с четвертым максимумом картины, соответствующей λ_p). С этого расстояния и далее модуляции картины стоячих волн практически исчезнут. На самом деле, на расстоянии x_1 пятый минимум λ_0 совпадет с пятым максимумом λ_2, на расстоянии x_2 шестой минимум λ_0 совпадет с шестым максимумом λ_1 и т. д.

В общем случае глубину картины стоячих волн в зависимости от ширины спектрального интервала излучения, падающего на зеркало $\Delta\lambda$, можно получить, потребовав, чтобы расстояние до n-го минимума стоячей волны, образованной одной крайней монохроматической составляющей спектрального интервала, было равно расстоянию до n-го максимума стоячей волны, образованной другой крайней монохроматической составляющей этого интервала. Проведя элементарные арифметические расчеты, получаем

$$X \approx \frac{\lambda^2}{4\Delta\lambda} . \qquad (3)$$

Оценим возможную глубину картины стоячих волн в толще эмульсионного слоя липпмановской фотографии, исходя, например, из необходимости регистрировать всю зеленую часть спектра, простирающуюся приблизительно от $\lambda_0 \approx 0{,}48$ мкм до $\lambda_p \approx 0{,}53$ мкм. Принимая, что $\lambda \approx 0{,}5$ мкм и $\Delta\lambda = 0{,}05$ мкм, найдем, что глубина картины стоячих волн равна всего-навсего 1,25 мкм.

Рассмотрим механизм, посредством которого липпмановская фотография воспроизводит спектральный состав записанного на ней излучения (рис. 15). Предположим, что на фотографии было зарегистрировано излучение, характеризующееся сплошным спектром в пределах интервала длин волн от λ_r до λ_u (см. график *а*). Как отмечалось, каждая монохроматическая составляющая зарегистрированного фотографией излучения образует в эмульсионном слое фотопластинки гармоническое распределение плотности металлического серебра. Две такие гармоники плотности Λ_s и Λ_t, соответствующие монохроматическим составляющим с длинами волн λ_s и λ_t, произвольно выбранными из регистрируемого спектрального интервала, изображены на рисунке сплошной тушевкой. С целью упростить рассмотрение заменим каждую гармо-

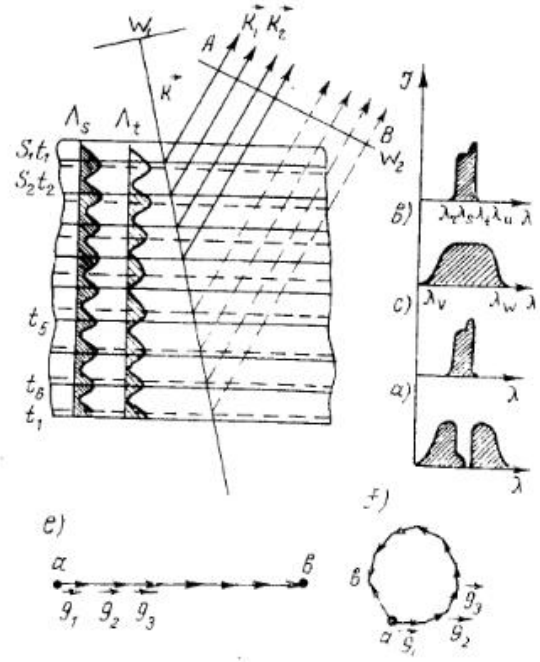

Рис. 15. К механизму воспроизведения спектрального состава излучения с помощью липпмановской фотографии. В эмульсионном слое фотопластинки F зарегистрирована стоячая волна, спектр которой характеризуется сложным распределением по длинам волн (см. график *а*). Гармоники плотности металлического серебра, соответствующие монохроматическим составляющим с длинами волн λ_s и λ_t, заменены системой зеркальных слоев s_1, s_2, s_3... и t_1, t_2, t_3. При наблюдении на фотографию падает волна W, характеризующаяся сплошным спектром (см. график *б*). Излучение с длиной волны λ_s отражается «своей» системой зеркальных слоев так, что отраженные этими слоями волны смещены относительно друг друга на величину, кратную длине волны λ_s, и поэтому взаимно усиливаются. Графически процесс сложения таких волн изображен на рис. *е*. Если на те же слои s_1, s_2, s_3 падает излучение с другой длиной волны λ_t, то смещения волн, отраженных слоями s_1, s_2, s_3, не будут кратными длине волны падающего излучения. Такие волны выходят из синхронизма и взаимно гасятся. Процесс сложения колебаний таких волн представлен на векторной диаграмме *ж*

нику плотности системой зеркальных слоев, проходящих в тех местах, где плотность серебра максимальна, т. е. там, где располагались пучности стоячей волны. В частности, гармонику Λ_s представим системой зеркальных слоев s_1, s_2..., отстоящих друг от друга на расстояние $\lambda_s/2$, а гармонику Λ_t — системой слоев t_1, t_2..., отстоящих на расстояние $\lambda_t/2$.

При наблюдении липпмановская фотография должна быть освещена излучением, характеризующимся сплошным спектром в широком интервале длин волн, например от λ_v до λ_w (см. график *b*). Рассмотрим взаимодействие одной гармоники плотности, представленной системой слоев s_1, s_2, s_3..., с соответствующей ей монохроматической составляющей λ_s падающего излучения. Плоская волна такого излучения W_1, распространяющаяся по направлению вектора $\vec{k}$, проходя через эмульсионный слой фотографии *f*, последовательно отражается от зеркал s_1, s_2, s_3... и образует систему волн, идущих по параллельным направлениям $\vec{k}_1$, $\vec{k}_2$... Волновые фронты отраженных волн перпендикулярны общему направлению их распространения и взаимно перенакладываются в некоторой области *AB*.

Рассмотрим интерференцию, возникающую при переналожении волн, отраженных слоями s_1, s_2, s_3... С этой целью сравним фазы соответствующих им колебаний на поверхности одного какого-то произвольно выделенного волнового фронта W_2, т. е. определим, в одинаковые ли моменты времени эти колебания проходят максимумы и минимумы. При этом в качестве начала отсчета фазы примем фазу колебаний, созданных волной, отраженной слоем s_1. Из рисунка следует, что если пренебречь эффектами наклона лучей, то можно считать, что волна, отраженная следующим слоем s_2, прибывает к плоскости W_2 с отставанием относительно волны, отраженной слоем s_1 на величину, равную удвоенному расстоянию между слоями s_1 и s_2. Поскольку длина волны падающего излучения равна в данном случае λ_s, а расстояние между слоями s_1 и s_2 равно $\lambda_s/2$, то очевидно, что взаимное рассогласование волн, отраженных слоями s_1 и s_2, в точности равно длине волны отраженного излучения λ_s. Нетрудно понять, что смещение волны на целую длину волны фактически ничего не меняет, и поэтому колебания волн, отраженных слоями s_1 и s_2, должны быть строго синфазными. Аналогично волны, отраженные слоями s_3 и s_4, смещаясь относительно волны, отраженной слоем s_1 на кратное число длин волн, остаются синфазными как по отношению к этой волне, так и по отношению друг к другу. Таким образом, оказывается, что волны, отраженные слоями s_1, s_2, s_3, синфазны и поэтому,

складываясь, усиливаются, т. е. гармоника плотности металлического серебра, образованная излучением с длиной волны λ_s, резонируя со «своей» монохроматической составляющей, отражает ее в обратном направлении.

Графически процесс суммирования излучения с длиной волны λ_s, отраженного слоями соответствующей ей гармоники плотности, изображен на диаграмме *e*, где колебания, соответствующие каждой из суммируемых волн, изображены в виде векторов $\vec{g}_1$, $\vec{g}_2$, $\vec{g}_3$... На такой диаграмме смещению колебания на целую длину волны соответствует один полный оборот изображающего его вектора. Соответственно в рассматриваемом случае векторы $\vec{g}_2$, $\vec{g}_3$..., поворачиваясь на один, два и т. д. оборотов, остаются параллельными вектору $\vec{g}$ и поэтому складываются так, что длина суммарного вектора $\vec{ab}$ равна сумме длин составляющих. То есть суммирование волн, отраженных слоями гармоники, приводит в данном случае к существенному усилению результирующей отраженной волны.

Предположим теперь, что на слои s_1, s_2, s_3... гармоники, образованной излучением с длиной волны λ_s, падает излучение с длиной волны λ_t, т. е. «чужая» монохроматическая составляющая, которая не участвовала в образовании данной гармоники. Поскольку геометрия хода лучей от длины волны не зависит, то волны, отраженные слоями s_2, s_3..., и в этом случае по-прежнему прибывают к поверхности W_2 со смещениями λ_s, $2\lambda_s$... Изменение длины волны сказывается в том, что взаимные смещения интерферирующих волн становятся некратными длине световой волны. В результате такие волны выходят из синхронизма и взаимно гасятся. Графически этот процесс изображен на диаграмме *f*. Векторы $\vec{g}_1$, $\vec{g}_2$..., изображающие колебания суммируемых волн, поворачиваются в этом случае на величины, некратные целому обороту и, в результате, величина суммарного вектора $\vec{ab}$ уменьшается по сравнению с предыдущим случаем, изображенным на диаграмме *e*. При достаточной толщине эмульсионного слоя, когда количество отражающих слоев s_1, s_2, s_3... велико, отраженные этими слоями волны практически полностью гасят друг друга. Таким образом, оказывается, что гармоника плотности металлического серебра, созданная излучением с длиной волны λ_s, беспрепятственно пропускает излучение, длина волны которого отличается от λ_s. Однако если это не взаимодействующее с гармоникой Λ_s излучение также было записано на фотографии, то оно в конце концов находит «свою»

гармонику (например, слои t_5, t_6, t_7...), которая отражает это излучение в обратном направлении.

Таким образом, липпмановская фотография выбирает из сплошного спектра излучения источника и отражает отдельные монохроматические составляющие, воспроизводя в результате весь спектр зарегистрированного на ней излучения. Те монохроматические составляющие, которые не были зарегистрированы на фотографии, проходят через нее беспрепятственно (вид спектров отраженного и прошедшего через фотографию излучения приведен на графиках *c* и *d*).

Разработанный Липпманом метод цветной фотографии, несмотря на свое изящество и объективность, практического приложения не получил, поскольку был вытеснен так называемой трехцветной фотографией — сугубо субъективным методом, который воспроизводит не спектральный состав излучения, а цветовые ощущения, возникающие в глазу человека при наблюдении данного объекта.

Основным результатом работ Липпмана явилось теоретическое и экспериментальное обоснование свойства объемной картины стоячих волн воспроизводить спектральный состав излучения. Следует отметить, что теоретическая часть работы Липпмана была выполнена на вполне современном уровне. Липпман показал, что его процесс сводится к двойному преобразованию Фурье: на первом этапе спектр падающего излучения записывается в виде его Фурье-образа — функции распределения интенсивности света в стоячей волне, на втором этапе при реконструкции осуществляется еще одно Фурье-преобразование, в результате которого восстанавливается исходный спектр. Касаясь экспериментальной части работы, следует напомнить, что забытая на полвека экзотическая технология изготовления липпмановских светочувствительных фотопластинок успешно возродилась в настоящее время и наряду с лазерной техникой является одной из основ современной голографии.

§ 2. Связь структуры оптического изображения со значениями поля на поверхности.

(Теория возникновения изображения в микроскопе Э. Аббе)

Воспроизведение спектрального состава волнового поля света все же не является основным эффектом голографии. Дату появления голографии принято отсчитывать от момента создания метода воспроизведения пространственной конфигурации волновых полей, так как именно в конфигурации волнового поля собственно и содержится та информация о структуре объекта, благодаря которой мы видим его изображение.

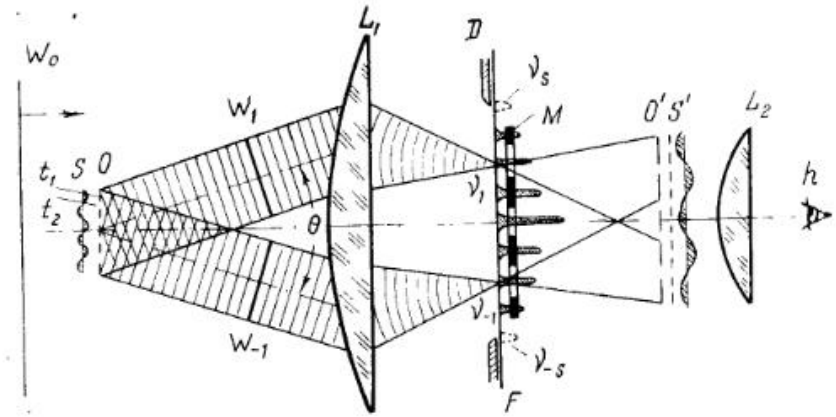

Рис. 16. К представлениям Э. Аббе о процессе формирования изображения в микроскопе. Плоская волна W_0 освещает объект *O*. Объектив микроскопа L_1 формирует изображение объекта *O*, которое наблюдатель *h* рассматривает через окуляр L_2. В соответствии с представлениями Аббе каждая гармоническая составляющая распределения поля света на объекте, например, гармоника *S*, создает в пространстве две плоские волны W_1 и W_{-1}. Объектив L_1 фокусирует эти волны в виде пар точек, например ν_1 и ν_{-1}, в фокальной плоскости *F*. Точки, соответствующие всем гармоникам разложения объекта, образуют в плоскости *F* светящуюся модель пространственного спектра объекта. Далее излучение каждой пары точек, соответствующих одной гармонике объекта, например, точек ν_1 и ν_{-1}, интерферируя, снова создает пространственную гармонику распределения интенсивности *S'*. Суммируясь, вторичные гармоники воссоздают изображение объекта *O*

У истока исследований, которые привели к решению этой задачи, стоит работа немецкого физика-оптика Эрнста Аббе «О возникновении изображения в микроскопе», где была впервые установлена количественная связь между структурой объекта и пространственной структурой волнового поля рассеянного им излучения (6).

Математической основой представлений Аббе явился уже упомянутый аппарат преобразования Фурье, с помощью которого сложное пространственное распределение света на поверхности объекта представляется в виде суммы пространственных гармонических составляющих. Аббе показал, что процесс формирования изображения в обычном микроскопе можно представить как двойное преобразование Фурье: на первом этапе в результате интерференции излучения, исходящего из различных точек объекта, в задней фокальной плоскости объектива микроскопа возникает модель пространственного спектра объекта. На втором этапе в результате интерференции света, исходящего из различных точек фокальной плоскости, осуществляется еще одно преобразование Фурье. Два последовательных преобразования Фурье приводят к восстановлению первичной функции, т. е. к появлению изображения объекта.

Общая схема наблюдения через микроскоп, применительно к которой проводились эти рассуждения, приведена на рис. 16. С точки зрения представлений геометрической оптики происходящие при этом процессы можно описать следующим образом. Волна освещающего объект излучения W_0 модулируется по амплитуде объектом O. Объектив микроскопа L_1 проецирует картину распределения света на объекте в некоторую промежуточную плоскость, где образуется изображение объекта O, увеличенное в соответствии с законами формирования изображения с помощью линзы. Наблюдатель E рассматривает это изображение через окуляр L_2, как через лупу.

С точки зрения представлений Аббе этот же процесс выглядит следующим образом. Волна падающего излучения W_0 модулируется по амплитуде объектом O. Промодулированную таким образом картину распределения поля на поверхности объекта можно представить в виде разложения на пространственные гармоники. В соответствии с принципом Гюйгенса каждая точка такой пространственной поверхностной гармоники может рассматриваться как вторичный источник излучения. Оказывается, что излучение всех точек пространственной гармоники, суммируясь, образует в пространстве две плоских волны, например, гармоника S создает волны W_1 и W_{-1}.

Объектив микроскопа L_1 фокусирует плоские волны в виде пар точек в фокальной плоскости F (например, волны W_1 и W_{-1} фокусируются в точки ν_1 и ν_{-1}). Сумма светящихся точек всех пространственных гармоник образует светящуюся модель пространственного спектра объекта. (График распределения интенсивности света в таком спектре совмещен с фокальной плоскостью F). Каждую из симметричных пар точек такого спектра, соответствующую какой-либо из пространственных гармоник объекта (например, пару точек ν_1 и ν_{-1}) можно рассматривать как два когерентных источника излучения, в результате интерференции которых в плоскости изображения снова возникает гармоническое распределение интенсивности (этот процесс был рассмотрен подробно на рис. 10, *б*). В частности, например, сферические волны, испускаемые точками ν_1 и ν_{-1}, интерферируя, образуют гармонику S'. Таким образом, каждой пространственной гармонике разложения поля объекта соответствует пространственная гармоника в плоскости изображений. Суммируясь, такие вторичные гармоники снова образуют прежнее распределение поля, т. е. изображение объекта O.

Теория Аббе была построена с целью объяснить механизм принципиального ограничения разрешающей способности микроскопа. С точки зрения этой теории существование такого ограничения объясняется тем, что гармоники с очень малым пространственным периодом создают в поле рассеянного объектом излучения плоские волны, которые распространяются под такими большими углами, что их излучение не попадает на объектив микроскопа (например, волны, создающие точки ν_s и ν_{-s}, гасятся апертурной диафрагмой микроскопа D).

Для доказательства справедливости своей теории Аббе поставил следующий эксперимент. В качестве объекта была выбрана периодическая система щелей t_1, t_2... В фокальной плоскости объектива микроскопа, как и следовало из теории, сформировалась светящаяся модель пространственного спектра такого объекта — система дискретных пиков, разделенных равными интервалами. Перекрыв с помощью маски M нечетные порядки такого спектра, Аббе синтезировал новый пространственный спектр, который соответствовал другой функции распределения поля в зависимости от координат, а именно, распределению поля в решетке с удвоенным числом штрихов на миллиметр. В полном соответствии с теорией изображение такой несуществующей решетки появилось на месте прежнего изображения. Эксперимент Аббе произвел большое впечатление как на современников, так и на после-

дующие поколения оптиков и окончательно убедил тех, кто сомневался в справедливости этой теории.

Нетрудно заметить, однако, что проведенный Аббе эксперимент был гораздо шире первоначальной теории и сводился не столько к проверке разрешающей способности микроскопа, сколько к проверке возможности синтеза произвольного изображения посредством управления параметрами волнового поля. Впервые этот вывод из теории Аббе был отчетливо сформулирован немецким физиком Х. Боршем, который предложил полностью отказаться от использования каких-либо объективов и формировать изображения заданных объектов, воссоздавая в некоторой плоскости соответствующее им распределение волнового поля [7]. Модулируя поле плоской волны маской, в которой была просверлена заранее рассчитанная система отверстий, и вводя фазовые сдвиги в излучение с помощью тонких слюдяных пластинок, Х. Борш осуществил синтез изображений решеток некоторых кристаллов. В дальнейшем эта методика была усовершенствована в Англии У. Брэггом, который предложил получать такие маски фотографическим путем [8]. Однако методы Х. Борша и У. Брэгга можно было использовать только для синтеза изображений простейших объектов: обычно это были кристаллы с определенной симметрией. Усложнение объекта вело к необходимости расчета и воссоздания чрезвычайно сложной картины распределения амплитуд и фаз, что было невозможно осуществить имеющимися в то время методами.* Основной результат этих работ заключался в том, что они явились основой, на которой был разработан голограммный метод Габора.

* С появлением электронных вычислительных машин появилась возможность снова возвратиться к этой технике — сейчас она развивается под названием «киноформ».

ГЛАВА III

ОТОБРАЖЕНИЕ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ И ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ ГОЛОГРАММЫ

Логично предположить, что вся материя обладает свойством по существу родственным с ощущением, свойством отражения.
В. И. Ленин, Полное собрание сочинений, т. 18, с. 91.

ВВЕДЕНИЕ

Переходя от фундаментальных явлений непосредственно к голографии, необходимо прежде всего подчеркнуть, что голография не относится к разряду технических достижений, т. е. не является некоторой сложной искусственной комбинацией известных законов природы, рассчитанной на получение заранее заданного положительного эффекта. По существу история разработки голограммного метода — это история последовательного открытия различных сторон некоторого единого объективно существующего явления реального мира. Это явление, обнаруживающее удивительную способность волновых полей отображать с недостижимой ранее степенью объективности материальные предметы, по своей научной значимости ничуть не менее важно, чем, например, явление интерференции световых волн. Несмотря на то, что это явление лежит в основе голографии и всех ее приложений, определенного названия оно до сих пор не получило, отчасти как в силу молодости самой голографии, так и вследствие несколько излишнего практицизма, когда сильный интерес к следствиям идет в ущерб интересу к первопричине. Оставляя вопросы терминологии временно в стороне, перейдем к рассмотрению сущности этого явления.

§ 1. Отображающие свойства двумерного сечения картины стоячих волн

История появления голограммного метода в общих чертах сводится к следующему: работая над усовершенствованием электронного микроскопа, английский физик Деннис Габор столкнулся с необходимостью улучшить качество изображения, которое сильно искажалось так называемой сферической аберрацией электронных линз. На первый взгляд эта трудность не кажется значительной: известно, что сферическая аберрация обычных линз исправляется достаточно просто. Однако в электронной оптике действуют несколько иные законы, и сферическую аберрацию в этом случае невозможно исправить по принципиальным соображениям. На этот счет была даже доказана соответствующая теорема.

Для того, чтобы преодолеть эту трудность, Д. Габор предложил построить точную модель поля электронных волн в оптическом диапазоне спектра, а затем исправить у этой модели сферическую аберрацию методами обычной световой оптики. Именно для решения такой, в общем весьма частной, однако вместе с тем очень характерной задачи и была предложена в 1948 году голография (9, 10, 11).

Термин «голограмма» ввел Габор. «Холос» по-гречески означает целый, весь; «грамма» — запись. Голограмма — «всесторонняя запись». Под этим термином можно понимать как всестороннюю запись волновых полей, так и всестороннюю запись сведений об объектах. Оба эти толкования правильны: голограмма точно восстанавливает волновые поля; и с ними появляются удивительные по своей детальности изображения объектов. Термин «голография» был введен значительно позднее американским исследователем Д. Строуком.

Ход мысли Габора был весьма прост: если наложить сложное, в общем случае неизвестное, волновое поле излучения, рассеянного некоторым объектом O, и излучение простой, заранее известной волны, испускаемой точечным источником S (эту волну называют референтной), то образуется интерференционная картина, аналогичная той, которая возникала в опыте Юнга (рис. 17, *а*). Отличие будет заключаться только в том, что рисунок картины интерференции будет значительно более сложным. Однако общий смысл такой картины сохранится — светлые полосы будут соответствовать местам, где фазы объектной и референтной волн одинаковы, темные — местам, где эти фазы отличаются. Предположим, что такая интерференционная картина зарегистрирована на фотопластинке F и проявлена с обращением таким образом, что в местах, где располагались светлые полосы, пластинка ста-

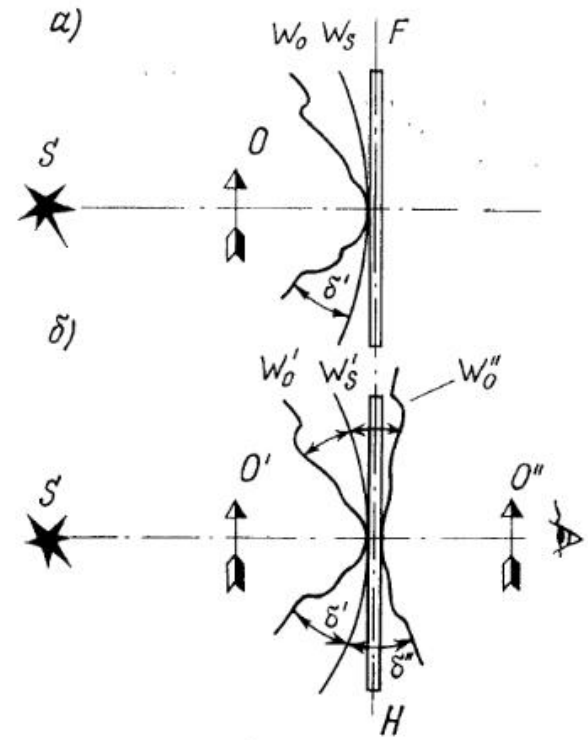

Рис. 18. Схема записи и реконструкции голограмм по методу Габора. При записи (рис. *а*) на фотопластинке регистрируется физическая тень объекта — результат интерференции волны W_0 излучения, рассеянного объектом S, и волны W_S, непосредственно распространяющейся от источника излучения. При реконструкции на голограмму H направляется излучение того же монохроматического источника S, который использовался при съемке. Голограмма H восстанавливает волновой фронт записанного на ней излучения и с ним истинное изображение объекта O'. Однако, кроме этого, восстанавливается некоторая дополнительная волна W_0'' и с нею ложное изображение O''. Волну W_0'' и изображение O'' можно получить, отобразив W_0' и O в сферическом фронте волны источника W_S, как в зеркале. Истинное и ложное изображение, а также наблюдатель h располагаются в этом случае на одной прямой, в результате чего возникает взаимная интерференция, искажающая оба изображения

нет прозрачной, а там, где были темные полосы — почернеет и станет непрозрачной. Перейдем к так называемому процессу реконструкции (рис. 17, *b*). Если на полученную по рассмотренному способу фотопластинку-голограмму направить излучение одной только референтной волны S, то поскольку голограмма прозрачна только в тех местах, где фазы объектной и референтной волн одинаковы, она пропустит только те участки референтной волны, которые совпадают по фазе с волной объекта. Участки же референтной волны, которые отличаются по фазе от излучения объекта, будут поглощены голограммой. Исключая таким способом из референтной волны все ненужное, голограмма воспроизводит приблизительно на половине своей площади распределение фаз, совпадающее с распределением фаз излучения, рассеянного объектом. На остальной части поверхности голограммы, там, где референтная волна поглощается, значения поля будут равны нулю. Поскольку почернение голограммы зависит от величины засветки, то оказывается, что, кроме фазы на поверхности голограммы восстанавливается также и амплитуда объектной волны. Воспроизведение поля на какой-то поверхности, т. е. в одном звене, в соответствии с принципом Гюйгенса влечет за собою воспроизведение поля во всех остальных звеньях, т. е. во всем трехмерном пространстве справа от голограммы (рис. 17, *b*). Наблюдатель h, который регистрирует такое восстановленное поле, увидит неотличимое от оригинала изображение O', расположенное на том же месте, где располагался при съемке объект.

Следует отметить, что схема, изображенная на рис. 17, была предложена значительно позднее работы Габора американскими исследователями Э. Лейтом и Ю. Упатниексом (12, 13, 14). Эта схема была приведена нами в связи с работой Габора только с целью наиболее отчетливо представить механизм действия референтной волны. В действительности же Габор использовал несколько иной, гораздо менее эффективный метод записи голограммы. В те времена отсутствовали достаточно монохроматические источники излучения, и поэтому единственной практически реализуемой схемой была схема с так называемым линейным расположением источника излучения, объекта и голограммы (рис. 18). При использовании такой схемы на фотопластинке F регистрировалась тень малого объекта O, которая возникала при освещении этого объекта точечным монохроматическим источником излучения S (рис. 18, *a*). На этом процесс получения голограммы и заканчивался. Однако в этом, на первый взгляд слишком простом, эксперименте есть одна существенная тонкость. Когда источник S очень мал и монохроматичен, обнаруживается,

что процесс образования тени не так прост, как мы его обычно представляем. Фактически, тень в этом случае является результатом интерференции излучения, рассеянного объектом (волна W_0) со своеобразной референтной волной — излучением источника S, попадающим на фотопластинку, минуя объект (волна W_s).[3] Получающаяся при этом картина похожа на какое-то кружево и только весьма отдаленно напоминает объект.

Процесс реконструкции голограммы Габора изображен на рис. 18, *b*. Проявленная и экспонированная голограмма H устанавливается на то же место, которое она занимала при съемке, и на нее направляется излучение точечного когерентного источника S. Падая на голограмму, это излучение, в соответствии со сказанным ранее, модулируется ее рисунком так, что за голограммой восстанавливается волна W_0' излучения, рассеянного объектом, и, соответственно, появляется изображение объекта O, неотличимое от оригинала.

Более детальное рассмотрение показало, что при реконструкции выявляется эффект, который первоначальная идея не предусматривала: кроме истинного изображения O, возникает также и ложное O'', которое располагается между наблюдателем h и истинным изображением. В результате наложения этих изображений оба они сильно искажаются.

Возникновение ложного изображения является прямым следствием принципиальной недостаточности метода воспроизведения фаз за счет исключения «ненужных» частей референтной волны. Причину этой недостаточности понять нетрудно: рассматривая явление интерференции (рис. 10), мы выяснили, что результат сложения волн зависит от пути, который эти волны проходят до встречи друг с другом. В данном случае эта зависимость также имеет место, и поэтому можно сказать, что рисунок голограммы, т. е. картина интерференции волн W_0 и W_0', целиком определяется расстояниями δ' между этими волнами (рис. 18, *b*). Нетрудно заметить, что можно построить волну W_0'', расстояния от которой до W_s будут точно такими же, как и расстояния от W_s до W_0' с тем единственным отличием, что эта новая волна будет опережать волну W_s, в то время как прежняя волна W_0' от нее отстает. Интерференционная картина, созданная волнами W_s и W_0'', будет отличаться от картины интерференции волн W_s и W_0' только распределением фаз, а поскольку фотопластинка фазу излучения не чувствует, то для нее обе интерференционные картины будут совершенно одинаковыми. Таким образом, оказывается, что рисунку голограммы соответ-

ность создания на этой основе изобразительной техники, воспроизводящей полную иллюзию действительности изображаемого объекта, была также известна ранее, в частности, эти возможности были упомянуты впервые в связи с разработкой метода голографии с записью в трехмерных средах (15—17). Однако Е. Н. Лейт и Ю. Упатниекс были первыми людьми, которые получили эти удивительные изображения, доказав на деле реальность их существования. На широкую общественность этот успех произвел очень сильное впечатление и явился как бы катализатором, который вызвал бурное развитие метода. Во всяком случае, если за 16 лет развития голографии с 1948 по 1964 год было опубликовано около тридцати работ, то после работы Е. Н. Лейта и Ю. Упатниекса количество публикаций сразу превысило тысячу за год.

§ 2. Отображающие свойства объемной картины стоячих волн (голография с записью в трехмерных средах)

В 1958 г. автор настоящей работы, проводя исследования в области создания изобразительной техники, воспроизводящей полную иллюзию действительности изображаемых объектов, также пришел к идее записи волнового поля за счет его смешения с референтной волной. Первоначально, исходя из требований принципа Гюйгенса, автор, так же как и Габор, собирался регистрировать двумерную интерференционную картину, чтобы воспроизводить ее с помощью значения поля на некоторой поверхности. Однако в отличие от метода Габора референтную волну предполагалось подавать навстречу объектной. Это обстоятельство и предопределило дальнейшее направление исследований.

На самом деле, как уже отмечалось ранее, картина интерференции излучения носит объемный характер, и это относится не только к случаю интерференции двух точечных источников, который был рассмотрен на рис. 9, но и к случаю, когда простая по форме референтная волна интерферирует со сложным волновым полем излучения, отраженного произвольным объектом. В общих чертах конфигурация возникающей при этом стоячей волны изображена на рис. 20. Как видно из рисунка, поверхности пучностей стоячей волны, обтекая объект, образуют структуру, напоминающую волны, которые возникают в воде вокруг движущегося корабля. В области между объектом и источником, где волна источника S распространяется навстречу волне, отраженной от объекта, картина стоячих волн сильно сжата и расстояние между поверхностями пучностей составляет порядка половины длины волны,

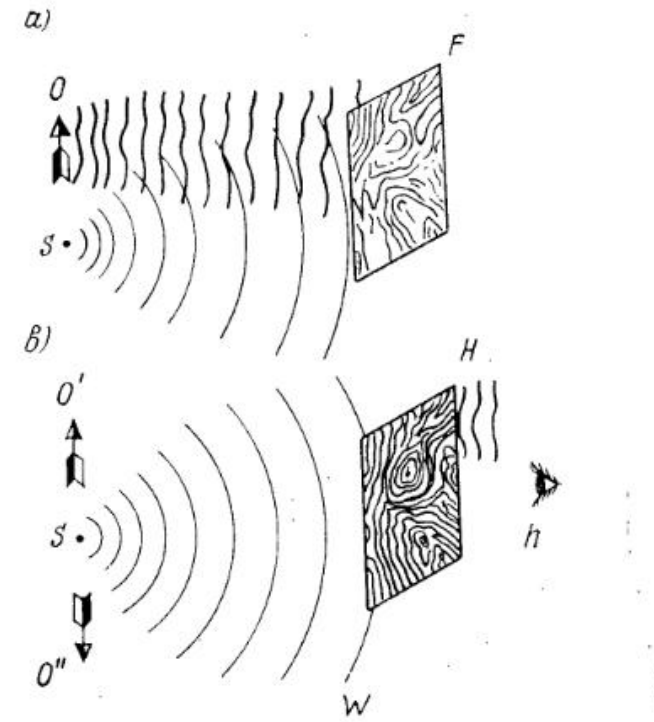

Рис. 17. Рассмотрение механизма записи и воспроизведения волнового поля объекта с помощью двумерной голограммы на примере схемы, предложенной Е. Н. Лейтом и Ю. Упатниексом. При записи (рис. *а*) на фотопластинке F регистрируется интерференционная картина, возникающая при наложении волны излучения, рассеянного объектом O, и референтной волны, испускаемой источником S; фотопластинка наиболее сильно засвечивается в тех местах, где фаза референтной волны совпадает с фазой излучения, рассеянного объектом. После проявления с обращением эти места становятся прозрачными. Там, где фазы объектной и референтной волн отличаются, фотопластинка почернеет. При реконструкции (рис. *б*) на голограмму H падает референтная волна того же источника S. В соответствии с условиями записи голограмма пропустит только те части этой волны, фаза которых совпадает с фазой излучения, рассеянного объектом. Таким образом на половине площади голограммы воспроизводится волновое поле объекта, и, следовательно, в соответствии с принципом Гюйгенса это поле восстановится во всем трехмерном пространстве справа от голограммы. Восстановленное поле образует изображение объекта O', неотличимое от оригинала

стрирующих средах был сделан американскими исследователями Е. Н. Лейтом и Ю. Упатниексом в 1962—64 годах (12, 13, 14). Сущность предложенного ими метода заключалась в следующем. Как уже отмечалось, метод Габора обладал тем недостатком, что истинное и ложное изображения объекта располагались на одной линии с наблюдателем. В результате одно из этих изображений было видно на фоне другого и оба изображения искажались взаимной интерференцией соответствующих им волновых полей. Исследуя возможности повышения качества изображения в голографических устройствах, предназначенных для визуализации изображения, создаваемого так называемым радиолокатором с боковым обзором, Е. Н. Лейт и Ю. Упатниекс предложили весьма простое и эффективное усовершенствование схемы Габора — они вывели фотопластинку из области тени объекта (положение F_1 на рис. 19) в боковую зону (положение F_2) (12). При этом было достигнуто одновременно два эффекта: во-первых, объект перестал затенять референтную волну, в результате чего появилась возможность регистрировать любые объекты, а не только те, у которых тень практически отсутствует, во-вторых, и это не менее важно, излучения истинного и ложного изображения перестали накладываться друг на друга и их взаимные искажения исчезли. Последнее нуждается в небольшом пояснении. Собственно говоря, оба изображения O' и O'' остались на прежних местах. Однако лучи, образующие эти изображения, как видно из рис. 19, пространственно разделились: лучи истинного изображения пошли по направлению от изображения O' через голограмму F_2 к наблюдателю h_1, лучи ложного изображения пошли от голограммы F_2 через изображение O'' к наблюдателю h_2. Наблюдатель при этом получил возможность, перемещаясь из точки h_1 в точку h_2, видеть изображения O' и O'' по отдельности.

Следует отметить, что первая из перечисленных работ Е. Н. Лейта и Ю. Упатниекса, как, собственно, и работа Д. Габора не вызвала какого-либо резонанса и осталась незамеченной, тем более что мысль о прямой зависимости эффективности всего процесса от степени эффективности разделения волновых полей содержалась непосредственно и в работе Д. Габора. Поворотным пунктом в истории голографии явилась работа этих авторов, опубликованная в 1964 году. В этой работе Е. Н. Лейт и Ю. Упатниекс, используя свой метод и новый чрезвычайно монохроматичный источник излучения — лазер, получили объемное изображение произвольного объекта — шахматной доски с расположенными на ней фигурками. Вообще говоря, возможность получения голографических изображений, неотличимых от оригинала, а также возмож

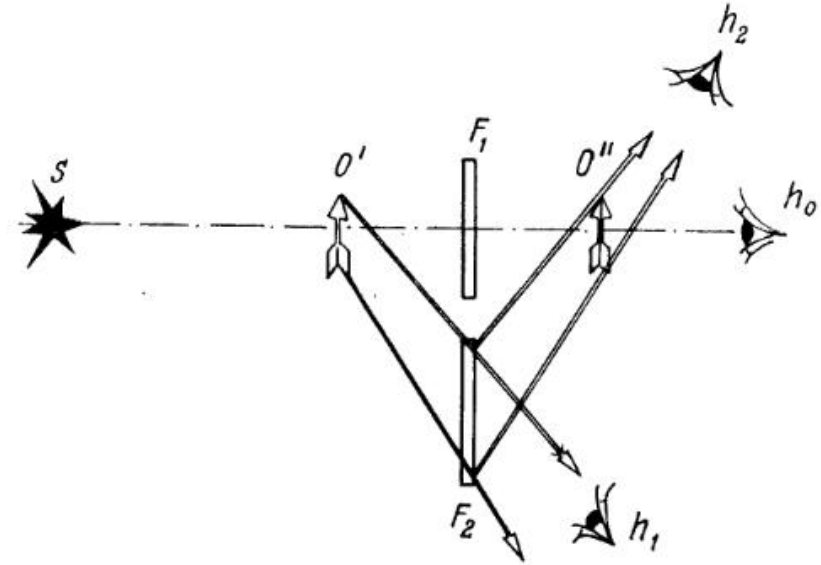

Рис. 19. К усовершенствованию, внесенному Е. Н. Лейтом и Ю. Упатниексом в метод Д. Габора. В методе Д. Габора голограмма располагалась в положении F_1 и наблюдатель h_0 видел одновременно два изображения — истинное O' и ложное O'', одно на фоне другого. Е. Н. Лейт и Ю. Упатниекс вынесли голограмму в боковую зону, в положение F_2. Истинное и ложное изображения остались на прежних местах, однако образующие их лучи разделились: лучи истинного изображения пошли по направлению $O'F_2$, и это изображение стало возможно наблюдать только из положения h_1. Лучи ложного изображения пошли по направлению F_2O'', и это изображение стало возможно наблюдать только из положения h_2. Таким образом были исключены искажения, обусловленные взаимной интерференцией истинного и ложного изображений

ствует два возможных значения волнового поля. Естественно, голограмма не может «выбрать» правильное значение и восстанавливает оба поля одновременно.

Из рис. 18, *b* следует также и метод построения ложного изображения: нетрудно заметить, что волновой фронт W является зеркальным отражением фронта W_0' в сферическом волновом фронте референтной волны W_s. Естественно, что все элементы полей, которые образуют волны W_0' и W_0'', в том числе и изображения O' и O'', также будут связаны упомянутым зеркальным преобразованием. Отсюда следует: чтобы построить ложное изображение O'', необходимо изобразить предмет O в сферическом волновом фронте W_s как в зеркале (11). Аналогично можно построить ложное изображение также и для случая, изображенного на рис. 17.

Кроме неоднозначности воспроизведения волнового поля и связанного с этим эффекта появления ложного изображения, метод Габора имел и другие недостатки. В частности, по такому методу можно было регистрировать только прозрачные объекты типа тонких линий, которые практически не дают тени: в области тени референтная волна отсутствует, и голограмма там, естественно, не записывается. Далее, как это видно на рис. 18, *a* по методу Габора на голограмме регистрируется волновое поле объекта, освещаемого, как говорят фотографы, по методу «контр жур», т. е. против света. Поскольку голограмма воспроизводит только то, что на ней было записано, то восстановленное изображение имеет в этом случае вид темного силуэта, наблюдаемого на светлом фоне. На эффективности метода неблагоприятно сказывалось также и то, что истинное и ложное изображение были сильно искажены в результате взаимной интерференции, а также вследствие некоторых других процессов.

Все эти недостатки сильно ограничивали область применения метода, и поэтому в течение десятилетия он развивался, главным образом, в приложении к некоторым задачам электронной и рентгеновской микроскопии. О возможности получения объемных оптических изображений естественных объектов в то время даже не упоминалось. И все же, несмотря на все недостатки и ограничения этого метода, именно Габор признан основателем голографии. И это, безусловно, правильно: основной отличительной чертой голограммного метода является использование референтной волны, а Габор был первым человеком, который записал волновое поле с ее помощью.

Следующий существенный шаг в развитии голографии с записью интерференционной картины на двумерных реги-

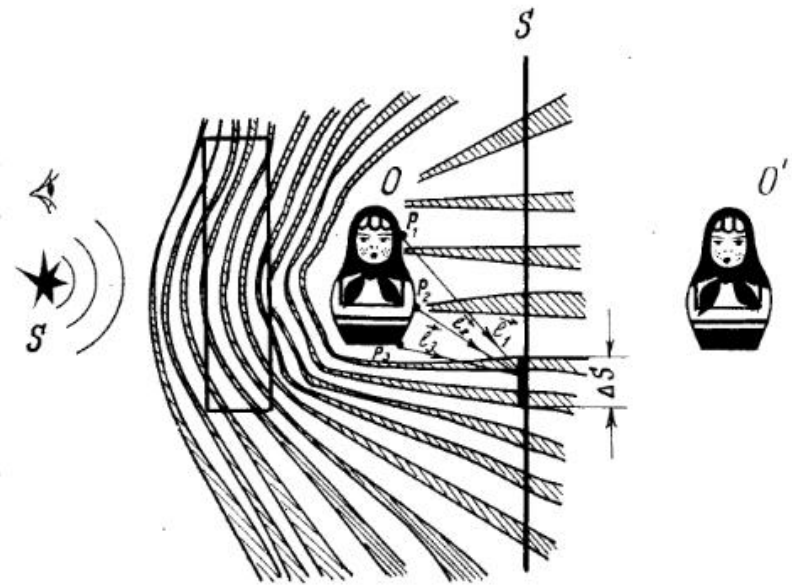

Рис. 22. Вывод частных случаев голографии на основе явления отображения объекта объемной картиной стоячих волн. Первичное явление, на котором основаны все методы голографии, можно определить, как свойство материальной модели безграничной объемной картины стоячих волн, окружающих объект, на который падает излучение, воспроизводить волновое поле излучения рассеянного этим объектом. Такая картина обладает свойством делиться без ущерба для целостности восстановленного голограммой изображения. В частности, ограниченный объем этой картины воспроизводит пространственную конфигурацию волнового поля и его спектральный состав, вследствие этого восстанавливается единственное цветное пространственное изображение объекта O. Достаточно точная запись волнового поля содержится и в плоских сечениях картины стоячих волн, например в сечении S, однако такая запись все же существенно обеднена — она неоднозначна, о чем свидетельствует появление ложного изображения O', и, кроме того, не воспроизводит спектральный состав излучения

т. к. угол θ между направлениями распространения волн равен 180° (см. формулу (2)). В боковых зонах картина расширяется и расстояние между пучностями увеличивается. Регистрация голограммы со встречной волной предполагала, что фотопластинка F размещается между источником излучения S и объектом O, там, где расстояние между поверхностями пучностей минимально. Нетрудно понять, что для записи плоской интерференционной картины, т. е. для получения плоского сечения картины стоячих волн, необходимо, чтобы толщина эмульсионного слоя была значительно меньше расстояния между поверхностями пучностей. Поскольку в видимом свете при встречном ходе пучков расстояние между пучностями составляет порядка одной десятой микрона, то толщина эмульсионного слоя фотопластинки должна была быть порядка сотой доли микрона. Поиски такого фотоматериала к успеху не привели, задача казалась безнадежной.

Сейчас понятно, что все эти трудности можно было бы легко обойти за счет использования попутной референтной волны, так как в этом случае период картины стоячих волн можно сделать сколь угодно большим. Однако автор с работой Габора в то время не был знаком и о такой возможности не знал.

В конце концов возникло предположение, что и объемная картина несет в себе информацию о фазе и амплитуде волнового поля: казалось вполне естественным, что сведения об этих параметрах могут быть заключены в причудливых изгибах и изменениях интенсивности поверхностей стоячей волны.

Несколько вариантов теории и эксперимент подтвердили справедливость этого предположения. В результате выяснилось, что свойства двухмерного сечения картины стоячих волн являются лишь весьма слабым отблеском удивительного по своей полноте комплекса отображающих свойств, который проявляет трехмерная картина в целом. Процесс записи трехмерной голограммы изображен на рис. 21, *а*. На произвольный объект O падает излучение монохроматического источника S. Рассеянное объектом излучение, интерферируя с излучением, распространяющимся от источника света (волна W_s), образует стационарную картину стоячих волн (поверхности пучностей этих волн обозначены d_1, d_2, d_3). В поле стоячих волн располагается объем V, заполненный прозрачной светочувствительной эмульсией. После экспозиции и химической обработки в этом объеме образуется структура, плотность которой моделирует распределение света в стоячей волне.

Перейдем к реконструкции (рис. 21, *б*). Предположим, что полученная трехмерная модель стоячей волны освещается

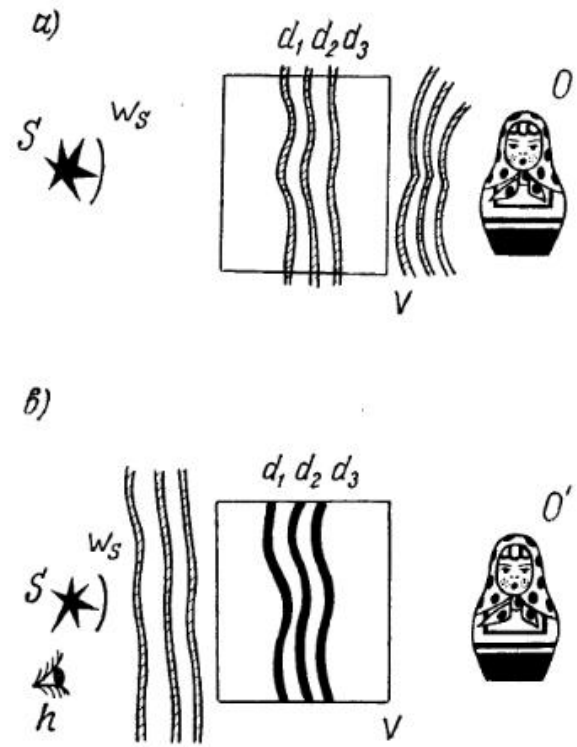

Рис. 21. Регистрация и реконструкция трехмерной голограммы. При регистрации (рис. *а*) излучение источника S падает на объект O, отраженное объектом излучение, складываясь с падающим излучением (волна W_s), образует стоячую волну — систему поверхностей пучности d_1, d_2, d_3, которые регистрируются в объемном светочувствительном материале V. После проявления на месте поверхностей пучностей высаживается металлическое серебро и образуются своеобразные металлические зеркала сложной формы. При реконструкции (рис. *б*) на голограмму падает излучение источника S со сплошным спектром. Отражаясь от поверхности каждого из металлических зеркал d_1, d_2, d_3, волна источника S трансформируется в волну излучения, отраженного от объекта, поскольку на поверхности пучностей фазы объектной и референтной волн совпадают, а различие направлений их распространения компенсируется после отражения референтной волны от данного металлического зеркала. Наблюдатель h, воспринимающий волновое поле излучения, отраженного трехмерной голограммой, видит единственное объемное цветное изображение объекта O'

До сих пор мы рассматривали голограмму как некоторое приспособление, с помощью которого можно воспроизводить волновые поля излучения, рассеянного объектом. Однако такое определение несколько неточно — оно значительно шире определяемого понятия. На самом деле, волновые поля можно воспроизводить не только при помощи голограммы, но и другими способами, например с помощью системы управляемых по фазе излучателей. Голограмма же выполняет операцию воспроизведения волновых полей совершенно определенным образом — за счет отражения излучения от материальной структуры. Исходя из такого механизма, голограмму можно скорее определить как оптический эквивалент объекта, т. е. как такую структуру, которая воздействует на данное излучение так же, как и объект. С этой точки зрения первоначальной причиной сходства голограммы с объектом является то, что материальная голограмма отображает какие-то характеристики материального объекта и, уже только как следствие этого, воспроизводятся волновые поля.

Из такого рода представлений следует, например, что голограмма такого объекта, как вогнутое зеркало, сама должна являться до какой-то степени зеркалом. Схема получения такой голограммы приведена на рис. 23, *а*. На объект — вогнутое зеркало Z направляется волна монохроматического излучения W. Отраженное зеркалом излучение, складываясь с падающим, образует в пространстве над зеркалом систему стоячих волн d_1, d_2, d_3..., которая впечатывается в эмульсионный слой фотопластинки *е*. Оказалось, что полученная таким образом голограмма действительно повторяет оптические свойства зеркала — оригинала (16). В частности, если на эту голограмму P направить излучение некоторого источника S, то она аналогично вогнутому зеркалу сфокусирует это излучение в изображение источника S' (рис. 23, *б*).

Более детальный анализ, проведенный на примере так называемых фазовых объектов, показал, что трехмерная голограмма действительно стремится скопировать структуру объекта (18). Этот процесс становится очевидным только в том случае, если объект и голограмму изобразить в так называемом частотном пространстве, т. е. в виде разложения Фурье на гармоники плотности. Однако наш глаз привык опознавать образы в обычном пространстве, и поэтому голограмма (именно она, а не восстановленное ею изображение) кажется нам совершенно непохожей на объект.

Тенденция голограммы копировать строение объекта является одним из самых неожиданных аспектов развития понятия «изображение». Оказывается, что голограмма — это своеобразная копия объекта и ее можно рассматривать как

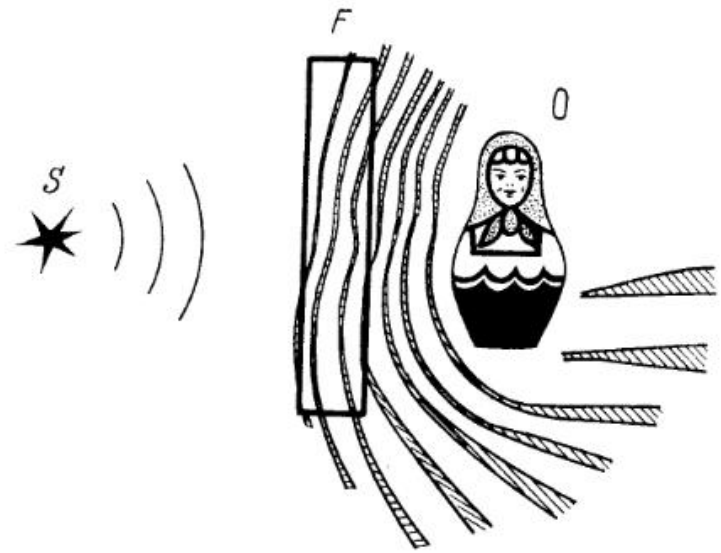

Рис. 20. Конфигурация пространственной стоячей волны, возникающей вокруг объекта O, на который падает излучение монохроматического источника S. В области между объектом и источником, где волна источника S распространяется навстречу волне, отраженной от объекта, картина стоячих волн сильно сжата и расстояние между пучностями (затушеванные области на рисунке) составляет около половины длины световой волны. В боковых зонах расстояние между пучностями увеличивается. Регистрация голограммы со встречной референтной волной эквивалентна тому, что фотопластинка F размещается между источником излучения S и объектом O — там, где расстояние между пучностями минимально. В этих условиях даже в очень тонком эмульсионном слое фотопластинки укладывается множество слоев картины стоячих волн и структура голограммы приобретает объемный характер

верхности пучностей, т. е. там, где ее фазы совпадают с фазами излучения, расссеянного объектом, тогда граничные условия этих волн на поверхности пучностей совпали бы полностью и в соответствии с принципом Гюйгенса референтная волна трансформировалась бы в волну излучения, рассеянного объектом.

Именно такую операцию, оказывается, и выполняет трехмерная голограмма. После химической обработки, в процессе которой в засвеченных местах эмульсии высаживается металлическое серебро, поверхности пучностей превращаются в своеобразные кривые зеркала. Во время реконструкции, когда излучение референтной волны взаимодействует с таким зеркалом, направление распространения излучения меняется на обратное. При этом, поскольку такая операция осуществляется именно в тех местах, где фазы объектной и референтной волны совпадают, излучение референтной волны начинает свое движение с той же фазой, с которой двигалась в этом месте волна излучения, рассеянного объектом.

Таким образом, уже каждая отдельная зафиксированная голограммой поверхность пучностей превращает референтную волну в волну излучения, рассеянного объектом. Что же касается всей системы следующих друг за другом зеркальных поверхностей в целом, то ее роль сводится к воспроизведению спектрального состава излучения совершенно аналогично тому, как это имеет место в методе цветной фотографии Липпмана, т. е. голограмма выбирает из сплошного спектра падающего на нее излучения и отражает излучение только тех монохроматических составляющих, которые были зарегистрированы на ней при экспозиции.

Обобщая рассмотрение случаев двумерной и трехмерной записи голограммы, можно сказать, что наиболее полный набор сведений о волновом поле объекта несет вся окружающая его безграничная объемная картина стоячих волн (рис. 22). С помощью фотографической модели этой картины можно восстановить практически все параметры волнового поля излучения, рассеянного объектом, — амплитуду, фазу, а также спектральный состав. Именно это свойство объемной картины стоячих волн и представляет собою первичное явление голографии, из которого, как частные случаи, следуют все остальные методы. Такая всеобщая связь методов голографии обусловлена замечательным свойством объемной картины стоячих волн делиться без ущерба для целостности восстановленного голограммой изображения. Оказывается, что полное изображение объекта несет не только вся объемная картина стоячих волн, но и ее отдельные фрагменты, в частности, ограниченная часть объема этой картины

(рис. 22) также позволяет восстановить пространственную конфигурацию поля и его спектральный состав. Уменьшение объема записи оказывается только в том, что точность воспроизведения параметров поля уменьшается. Более того, оказывается, что достаточно точная запись полей содержится не только в объемных элементах, но и в плоских сечениях картины стоячих волн (например, в сечении S на рис. 22). Однако плоская запись все же существенно обеднена — она неоднозначна, о чем свидетельствует появление ложного изображения, и, кроме того, такая запись не воспроизводит спектральный состав излучения, падавшего на голограмму при экспозиции. Свойство голограммы делиться без существенного ущерба для изображения можно продолжить и далее. Оказывается, что изображение всего объекта несет каждый из фрагментов плоского сечения картины стоячих волн (например, участок ΔS на рис. 22), т. е. можно разбить плоскую голограмму, однако через каждый ее кусок все равно будет видно целое изображение объекта. Такая, на первый взгляд несколько загадочная устойчивость к повреждениям, объясняется достаточно просто. Каждая точка объекта рассеивает излучение во всех направлениях. В результате при записи на каждый участок голограммы ΔS попадает излучение от всех точек объекта. Например, в случае, изображенном на рис. 22, лучи l_1, l_2, l_3 записывают на участке голограммы ΔS изображения точек объекта p_1, p_2, p_3. При реконструкции это излучение восстанавливается, и, соответственно, через каждый малый участок голограммы можно наблюдать изображение всего объекта.

Следует отметить, что объемная запись совсем не ограничивается случаем регистрации во встречных пучках и главенствующий характер такой записи это далеко не абстрактная теоретическая истина. В действительности именно двумерная запись является редким исключением, которое в чистом виде встречается на практике только при визуализации акустических полей и полей радиодиапазона. На самом деле с помощью формулы (2) нетрудно подсчитать, что для видимого света с длиной волны $\lambda = 0{,}5$ мкм при угле между референтной и объектной волнами $\theta = 30°$ пространственный период картины интерференции, записываемой на голограмме, составляет около 1 мкм, в то время как толщина эмульсионного слоя фотопластинки обычно составляет не менее 6 мкм. Такое соотношение между параметрами эмульсионного слоя и интерференционной картины, как правило, достаточно для того, чтобы полностью подавить ложное изображение, даже в том случае, когда при записи голограммы используется схема Э. Лейта и Ю. Упатниекса.

излучением источника S. Однако на этот раз источник не обязательно должен быть монохроматичным — при реконструкции трехмерных голограмм можно использовать обычный источник белого света. Картина, выявляющаяся при освещении трехмерной голограммы, поразительна: оказывается, в отраженном от такой голограммы излучении точно воспроизводятся практически все параметры волнового поля — амплитуда, фаза, а также спектральный состав. Наблюдателю, воспринимающему такую точную имитацию поля объекта, кажется, что за голограммой возникает единственное пространственное цветное изображение, ничем не отличающееся по внешнему виду от оригинала. Какие-либо ложные изображения, а также искажения в этом случае отсутствуют; объект может быть произвольным и не должен удовлетворять условию отсутствия тени. Изображение имеет обычный вид «на отражение», а не представляет собой темный силуэт, наблюдаемый на светлом фоне. Совсем новым качеством в данном случае является и то, что голограмма сама выбирает из излучения белого источника и отражает излучение только того спектрального состава, которое падало на нее при съемке, т. е., кроме всего прочего, трехмерная голограмма воспроизводит также и цвет.

Механизм действия трехмерной голограммы можно объяснить по крайней мере пятью способами. Наиболее простой из них аналогичен способу, использованному при рассмотрении двумерного случая и основан на том, что по самому смыслу понятия «интерференция» поверхности пучностей стоячих волн представляют собой те точки пространства, в которых фазы волновых полей излучения, отраженного от объекта, и излучения, падающего на объект, совпадают. На первый взгляд это утверждение ведет к абсурду. На самом деле, если значения объектной и референтной волн на какой-то поверхности совпадают, то из принципа Гюйгенса следует, что эти поля совпадают и в остальном пространстве. Вместе с тем совершенно очевидно, что поля объекта и источника излучения произвольны и практически совершенно не зависят друг от друга.

Более внимательное рассмотрение показывает, что никакого противоречия с принципом Гюйгенса в данном случае нет, так как совпадение граничных условий на поверхности пучностей все же несколько неполное: излучение, падающее на объект (референтная волна), и излучение, отраженное от этого объекта, пересекают поверхность пучностей во взаимно противоположных направлениях. Естественно возникает мысль, что если бы каким-то способом удалось повернуть направление распространения референтной волны в точках по-

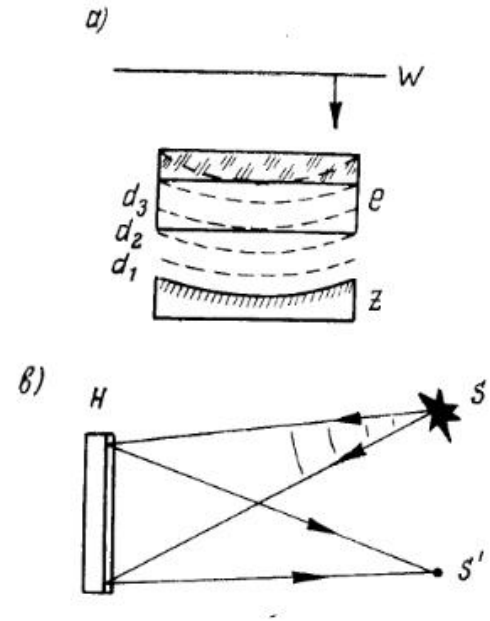

Рис. 23. К способности голограммы отображать оптические свойства объекта. Голограмму можно рассматривать не только как некое устройство, воспроизводящее волновые поля, но и как своеобразную копию объекта — его оптический эквивалент. В частности, голограмма вогнутого зеркала обладает способностью фокусировать излучение так же, как и зеркало-оригинал. На рис. *а* приведена схема получения такой голограммы: на вогнутое зеркало Z падает волна монохроматического излучения W. Отраженное зеркалом излучение, складываясь с падающим, образует в пространстве над зеркалом систему стоячих волн d_1, d_2, d_3, которая впечатывается в эмульсионный слой фотопластинки e. Если на полученную таким способом голограмму H направить излучение источника S, то она сфокусирует это излучение в изображение источника S' аналогично тому, как фокусирует излучение вогнутое зеркало-оригинал (рис. *б*). Исходя из таких представлений, первичное явление, которое лежит в основе голографии, можно определить как свойство возникающей вокруг объекта объемной картины стоячих волн копировать элементы структуры этого объекта

некое развитие техники скульптуры. Насколько далеко можно продлить аналогию голографии и скульптуры и удастся ли когда-либо получить таким методом двойник объекта, в настоящее время сказать трудно. Однако уже сейчас достаточно ясно, что современная наука пока что только коснулась удивительной «способности предметов отражаться друг в друге со всеми своими свойствами» (см. эпиграф) и что эта способность идет далеко в глубины строения материи.

Исходя из рассмотренных представлений, можно дать вторую, несколько иную формулировку первичного явления, лежащего в основе голографии, определив его как свойство возникающей вокруг объекта объемной картины стоячих волн копировать элементы структуры этого объекта.

Однако и такое весьма широкое определение все же недостаточно всеобъемлюще, чтобы вместить в свои рамки данное явление. Оказывается, что отображающими свойствами обладают не только стоячие, но и бегущие волны интенсивности (19). В частности, оказывается, что если длины волн участвующего в интерференции излучения (например, волн W_1 и W_2) отличаются, то возникающая при этом картина интерференции перемещается в пространстве с определенной скоростью. Если предположить, что на месте таких бегущих волн интенсивности образуется соответствующая перемещающаяся материальная структура, то нетрудно доказать, что такая структура точно преобразует одну из интерферирующих компонент (например, волну W_1) во вторую компоненту (волны W_2) с учетом отличия их длин волн. Это означает, что если, например, длина волны излучения W_1 была λ_1, а излучения $W_2 - \lambda_2$, то при отражении от модели бегущей волны интенсивности излучение волны W_1 изменится так, что длина волны отраженного излучения станет равной λ_2, т. е. длине волны второй интерферирующей компоненты W_2. Учитывая это обстоятельство, следует признать, что при рассмотрении основ голографии правильнее говорить об отображающих свойствах волн интенсивности, имея в виду как стоячие, так и бегущие волны. Однако случай бегущих волн относится скорее к области нелинейной оптики и фактически выходит за рамки голографии.

ГЛАВА IV

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ГОЛОГРАММЫ

ВВЕДЕНИЕ

Каждое из приложений голографии, как правило, основано на определенном свойстве голограммы, открывающем ту или иную возможность, недостижимую для методов классической оптики, например, возможность обращения волновых фронтов и т. п. Под термином «свойства голограммы» можно понимать, кроме того, и влияние, которое оказывают на голограмму параметры фотографического материала, записывающего и реконструирующего источников излучения, а также геометрия оптической схемы записи и реконструкции. Такие свойства представляют практический интерес не только тем, что они дают возможность правильно выбирать средства эксперимента, но и тем, что открывают новые возможности исследования самих фотоматериалов и источников излучения. Некоторые из этих свойств, такие как, например, способность голограммы делиться без ущерба для целостности восстановленного ею изображения, были рассмотрены нами ранее; остановимся кратко на других специфических свойствах голограммы, используемых в ее практических приложениях.

§ 1. Влияние свойств регистрирующей среды на голограмму

Если оценивать свойства голограммы с точки зрения того, насколько они обеспечивают реализацию метода, его жизнестойкость и универсальность, то следует признать, что наиболее фундаментальным свойством голографической записи является то, что конфигурация восстановленного голограм-

мой изображения фактически не зависит от характеристик использованного фотоматериала. Это удивительное свойство голограммы было обнаружено постепенно и в результате работ многих экспериментаторов. Во всяком случае, первоначально Габор развил теорию голограммы только для случая так называемой амплитудной записи, когда интерференционная картина записывается на фотопластинке в виде изменений коэффициента светопропускания. При этом основное требование теории к фотоматериалу, на котором записывается голограмма, заключалось в том, что коэффициент контрастности характеристической кривой γ должен быть отрицательным (т. е. голограмма должна быть позитивом) и в точности равен одной второй.

Можно с уверенностью сказать, что, если бы голограммный метод давал результаты только при $\gamma = -\frac{1}{2}$, то в настоящее время голография пополняла бы обширный архив малоизвестных экзотических методов фотографии. Однако уже сам Габор записывал свои голограммы в виде негативов, существенно нарушая требования разработанной им теории.

Дальнейшие исследования показали, что изображение объекта восстанавливается и в том случае, когда запись носит чисто фазовый характер, т. е. когда голограмма прозрачна и воздействует только на амплитуду падающего на нее излучения. При этом изменение фазы может равным образом обусловливаться как изменением коэффициента преломления фотоматериала, так и изменением его рельефа (20).

Плоские и объемные голограммы могут быть также отражающими. В этом случае запись может осуществляться как посредством модуляции коэффициента отражения, так и посредством изменения рельефа отражающей поверхности (15, 21). Более того, голограмму, оказывается, можно писать и за счет изменения поляризующих свойств среды (22).

Во всех перечисленных случаях единственным следствием изменения свойств фотоматериала является возникновение так называемых ложных изображений и появление дополнительного рассеянного света. Восстановленное голограммой изображение объекта своей конфигурации при этом не изменяет. В общем можно сказать, что по отношению к среде, на которой осуществляется запись, голограмма ведет себя до известной степени аналогично обычному двумерному изображению. Как известно, обычную двумерную картину можно написать маслом, выгравировать на камне, нарисовать карандашом, однако смысл картины от этого не изменится, и человек во всех случаях распознает изображенные на этой картине предметы (рис. 24). Голограмму также можно за-

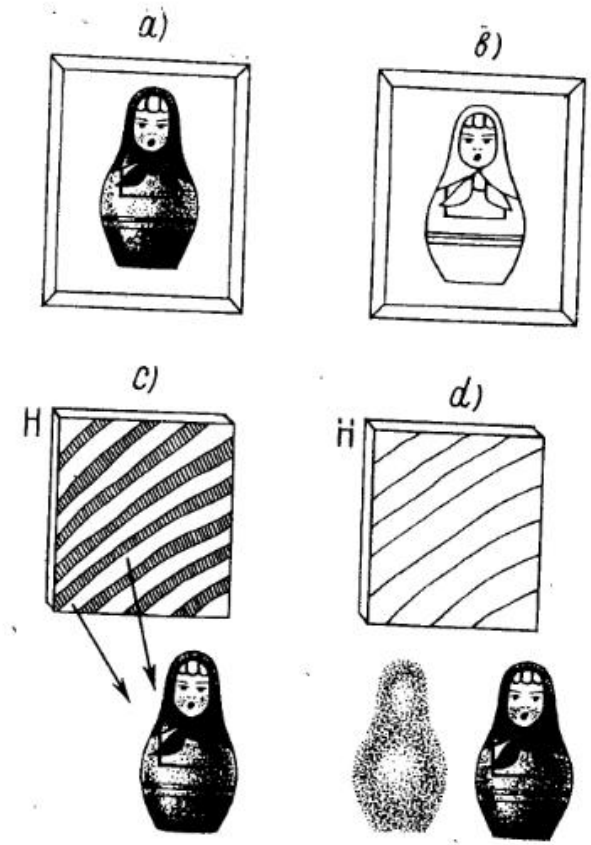

Рис. 24. К зависимости конфигурации восстановленного голограммой изображения от типа фотоматериала. По отношению к среде, на которой осуществляется запись интерференционной картины, голограмма ведет себя до известной степени аналогично обычному двумерному изображению: на обычной картине человек распознает предметы вне зависимости от того, написана ли картина маслом в полутонах (рис. *а*), нарисована ли она штрихами карандашом (рис. *b*) или выгравирована на металле. Голограмма восстанавливает одно и то же изображение предмета как в случае, когда запись представляет собою транспарант, правильно передающий распределение амплитуд интерференционной картины (рис. *c*), так и в случае, когда соотношение тонов амплитудной картины сильно искажено (рис. *d*). То же самое изображение восстанавливается и в случае, когда голограмма прозрачна и запись носит фазовый характер. Единственным следствием отклонения от условий линейности записи является появление дополнительных изображений и рассеянного света (рис. *d*)

писывать самыми различными способами, от фотоматериала требуется только, чтобы изменение его оптических свойств было однозначно связано со значением интенсивности поля, воздействовавшего на голограмму при экспозиции. Однако такое требование настолько обще, что его обеспечивает практически любая однородная светочувствительная среда.

В общих чертах причину сохранения конфигурации восстановленного голограммой изображения при изменении свойств регистрирующего фотоматериала можно объяснить следующим образом. Структуру голограммы с некоторым приближением можно представить в виде решетки, составленной из криволинейных штрихов, характеризующихся переменным шагом d, и считать, что восстановленное голограммой изображение O формируется из лучей L_1, претерпевших дифракцию первого порядка на структуре этой решетки (рис. 25, a). Однако форма волнового фронта излучения, дифрагировавшего на решетке, определяется только разностью хода лучей, принадлежащих различным штрихам, т. е. зависит только от шага штрихов и формы их образующей, структура самого штриха влияния на форму волны не оказывает. Наиболее наглядно этот процесс можно представить на примере плоской решетки с постоянным шагом d (рис. 25, b). Углы распространения излучения различных порядков, дифрагировавшего на такой решетке, зависят от шага решетки и длины волны излучения, профиль штриха влияет только на соотношение интенсивности излучения различных порядков. Совершенно аналогичный процесс имеет место и на голограмме: изменение свойств фотоматериала влечет за собой изменение профиля штрихов периодической структуры, возникшей в результате регистрации картины интерференции объектной и референтной волн. Пространственный период повторения штрихов и форма линии, идущей вдоль штриха, при этом не изменяются. Соответственно остается неизменной и конфигурация восстановленного голограммой изображения.

Назвать конкретную область приложений, в которой используется свойство голограммы сохранять объективность записи независимо от свойств фотоматериала, весьма затруднительно, фактически это свойство лежит в основе всего раздела приложений, относящихся к науке и технике, где голограмма используется как своеобразный мерительный инструмент.

То, что тип фотоматериала, на котором осуществляется запись, незначительно влияет на конфигурацию восстановленного голограммой изображения, естественно, не означает, что свойства голограммы вообще не зависят от свойств фотоматериала. Характер отклика фотоматериала, т. е. присущий

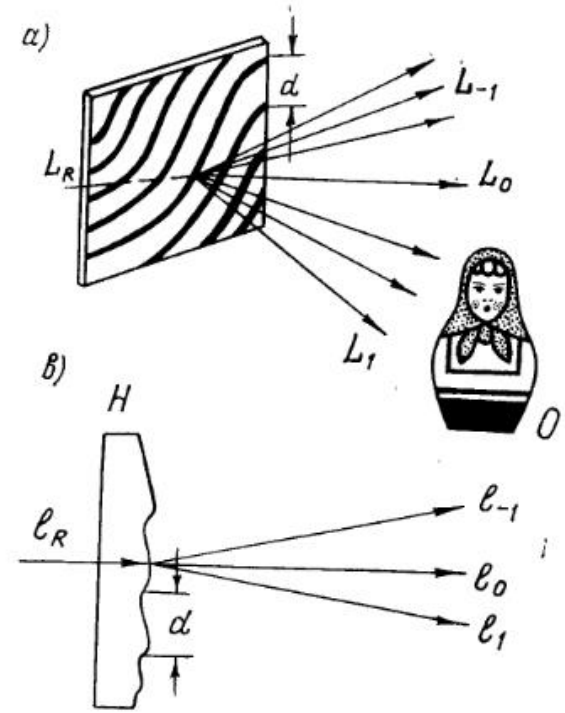

Рис. 25. К причинам сохранения конфигурации восстановленного изображения при изменении свойств фотоматериала, на котором записана голограмма. Восстановленное голограммой изображение O формируется из лучей L_1, претерпевших дифракцию первого порядка на решетчатой структуре голограммы. Форма волнового фронта излучения, дифрагировавшего на решетке, определяется только разностью хода лучей, принадлежащих различным штрихам, т. е. зависит только от шага штрихов и формы их образующей. Свойства фотоматериала определяют только структуру самого штриха, от которой зависит лишь распределение интенсивности света между порядками дифракции. Наиболее наглядно этот процесс можно представить на примере дифракционной решетки с постоянным шагом d (рис. b). Углы дифракции излучения на такой решетке определяются только шагом и длиной волны излучения, а распределение интенсивности между порядками l_1, l_0, l_{-1} — профилем штриха

ему способ модуляции излучения, в большой степени определяет яркость восстановленного изображения и наличие постороннего рассеянного излучения, искажающего распределение этой яркости. Параметры восстановленного изображения существенно зависят и от так называемой разрешающей способности фотоматериала.

Рассмотрим влияние разрешающей способности фотоматериала на голограмму несколько подробнее. Вообще говоря, под разрешающей способностью фотоматериала подразумевается его способность правильно передавать мелкие детали распределения интенсивности светового поля. Разрешающая способность обычно выражается в линиях на миллиметр и определяет максимальную пространственную частоту периодического (точнее гармонического) распределения интенсивности, которое может быть записано на фотоматериале. Однако отклик фотоматериала достаточно сложным образом зависит от пространственной частоты, и поэтому одно число принципиально не может охарактеризовать разрешающую способность. Кривая зависимости отклика фотоматериала от пространственной частоты безусловно является более полной характеристикой его разрешающей способности.

Однако и такая характеристика несколько неопределенна: отклик фотоматериала может выражаться в виде изменения глубины модуляции почернения (изменение контраста), изменения глубины фазового рельефа, изменения глубины модуляции показателя преломления и т. п. Влияние ограничения разрешающей способности фотоматериала на голограмму во всех этих случаях будет различным. В таких условиях единственно правильный способ учета разрешающей способности заключается в том, чтобы установить зависимость наиболее важных параметров решаемой задачи от пространственной частоты регистрируемого распределения интенсивности. В голографии стремятся к повышению яркости восстановленного изображения, поэтому одной из основных характеристик является дифракционная эффективность голограммы, под которой понимается отношение светового потока, идущего в полезное изображение, ко всему потоку излучения, падающего на голограмму.

Зависимость дифракционной эффективности голограммы от пространственной частоты регистрируемого поля интенсивности собственно и играет в голографии роль основной характеристики разрешающей способности фотоматериала. Примерный график такой зависимости приведен на рис. 26, *а*. Зная эту зависимость, нетрудно определить, какие изменения в реконструированное изображение вносит ограничение раз-

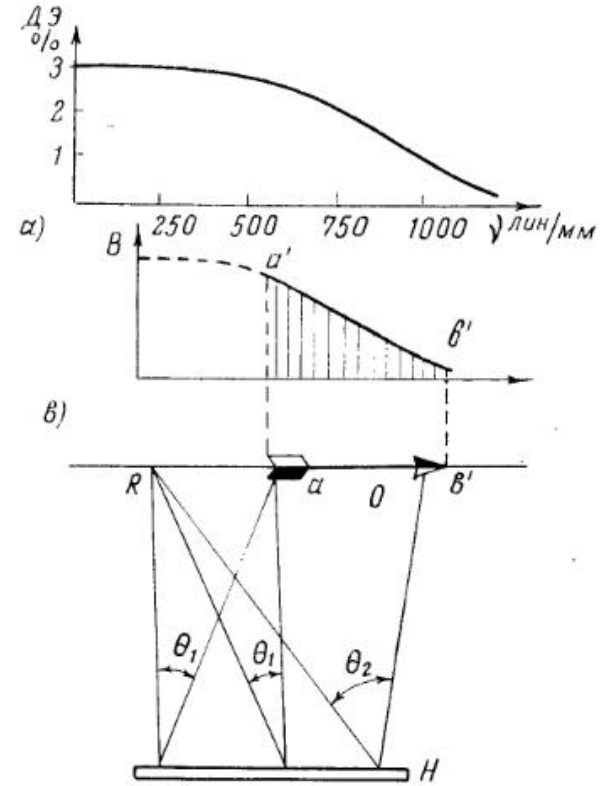

Рис. 26. К зависимости параметров восстановленного голограммой изображения от разрешающей способности фотографического материала на примере Фурье-голограммы. Излучение каждой точки объекта, например точек *a* и *b*, образует с излучением референтного источника *R* гармоники, пространственная частота которых приблизительно пропорциональна расстоянию от данной точки объекта до референтного источника *R*. Соответственно с этой зависимостью распределение яркости *B* изображения, реконструированного голограммой *H*, промодулировано кривой зависимости дифракционной эффективности от пространственной частоты, т. е. кривая модуляции *a'b'* повторяет в определенном масштабе график, приведенный на рис. *а*. Существенно, что ограничение разрешающей способности фотоматериала ведет в данном случае к ограничению поля зрения, в котором наблюдается изображение, и не влияет на разрешение этого изображения

решающей способности фотоматериала. Рассмотрим характер этих изменений на частном примере так называемых Фурье-голограмм. Остановимся сначала на некоторых особенностях этого вида голографии.

Термин Фурье-голограмма применяют обычно в том случае, когда при записи референтный источник R и объект O лежат в одной плоскости, параллельной поверхности голограммы H (рис. 26, b). Фурье-голограмма подобного типа характерна тем, что угол θ встречи излучения, испущенного данной точкой объекта (например, точкой a на рис. 26, b), с излучением референтного источника R приблизительно постоянен по всей площади голограммы. Поскольку пространственный период картины интерференции двух волн зависит только от угла встречи этих волн и длины волны излучения (см. формулу (2)), то очевидно, что в случае Фурье-голограммы каждой точке объекта соответствует гармоническое распределение интенсивности света из поверхности голограммы, характеризующееся определенным пространственным периодом. Точнее можно сказать, что распределение света на поверхности Фурье-голограммы связано Фурье-преобразованием с распределением света на поверхности объекта.

Предположим теперь, что Фурье-голограмма зарегистрирована на фотоматериале, характеризующемся определенной зависимостью дифракционной эффективности от пространственной частоты (рис. 26, a), и затем восстанавливается референтным источником R. Как уже выяснено, каждой точке объекта (например, точкам a и b на рис. 26, b) соответствует определенная пространственная частота записи на голограмме, следовательно, при реконструкции изображение каждой точки будет восстанавливаться с определенным, характерным для этой точки значением дифракционной эффективности. Определив это значение с помощью соответствующей зависимости (рис. 26, a), можно найти функцию распределения яркости в восстановленном изображении объекта. Если учесть, что в соответствии с формулой (2) значение пространственной частоты, соответствующей данной точке объекта, приблизительно пропорционально расстоянию этой точки от референтного источника R, то становится очевидным, что распределение яркости в восстановленном голограммой изображении промодулировано функцией зависимости дифракционной эффективности материала от частоты (см. верхнюю часть рис. 26, b). В общем ограничение разрешающей способности фотоматериала приводит к тому, что по мере удаления от референтного источника яркость восстановленного изображения уменьшается. Точкам объекта, находящимся на достаточно большом расстоянии от референтного источника, может соответствовать такое большое значение пространственной частоты, которое уже не воспроизводится фотоматериалом. В реконструированном изображении эти точки не воспроизведутся.

Важно отметить, что в отличие от случая обычной фотографии, где ограничение разрешающей способности фотоматериала приводит к ограничению в передаче мелких деталей изображения, в данном случае ограничение разрешения фотоматериала ведет к ограничению поля зрения, в котором видно изображение. На детальность изображения фотоматериал прямого влияния не оказывает.

§ 2. Влияние когерентных свойств записывающего источника излучения на голограмму

С точки зрения голографии наиболее важным свойством источника излучения является степень его когерентности. Когерентность можно определить как способность колебаний различных точек волнового поля к взаимной интерференции. Физическая основа ограничения условий существования явления интерференции заключается в том, что цуги волн излучения, испускаемого атомами, ограничены.

Условно когерентность можно разделить на временную (продольную) и пространственную (поперечную). Схема явлений, описываемых понятиями «временная и пространственная когерентность», приведена на рис. 27. Каждый атом источника S испускает излучение в течение какого-то определенного ограниченного времени. В результате в пространстве возникают цуги волн C_1, C_2, C_3, ограниченные по глубине расстоянием p, равным произведению скорости света на время излучения атома, а в поперечном направлении некоторым размером h, который зависит от размера источника f. Ограничение размера цуга в продольном направлении уменьшает степень временной когерентности источника, в поперечном — пространственной. В целом оба явления ухудшают условия интерференции испускаемого источником излучения.

Остановимся сначала на явлениях, связанных с временной когерентностью, т. е. с ограничением времени испускания цуга, которое обусловливает ограничение протяженности цуга по глубине. Вообще говоря, временная когерентность определяет стабильность колебаний в данной точке поля во времени, т. е. постоянство разности фаз, соответствующих началу и концу некоторого интервала времени Δt. Степень ста-

бильности этой разности фаз можно определить с помощью следующего эксперимента. В исследуемую точку поля помещается полупрозрачное зеркало Z_1, которое расщепляет излучение на две компоненты. Затем с помощью зеркал Z_1 и Z_3 обе компоненты снова сводятся в одной точке a, и в этой точке появляются условия для интерференции. Однако интерференционная картина возникает не во всех случаях. Действительно, если разность путей Z_1Z_2a и Z_1Z_3a не будет превышать длины цуга p, то в точке a встретятся расщепленные части одного и того же цуга C'_1 и C''_1, излучение интерферирующих волн будет согласовано по фазе, и в точке a возникнет устойчивая картина интерференции. (Распределение интенсивности в такой картине изображено на графике α). Если разность путей будет больше длины цуга p (например, в случае, когда зеркало Z_3 переносится в положение Z'_3), то расщепленные части цуга C'_1 и C''_1 прибудут в точку a в разное время. В таком случае излучение одного цуга будет интерферировать с излучением какого-то иного цуга. Так как фазы колебаний различных цугов не связаны, то в разное время в точке a возникают интерференционные картины, характеризующиеся различными сдвигами (кривые β и γ). Наблюдатель в этом случае в среднем регистрирует некоторое равномерное распределение интенсивности (график δ на рис. 27).

Таким образом, интерференция возникает только тогда, когда в одной точке встречаются компоненты одного и того же расщепленного цуга волн. Очевидно, что предельной разности хода, при которой еще возможна интерференция, соответствует случай встречи начала цуга одной из компонент с концом цуга другой. Нетрудно понять, что эта разность, называемая длиной когерентности, равна длине цуга p.

Перейдем к явлениям, связанным с пространственной когерентностью. Вообще говоря, пространственная когерентность определяет степень синхронности колебаний поля в разных точках пространства, т. е. постоянство разности фаз в двух каких-то точках. Степень стабильности этой разности можно определить с помощью следующего эксперимента. Из волнового поля с помощью отверстий в диафрагмах выделяется излучение в точках S_1 и S_2, расположенных перпендикулярно к направлению распространения луча. Если расстояние между отверстиями S_1 и S_2 меньше поперечных размеров цуга h, то в точку b, расположенную на равном расстоянии от S_1 и S_2, приходит излучение одного и того же цуга. В результате в точке B возникает устойчивая интерфе-

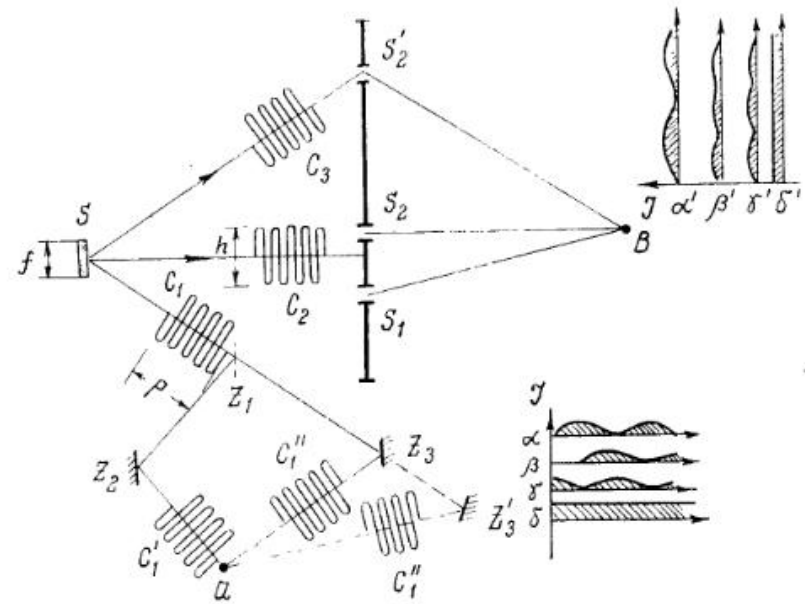

Рис. 27. К рассмотрению понятий «временная» (продольная) и «пространственная» (поперечная) когерентность. Атомы источника S испускают ограниченные во времени и пространстве цуги волн C_1, C_2, C_3. Степень временной когерентности излучения в точке Z_1 определяется способностью к взаимной интерференции компонент колебаний в этой точке при их взаимном смещении во времени. Если разность хода луча в плечах интерферометра Z_2 и Z_3 превышает длину цуга p, то интерференция в точке a не наблюдается. Пространственная когерентность определяет способность к взаимной интерференции излучения в точках поля, расположенных поперек луча. В частности, если отверстия S_1 и S_2 находятся на расстоянии, меньшем ширины цуга h, то и излучение, прошедшее через эти отверстия, образует в районе точки B устойчивую картину интерференции (график α'). При смещении отверстия S_2 в положение S'_2 расстояние между отверстиями превышает поперечные размеры цуга. Интерференция в этом случае отсутствует

бильности этой разности фаз можно определить с помощью следующего эксперимента. В исследуемую точку поля помещается полупрозрачное зеркало Z_1, которое расщепляет излучение на две компоненты. Затем с помощью зеркал Z_1 и Z_3 обе компоненты снова сводятся в одной точке a, и в этой точке появляются условия для интерференции. Однако интерференционная картина возникает не во всех случаях. Действительно, если разность путей Z_1Z_2a и Z_1Z_3a не будет превышать длины цуга p, то в точке a встретятся расщепленные части одного и того же цуга C'_1 и C''_1, излучение интерферирующих волн будет согласовано по фазе, и в точке a возникнет устойчивая картина интерференции. (Распределение интенсивности в такой картине изображено на графике α). Если разность путей будет больше длины цуга p (например, в случае, когда зеркало Z_3 переносится в положение Z'_3), то расщепленные части цуга C'_1 и C''_1 прибудут в точку a в разное время. В таком случае излучение одного цуга будет интерферировать с излучением какого-то иного цуга. Так как фазы колебаний различных цугов не связаны, то в разное время в точке a возникают интерференционные картины, характеризующиеся различными сдвигами (кривые β и γ). Наблюдатель в этом случае в среднем регистрирует некоторое равномерное распределение интенсивности (график δ на рис. 27).

Таким образом, интерференция возникает только тогда, когда в одной точке встречаются компоненты одного и того же расщепленного цуга волн. Очевидно, что предельной разности хода, при которой еще возможна интерференция, соответствует случай встречи начала цуга одной из компонент с концом цуга другой. Нетрудно понять, что эта разность, называемая длиной когерентности, равна длине цуга p.

Перейдем к явлениям, связанным с пространственной когерентностью. Вообще говоря, пространственная когерентность определяет степень синхронности колебаний поля в разных точках пространства, т. е. постоянство разности фаз в двух каких-то точках. Степень стабильности этой разности можно определить с помощью следующего эксперимента. Из волнового поля с помощью отверстий в диафрагмах выделяется излучение в точках S_1 и S_2, расположенных перпендикулярно к направлению распространения луча. Если расстояние между отверстиями S_1 и S_2 меньше поперечных размеров цуга h, то в точку b, расположенную на равном расстоянии от S_1 и S_2, приходит излучение одного и того же цуга. В результате в точке B возникает устойчивая интерфе-

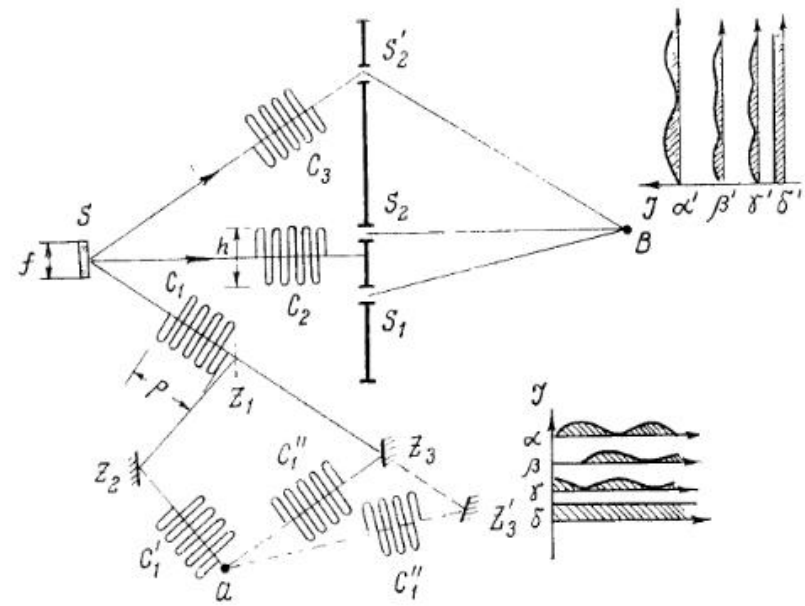

Рис. 27. К рассмотрению понятий «временная» (продольная) и «пространственная» (поперечная) когерентность. Атомы источника S испускают ограниченные во времени и пространстве цуги волн C_1, C_2, C_3. Степень временной когерентности излучения в точке Z_1 определяется способностью к взаимной интерференции компонент колебаний в этой точке при их взаимном смещении во времени. Если разность хода луча в плечах интерферометра Z_2 и Z_3 превышает длину цуга p, то интерференция в точке a не наблюдается. Пространственная когерентность определяет способность к взаимной интерференции излучения в точках поля, расположенных поперек луча. В частности, если отверстия S_1 и S_2 находятся на расстоянии, меньшем ширины цуга h, то и излучение, прошедшее через эти отверстия, образует в районе точки B устойчивую картину интерференции (график α′). При смещении отверстия S_2 в положение S'_2 расстояние между отверстиями превышает поперечные размеры цуга. Интерференция в этом случае отсутствует

ренционная картина (распределение α' на соответствующем графике).

Если отверстие S_2 смещается относительно отверстия S_1 в положение S_2' на величину, большую поперечных размеров цуга h, то в точке B интерферируют различные цуги, не связанные между собою по фазе. В результате интерференционная картина, возникающая в районе точки B, непрерывно изменяет свое положение. В течение какого-то времени эта картина находится в положении β', затем в положении γ' и т. д. Все изменения происходят хаотично с частотой смены цугов, т. е. очень часто, и поэтому наблюдатель регистрирует какое-то усредненное равномерное распределение интенсивности δ'.

Влияние когерентных свойств излучения на зарегистрированное голограммой изображение в общем случае выражается весьма сложным образом. Задача несколько упростится, если попытаться выделить эффекты, связанные с временной и пространственной когерентностью. Рассмотрим сначала влияние временной когерентности (23). Поскольку этому случаю соответствует ограничение цуга по глубине, то естественно ожидать, что временная когерентность скажется на изменении свойств зарегистрированного изображения в направлении луча, освещающего объект. Рассмотрим в этой связи процесс записи некоторого идеализированного объекта — диффузной плоскости D, на которую падает скользящий луч.

Общая схема эксперимента, выявляющего влияние временной когерентности записывающего излучения на голограмму, приведена на рис. 28. Луч когерентного источника $\vec{l}$ расщепляется полупрозрачным зеркалом Z_1 на две компоненты. Одна из компонент $\vec{l}_0$ направляется в виде скользящего пучка вдоль плоской поверхности диффузного рассеивающего экрана D, вторая компонета $\vec{l}_r$ используется в качестве референтного луча и с помощью зеркала Z_2 направляется на голограмму H. Луч $\vec{l}_0$, скользящий вдоль экрана, последовательно рассеивается на шероховатостях его структуры, и рассеянное всеми точками экрана излучение попадает на участок голограммы dH, где встречается с референтным лучом $\vec{l}_r$. Однако, как говорилось ранее, интерференция возможна только в том случае, когда разность хода интерферирующих лучей не превышает длины когерентности источника L. В частности, для того чтобы излучение, рассеянное какой-то точкой экрана b, образовывало картину интер-

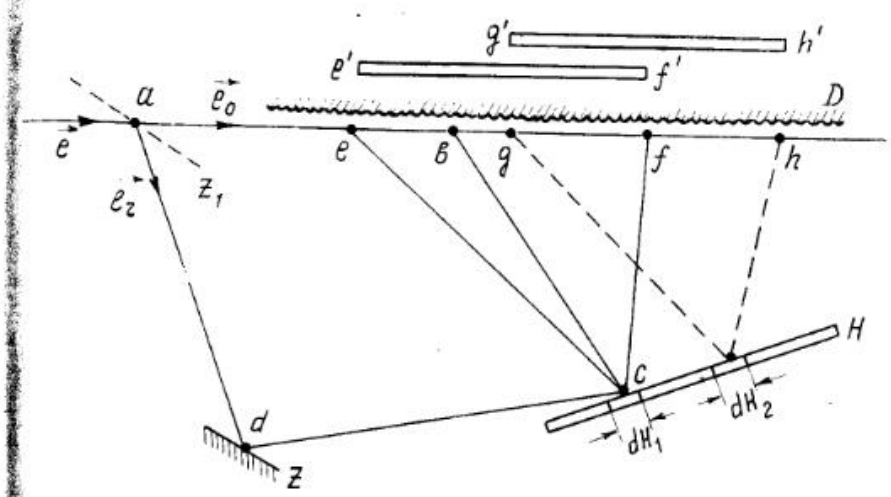

Рис. 28. Схема эксперимента по выявлению влияния временной когерентности источника излучения на записанную с его помощью голограмму. Луч $\vec{l}$ расщепляется полупрозрачным зеркалом Z_1 на две компоненты. Одна из компонент $\vec{l}_0$ направляется в виде скользящего пучка вдоль диффузного экрана D, вторая – $\vec{l}_r$ используется в качестве референтного луча и с помощью зеркала Z_2 направляется на участок голограммы dH_1. На голограмму попадает излучение, рассеянное всеми точками диффузного экрана D, однако образуют интерференционную картину и записываются в виде голограммы только точки в интервале ef, для которых разность хода объемного и референтного лучей не превышает длины когерентности записывающего излучения. В результате при реконструкции наблюдатель увидит светящуюся траекторию луча $e'f'$, длина которой находится в соответствии с длиной когерентности источника a излучения

ференции в точке c, необходимо, чтобы путь объектного луча abc отличался от пути референтного луча adc на величину, не большую длины когерентности L. Такому условию удовлетворят только точки экрана, находящиеся в пределах некоторого диапазона ef, определяемого тем, что путь aec меньше пути adc на величину L, а путь afc на ту же величину больше. Точки экрана, находящиеся вне этого диапазона, интерференционной картины не образуют и, следовательно, на голограмме не записываются. В результате наблюдатель, рассматривающий реконструированное голограммой изображение, увидит светящуюся траекторию луча $e'f'$, длина которой находится в соответствии с длиной когерентности источника излучения. Более подробное рассмотрение показывает, что когерентные свойства источника излучения отражаются не только на длине светящейся траектории; оказывается, что распределение яркости излучения вдоль траектории моделирует так называемую функцию временной когерентности источника.

В случае произвольного объекта влияние временной когерентности на восстановленное голограммой изображение заключается в том, что яркость этого изображения промодулирована по глубине функцией пространственной когерентности источника, с помощью которого осуществлялась запись голограммы. Если ограничиться более простыми рекомендациями и понятиями, то можно сказать, что при использовании источника с ограниченной временной когерентностью на голограмме записываются изображения объектов, находящихся в определенном интервале расстояний по глубине. Величина этого интервала определяется длиной когерентности использованного источника.

Рассмотрим кратко эффекты, связанные с наблюдением изображения светящейся трассы луча $\bar{l}_0$ через различные участки голограммы. Выделим на голограмме какой-то иной участок dH_2, длина хода референтного луча до которого больше, чем длина хода до участка dH_1. Условию того, что разность хода интерферирующих лучей не должна превышать длину когерентности, в этом случае будут удовлетворять точки, находящиеся в новом интервале gh, смещенном относительно прежнего интервала ef. Соответственно при реконструкции наблюдатель, рассматривающий изображение через участок голограммы dH_2, увидит, что светящаяся траектория переместилась из положения $e'f'$ в положение $g'h'$. В общем картина выглядит таким образом, как будто изображение отрезка светящейся трассы луча представляет собою фотографию цуга волн, снятого в процессе его полета. На голо-

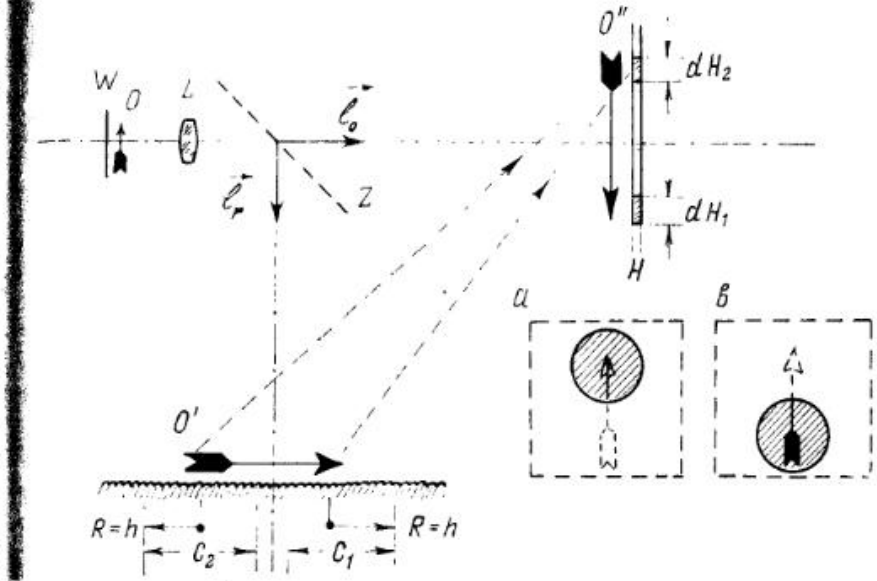

Рис. 29. Схема эксперимента по выявлению влияния пространственной когерентности источника излучения на записанную с его помощью голограмму. Излучение, соответствующее волне W, расщепляется полупрозрачным зеркалом Z на две компоненты — объектную $\bar{l}_0$ и референтную $\bar{l}_r$. Линза L, стоящая перед полупрозрачным зеркалом Z, изображает распределение поля O на диффузно рассеивающем экране D в виде изображения O' и на голограмме H в виде O''. На участке голограммы dH_1, соответствующем изображению острия стрелки O'', записываются только те точки экрана, которые пространственно когерентны по отношению к острию, т. е. находятся в пределах области пространственной когерентности C вокруг острия. В целом такую голограмму можно рассматривать как своеобразный портрет функции пространственной когерентности; через точку голограммы, соответствующую определенной точке волны W, можно наблюдать изображение всех тех точек волны W, которые когерентны по отношению к этой определенной точке

грамме зарегистрировано даже движение цуга; смещая глаз вдоль голограммы, можно наблюдать, как изображение цуга «течет» по лучу.

Схема эксперимента, выявляющего влияние пространственной когерентности источника излучения на записанную с его помощью голограмму, приведена на рис. 29 (24). Волна излучения источника W характеризуется некоторой картиной распределения пространственной когерентности. Эта картина условно обозначена стрелкой O. Излучение, соответствующее волне W, расщепляется полупрозрачным зеркалом Z на две компоненты: объектную и референтную. Линза L, стоящая перед полупрозрачным зеркалом Z, проецирует распределение поля O на диффузно-рассеивающий экран D в виде изображения O' и на голограмму H в виде O''. Рассмотрим условия записи голограммы на некотором участке ее площади dH_1, соответствующем острию изображения стрелки O''. На участок dH_1 попадает излучение, рассеянное всеми точками экрана. Однако если пространственная когерентность записывающего излучения ограничена, то интерференционную картину образует излучение, рассеянное только определенными областями экрана. Например, излучение точек экрана, соответствующих острию стрелки изображения O', будет обязательно интерферировать с референтным излучением, образующим на участке dH_1 изображение этого же острия, поскольку поле в данной точке когерентно по отношению к самому себе при любой ширине цуга. С референтным лучом будет интерферировать также излучение всех точек экрана, находящихся в зоне C_1, радиус которой R равен ширине цуга h. Точки поля, находящиеся за пределами зоны C_1, не будут когерентны по отношению к точке поля, соответствующей острию стрелки, и поэтому их излучение интерферировать с референтной волной на участке dH_1 не будет.

Таким образом, на голограмме запишется изображение только точек экрана, находящихся в зоне C_1. Наблюдатель, рассматривающий реконструированное такой голограммой изображение через участок dH_1, соответствующий острию стрелки, увидит на экране изображение только тех точек стрелки, которые когерентны по отношению к острию. На рис. 29, *а* часть экрана, в пределах которой яркость реконструированного изображения будет отлична от нуля, обозначена штриховкой.

Если рассмотреть аналогично условия записи на участке dH_2, соответствующем оперению стрелки, то окажется, что через этот участок наблюдатель зарегистрирует изображение в зоне экрана C_2, центр которой находится на оперении стрелки. В общем можно сказать, что зарегистрированная

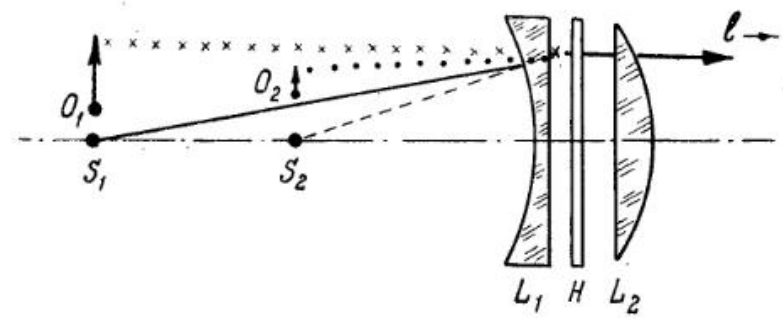

Рис. 30. К определению трансформаций восстановленного изображения, обусловленных смещением реконструирующего источника. Первоначально голограмма, реконструируемая источником S_2, восстанавливает изображение объекта O_2. Требуется определить вид и положение восстановленного изображения при смещении источника в точку S_1. Перед голограммой мысленно устанавливается отрицательная вспомогательная линза L_1, переводящая источник из точки S_1 в точку S_2, а за голограммой — положительная линза L_2 точно такой же силы, как L_1. Лучи источника S_1, пройдя линзу L_1, трансформируются в лучи, исходящие из S_2 (продление лучей к S_2 обозначено пунктиром). Непосредственно за голограммой H формируются лучи, исходящие из исходного изображения O_2 (продление лучей к O_2 обозначено точками). Положительная линза L_2 компенсирует действие отрицательной линзы, поэтому в конечном счете из системы выходят лучи, соответствующие искомому изображению O_1 (продление лучей к O_1 обозначено крестиками). Отсюда следует, что искомое изображение O' можно получать, отобразив объект O_2 через линзу L_2

таким образом голограмма представляет собой своеобразный портрет функции пространственной когерентности волны W. Через точку голограммы, соответствующую определенной точке волны W, можно наблюдать на экране D изображение всех тех точек волны W, которые когерентны по отношению к этой определенной точке.

Разумеется, при записи реальной голограммы влияние временной и пространственной когерентности на восстановленное голограммой изображение гораздо более сложно, чем в рассмотренных предельных случаях. В целом можно сказать, что ограничение степени временной и пространственной когерентности приводит к тому, что яркость восстановленного голограммой изображения модулируется как по глубине, так и в поперечном направлении. При этом перемещение точки наблюдения восстановленного изображения вызывает перемещение картины модуляции.

§ 3. Трансформационные свойства голограммы

Весьма важную роль в практических приложениях голографии играют так называемые трансформационные свойства голограммы, под которыми понимают способность восстановленного голограммой изображения изменять свои размеры и положение при изменении положения и длины волны восстанавливающего источника, а также при изменении масштаба голограммы. Следует подчеркнуть, что трансформационными свойствами в их полном объеме обладают только двумерные голограммы. Трехмерные голограммы восстанавливают изображение объекта только в случае, когда при реконструкции используется тот же источник, что и при записи голограммы. Что касается изменения масштаба записи трехмерной голограммы, то говорить об этом не имеет особого смысла из-за трудности осуществления подобной операции.

Впервые факт изменения геометрии восстановленного изображения при изменении параметров восстанавливающего источника был установлен Д. Габором, им же были сформулированы основные закономерности таких трансформаций (9, 10). Полная теория трансформационных свойств голограммы была развита впоследствии рядом авторов (25, 26). Однако мы не будем рассматривать здесь эту весьма громоздкую теорию, а ограничимся лишь простейшим описанием физики явления.

Характеризуя трансформации восстановленного голограммой изображения, следует отметить, что их закономерности в общем аналогичны закономерностям трансформаций, осуществляемых с помощью линзы, за исключением случаев, связанных с изменением длины волны реконструирующего

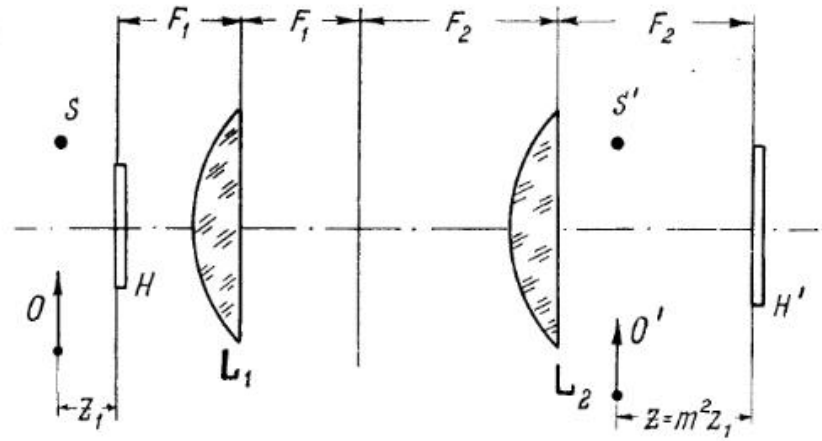

Рис. 31. К рассмотрению трансформаций, обусловленных изменением масштаба голограммы. Телескопическая система, составленная из линз L_1 и L_2, трансформируя излучение голограммы H, образует на выходе ее увеличенное в m крат изображение. Одновременно с голограммой трансформируется и вся схема реконструкции: референтный источник S изображается в виде S', объект O — в виде его изображения O'. При этом геометрия схемы реконструкции увеличивается в m крат в поперечном направлении и в m^2 крат в продольном

источника. В этих условиях для объяснения трансформационных свойств голограммы иногда удобно привлечь разнообразные вспомогательные комбинации линз.

Рассмотрим с помощью такого способа, например, трансформации, обусловленные изменением положения реконструирующего источника излучения (10) (рис. 30). Пусть некоторая голограмма H, реконструируемая источником S_2, восстанавливала изображение объекта O_2. Необходимо определить вид изображения в случае, когда голограмма реконструируется источником S_1, смещенным относительно источника S_2. Поставим перед голограммой тонкую отрицательную линзу L_1, переносящую изображение точки S_1 в точку S_2, а за голограммой — положительную линзу L_2, равную и противоположную по силе линзе L_1. В целом обе линзы компенсируют друг друга, поэтому после голограммы и обеих линз должно по-прежнему возникать изображение O_1, соответствующее случаю реконструкции из точки S_1.

Рассмотрим действие каждой из линз L_1 и L_2 отдельно. Линза L_1 переносит восстанавливающий источник в точку S_2, где располагался референтный источник при записи голограммы, т. е. в этом случае на голограмму H при реконструкции падает то же излучение, что и при записи. Соответственно в пространстве между линзами L_1 и L_2 восстанавливается прежнее изображение O_2. С другой стороны, известно, что за линзой L_2 образуется искомое изображение O_1, соответствующее случаю реконструкции из точки S_1. Нетрудно понять, что изображение O_1 можно рассматривать, следовательно, как результат трансформации исходного изображения O_2 с помощью линзы L_2. В общем, можно сформулировать, что для того, чтобы найти изображение объекта, реконструированное с помощью источника, положение которого отличается от положения референтного источника, использованного при записи голограммы, достаточно построить изображение объекта с помощью линзы, дополнительной к линзе, переводящей реконструирующий источник на место, которое занимал референтный источник, использованный при записи голограммы.

Из проведенного рассмотрения также следует, что при перемещении реконструирующего источника законы трансформации восстановленного изображения будут аналогичны законам трансформации изображений с помощью линзы. В частности, продольное увеличение будет равно квадрату поперечного.

Трансформации, обусловленные изменением масштаба голограммы, можно проиллюстрировать с помощью так называемой телескопической афокальной системы, составленной

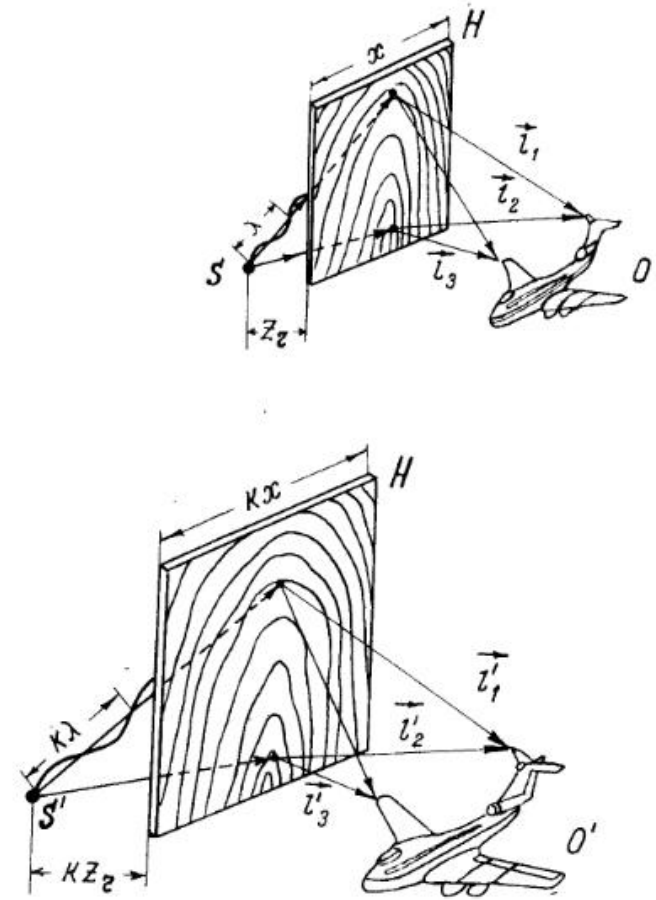

Рис. 32. Трансформации восстановленного изображения, обусловленные изменением длины волны реконструирующего излучения. Если увеличить с одним и тем же масштабным коэффициентом k всю геометрию реконструкции голограммы H, т. е. длину волны реконструирующего излучения λ, размеры голограммы (x и др.), а также геометрию расположения реконструирующего источника относительно голограммы (размер z_r и др.), то в силу того, что эффекты дифракции зависят только от отношения длины волны к размерам структуры, на которой осуществляется дифракция, структура поля, восстановленного увеличенной голограммой, повторит в том же масштабе структуру поля, восстановленного исходной голограммой. Соответственно реконструированное изображение O увеличится с одним и тем же масштабным коэффициентом k по всем пространственным осям

из двух линз, расположенных таким образом, что задний фокус одной из линз, например L_1, совпадал с передним фокусом другой, например L_2 (рис. 31). Известно, что у телескопической системы коэффициенты продольного и поперечного увеличения не зависят от положения объекта. При этом коэффициент поперечного увеличения m равен отношению фокусов линз F_1 и F_2, а коэффициент продольного увеличения равен квадрату поперечного.

Если на входе телескопической системы поместить голограмму H, то на выходе получим ее изображение H', увеличенное в m раз. Одновременно с голограммой трансформируются и все остальные компоненты поля: референтный источник S трансформируется в S', объект O в его изображение O'. При этом в плоскости, перпендикулярной оптической оси, все координаты источника и объекта будут увеличены в m раз. Расстояния от объекта и референтного источника до голограммы увеличатся в m^2 раз.

Таким образом, увеличению голограммы в m раз соответствует увеличение геометрии реконструкции, т. е. положения реконструирующего источника, объекта, а также размеров объекта, в m раз в поперечном направлении и в m^2 в продольном.

Трансформации восстановленного изображения, обусловленные изменением длины волны реконструирующего излучения, весьма естественно объясняются исходя из простых масштабных соотношений. На самом деле, увеличим одновременно с одним и тем же масштабным коэффициентом k все геометрические параметры реконструкции, т. е. длину волны реконструирующего излучения λ, размеры голограммы H (увеличив соответственно размеры ее структуры), а также геометрию размещения реконструирующего источника S относительно голограммы (рис. 32, a, b). Очевидно, что поскольку эффекты дифракции определяются отношением длины волны к размерам элементов структуры, на которой осуществляется дифракция, углы дифракции лучей на увеличенной голограмме останутся прежними и, соответственно, вся конфигурация лучей l_1, l_2, l_3, ..., образующих реконструированное изображение, претерпит масштабное преобразование с тем же коэффициентом k. В том же соотношении увеличится и реконструированное изображение O.

Существенная особенность трансформации изображения, обусловленной изменением длины волны реконструирующего источника, заключается в том, что в данном случае коэффициенты увеличения изображения в продольном и поперечном направлениях одинаковы, в то время как при обычных преоб-

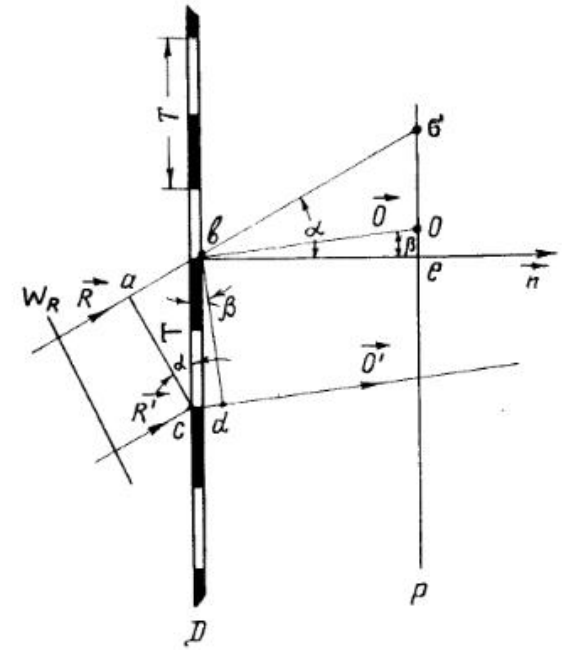

Рис. 33. Процесс дифракции излучения на решетке с пространственным периодом T. Луч $\overline{R}$, падающий на решетку D под углом α к ее нормали n, пройдя через решетку, образует ряд порядков дифракции. Нулевой порядок соответствует неотклоненному лучу (на рисунке ему соответствует луч, идущий в точку σ). Первый порядок дифракции соответствует случаю, когда лучи R и R', дифрагируя на смежных элементах решетки в лучи O и O', приобретают разность хода λ. Из геометрии рисунка следует, что эта разность хода образуется за счет участков ab и cd. Изображенная на рисунке вспомогательная плоскость P параллельна поверхности решетки. Если углы отклонения падающего и дифрагированного лучей α и β малы, то можно считать, что расстояние между точками их пересечения с плоскостью P (точки σ и O) не зависит от угла падения луча $\overline{R}$ на решетку

разованиях геометрической оптики коэффициент продольного увеличения равен квадрату поперечного.

Случаи трансформаций, рассмотренные на рис. 31 и 32, весьма просты по результатам, однако каждый из них связан с одновременным изменением нескольких параметров, например, в последнем примере одновременно меняются длина волны, масштаб голограммы и положение реконструирующего источника. Применяя рассмотренные случаи последовательно, можно разделить влияние всех этих параметров и определить вид реконструированного изображения при произвольном изменении длины волны, масштаба голограммы и положения источника. Однако такая процедура чересчур сложна.

В работе (27) был предложен достаточно наглядный способ построения реконструированного изображения, основанный на понятии «след объекта» — некоей инвариантной конфигурации, характерной для каждой точки голограммы. По точности такой метод полностью соответствует приближению, при котором выведены общие формулы трансформации в работе (25).

Основы этого метода весьма просты: процесс расщепления референтного луча на систему лучей, образующих изображение объекта, можно рассматривать как результат дифракции референтного луча на системе дифракционных решеток, каждая из которых образует луч, направляющийся в одну из точек объекта.

Рассмотрим детально процесс дифракции референтного луча R в объектный луч $\bar{O}$ на одной из упомянутых решеток D, характеризующейся пространственным периодом T (рис. 33). Как известно, реконструированное голограммой изображение образуется лучами первого порядка дифракции, т. е. такими, у которых разность хода лучей, дифрагировавших на смежных элементах решетки, равна длине волны λ. Из геометрии рис. 33 видно, что лучи $\bar{R}$ и $\bar{R}'$, принадлежащие одной референтной волне W_R, дифрагируя на смежных элементах решетки в объектные лучи O и O', приобретают разность хода за счет участков ab и cd. В соответствии с этим условие формирования волны первого порядка дифракции можно записать следующим образом:

$$ab - cd = \lambda.$$

Выражая отрезки ab и cd через шаг решетки T и углы α и β, составленные референтным и объектным лучами с нормалью к решетке $\vec{n}$, найдем

$$T(\sin\alpha - \sin\beta) = \lambda. \qquad (4)$$

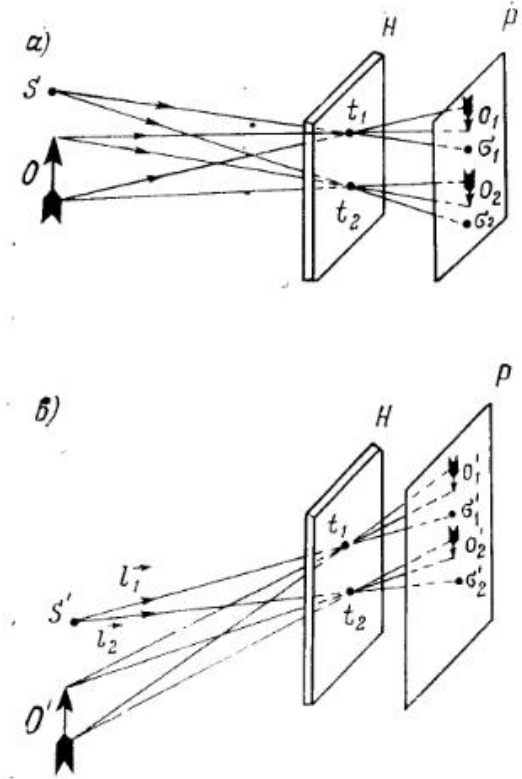

Рис. 34. Метод построения реконструированного изображения с использованием инвариантной конфигурации «след объекта». Параллельно плоскости голограммы H строится вспомогательная плоскость P. Из точек записанного на голограмме объекта O и референтного источника S проводится система лучей через какую-то произвольную точку голограммы t_1 (рис. a). Точки пересечения этой системы лучей с плоскостью P (точки σ_1 и o_1) образуют некую конфигурацию — след объекта. Аналогично строится след объекта для любой другой точки t_2. При построении реконструированного изображения, соответствующего новому положению референтного источника, из точки референтного источника S' через те же точки голограммы t_1 и t_2 проводятся лучи $\vec{l_1}$ и $\vec{l_2}$ (рис. b). Затем след объекта перемещается так, чтобы след референтного луча, найденный из условий экспозиции (точки σ_1 и σ_2), совпал с новой точкой пересечения референтного луча с плоскостью P (точки σ_1' и σ_2'). Далее из соответствующих точек следа объекта проводятся лучи через ту точку голограммы, к которой принадлежит данный след, и на пересечении этих лучей находят положение точек реконструированного изображения объекта O'

Если углы α и β малы, то синусы можно заменить тангенсами; тогда получим

$$\operatorname{tg}\alpha - \operatorname{tg}\beta \simeq \frac{\lambda}{T}. \qquad (5)$$

Проведем некоторую вспомогательную плоскость P, параллельную поверхности решетки, и продлим референтный и объектный лучи $\bar{R}$ и $\bar{O}$ до пересечения с этой плоскостью. Из (5) следует, что расстояния между точками пересечения объектного и референтного лучей с плоскостью P (точки σ и O на рис. 33) не зависят от угла падения референтного луча на решетку и определяются ее структурой (шагом T) и длиной волны λ.

Если перенести найденную закономерность на голограмму, можно сформулировать следующее правило построения реконструированного изображения. Пусть на голограмме H с помощью референтного источника S записано изображение некоторого объекта O (рис. 34, a). Построим вспомогательную плоскость P, параллельную плоскости голограммы, и проведем из точек объекта и референтного источника систему лучей через какую-то точку голограммы t_1. Точки пересечения этой системы лучей с плоскостью P образуют на плоскости некоторую конфигурацию — «след объекта» (точки σ_1 и o_1 на рис. 34, a). По существу «след объекта» соответствует виду, который имеют объект и референтный источник при наблюдении их из той точки голограммы, к которой относится данный след. Аналогичным способом можно построить след объекта для любой другой точки голограммы, например t_2.

При построении реконструированного изображения, соответствующего новому положению референтного источника S', из референтного источника через те же точки голограммы t_1 и t_2 направляются лучи $\bar{l}_1$ и $\bar{l}_2$ референтного источника S' (рис. 34, b). Далее конфигурация каждого следа объекта, найденная из условий экспозиции голограммы (рис. 34, a), перемещается из прежнего положения таким образом, чтобы след референтного луча (точки o_1 и o_2 на рис. 30, a) совпал с новой точкой пересечения референтного луча с плоскостью P (точки o_1' и o_2' на рис. 34, b). Таким образом определяется новое положение следов объекта при изменившихся условиях реконструкции. Затем из соответствующих точек следа объекта (например, носиков стрелок o_1' и o_2') проводятся лучи через точку голограммы, к которой принадлежит данный след (точки t_1 и t_2). На пересечении этих лучей находят положение точек реконструированного изображения объекта O'.

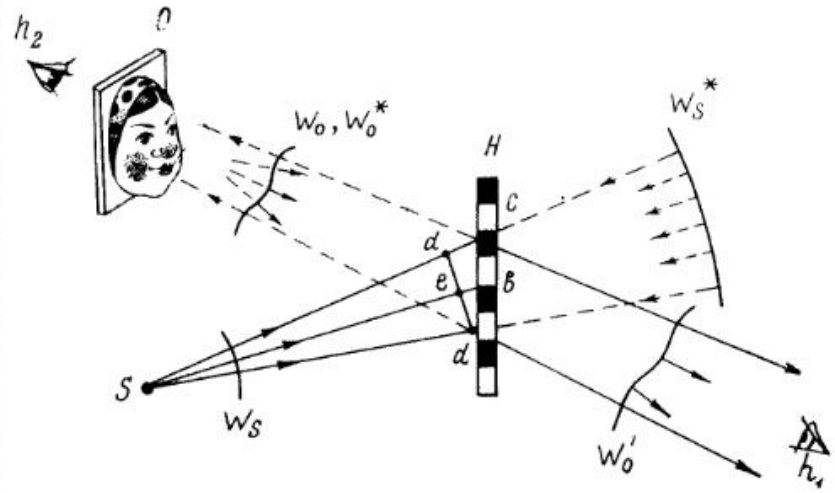

Рис. 35. Обращение волновых полей с помощью голограммы. Голограмма H, на которой с помощью референтного источника S записана волна объекта W_o, при восстановлении волной W_S, исходящей из того же источника, воспронзводит волну объекта W_o' — продолжение волны W_o, записанной на голограмме. Эта же голограмма при восстановлении волной W_S^*, сходящейся в источник S, восстанавливает волну W_o^*, сопряженную по отношению к волне объекта W_o, т. е. волну, имеющую ту же форму, что и W_o, но распространяющуюся в обратном направлении. Наблюдатель h_2 видит при этом так называемое псевдоскопическое изображение объекта O. Лицо матрешки видно как бы изнутри — овал лица представляется вогнутым, а нос углублением. Обращение объектной волны обусловлено тем, что отрезкам eb и dc при реконструкции волной W_S соответствует запаздывание колебаний в точках c и b по сравнению с точкой a, а при реконструкции волной W_S, сходящейся в точку S, этим же отрезкам соответствует опережение, поскольку волна W_S сначала доходит до точек b и c и только затем до точки a

Метод построения изображения при изменении длины волны и масштаба голограммы также следует из формулы (5). Нетрудно понять, что правая часть (5) пропорциональна расстоянию между точками следа, поэтому при увеличении длины волны масштаб следа соответственно увеличивается, а при увеличении размеров голограммы — уменьшается.

§ 4. Некоторые специфические свойства голограммы

Рассмотрим ряд свойств голограммы, открывающих возможности, недоступные для известных ранее оптике методов. Прежде всего к таким свойствам следует отнести возможность обращения волнового поля объекта, т. е. возможность пустить волны «вспять», обратно к объекту. В общих чертах сущность этого явления заключается в следующем. Пусть на голограмме H с помощью точечного источника S зарегистрировано волновое поле некоторого объекта O, например барельефа с изображением матрешки (рис. 35). Если на такую голограмму направить сферическую волну W_s того же самого референтного источника S, то голограмма восстановит волновое поле объекта, т. е. распространяющуюся от объекта волну W'_o, соответствующую дальнейшему ходу волны W_o, записанной на голограмме. Наблюдатель h_1, регистрирующий это волновое поле, увидит пространственное изображение объекта O.

Предположим теперь, что та же голограмма H реконструируется сферической волной W^*_s, сходящейся к референтному источнику S. Оказывается, что голограмма H восстановит в этом случае волну W^*_o, сопряженную по отношению к зарегистрированной на ней волне W_o, т. е. волну, совпадающую по форме с волной W_o, но распространяющуюся в обратном направлении. На рис. 35 волновые фронты прямой и сопряженной волн W_o и W^*_o обозначены одной кривой, поскольку они совпадают, при этом лучевые векторы прямой волны нарисованы сплошными линиями, обратной — пунктиром.

Рассмотрим детально механизм этого интересного явления. Как уже отмечалось, голограмма воспроизводит на своей поверхности распределение фаз излучения, рассеянного объектом, за счет того, что пропускает только те части референтной волны, которые совпадают по фазе с волной объекта. Задать функцию распределения фаз на некоторой поверхности означает определить степень запаздывания (опережения) колебаний во всех точках этой поверхности по отношению к какой-то одной произвольно выбранной референтной точке. Выберем в качестве референтной некоторую точку a, расположенную на одном из прозрачных участков голограммы. Как видно из рисунка, фазы колебаний на всех остальных прозрачных участках можно задать величиной отрезков, характеризующих удаление данного прозрачного участка от референтного источника S по сравнению с удалением референтной точки a. В частности, фаза в точке b характеризуется отрезком be, фазы в точке c — отрезком cd и т. д.

Рассмотрим случай восстановления голограммы сферической волной W^*_s, сходящейся в точке S. Нетрудно понять, что величины отрезков, характеризующих распределение фаз на голограмме, в этом случае останутся прежними, однако знак их изменится на противоположный. Действительно, если при восстановлении волной, исходящей из источника S, отрезки eb и dc характеризовали запаздывание колебаний в точках b и c по отношению к точке a, то при восстановлении волной, сходящейся в источник, эти же отрезки будут характеризовать опережение колебаний в точках c и b по отношению к колебаниям в точке a, поскольку сферическая волна W^*_S сначала доходит до точек c и b и только затем до точки a. Таким образом, при восстановлении сопряженной волной распределение фаз на поверхности голограммы изменит свой знак. Нетрудно понять, что новым граничным условиям соответствует восстановленная волна W^*_o, совпадающая по форме с волной W_o, записанной на голограмме, однако распространяющаяся в обратном направлении — именно в этом случае опережающие части фронта превращаются в отстающие, а отстающие в опережающие.

Наблюдатель h_2, регистрирующий созданное сопряженной волной изображение, увидит весьма удивительную картину: если при прямой реконструкции наблюдатель h_1 видел барельеф лица матрешки, то при обращении голограммы наблюдатель h_2 увидит изображение того же лица, однако оно будет выглядеть так, как будто на него смотрят изнутри. Например, если наблюдатель h_1 видел выпуклый овал и выступающий вперед нос, то наблюдатель h_2 увидит вогнутый овал и нос в виде углубления. В целом такое изображение, известное под названием «псевдоскопическое», имеет вид слепка, полученного при вдавливании оригинала в пластический материал.

Следует отметить, что получение псевдоскопического изображения далеко не главное практическое следствие явления обращения волновых фронтов, в основном это явление исполь-

зуется в приложениях, связанных с наблюдением сквозь неоднородные среды.

Голограмма образует псевдоскопическое изображение еще в одном случае. Как уже упоминалось, двумерная голограмма формирует два изображения объекта — истинное и ложное. Оказывается, что ложное изображение псевдоскопично. Предположим, что на голограмме H было зарегистрировано изображение объекта O (в данном случае это барельеф с изображением льва). Предположим также для простоты рассмотрения, что в качестве референтной волны была использована плоская волна W_R, падающая по нормали к поверхности голограммы. Если голограмма реконструируется плоской волной, то истинное изображение O появится на месте, где ранее располагался объект O. Для того чтобы найти ложное изображение, необходимо, как уже отмечалось (рис. 18), построить референтную волну W'_R у поверхности голограммы и затем изобразить объект в этой волне, как в зеркале. Проведя такую операцию, найдем ложное изображение O''.

Тот факт, что при построении ложного изображения использовалось зеркало, совсем не означает, что изображение будет иметь обычный вид. Расположение ложного изображения в пространстве действительно определяется зеркальным преобразованием объекта, однако лучи $\bar{l}_1$, $\bar{l}_2$, $\bar{l}_3$, образующие это изображение, идут в противоположном направлении по отношению к лучам $\bar{l}'_1$, $\bar{l}'_2$, $\bar{l}'_3$, которые должны были бы соответствовать зеркальному изображению O''. Из рис. 36 нетрудно понять, что изменение направления хода лучей соответствует переходу от ортоскопического изображения к псевдоскопическому.

Одно из весьма существенных свойств голографического изображения заключается в том, что оно может воспроизводить градации яркостей объекта в очень широком динамическом диапазоне, т. е. такое изображение передает одновременно без искажений как очень яркие, так и достаточно тусклые детали объекта. В обычной фотографии динамический диапазон воспроизведения яркости объекта ограничен так называемой широтой фотографического материала. На рис. 37, *а* представлена характеристическая кривая фотоматериала — зависимость оптической плотности почернения фотопластинки D от логарифма экспозиции E. Распределение яркости фотографического изображения оказывается искаженным по сравнению с оригиналом уже в силу самого логарифмического характера зависимости коэффициента пропускания от экспозиции. Однако особенно сильно ограничения широты фото-

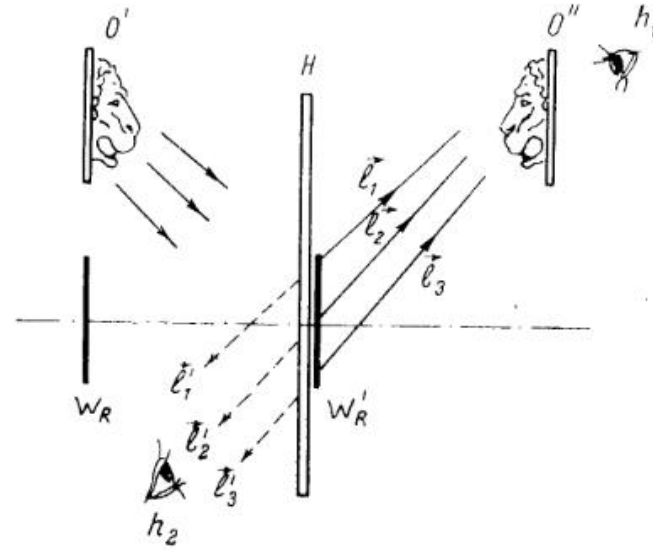

Рис. 36. К псевдоскопичности ложного изображения, образуемого двумерной голограммой. Для того чтобы определить положение ложного изображения O'', необходимо построить референтную волну W'_R у поверхности голограммы и затем изобразить объект в этой волне как в зеркале. Построенное таким образом ложное изображение отличается от обычного зеркального тем, что образующие его лучи $\bar{l}_1$, $\bar{l}_2$, $\bar{l}_3$ распространяются по обратному направлению относительно лучей $\bar{l}'_1$, $\bar{l}'_2$, $\bar{l}'_3$, которые должны были бы соответствовать обычному зеркальному изображению. Изменение направления распространения лучей обусловливает, как это видно из рисунка, переход от ортоскопического изображения к псевдоскопическому

графического материала сказываются на передаче ярких деталей объекта. Например, обычная фотография не в состоянии передать сверкание бриллиантового кулона матрешки (рис. 37, *б*). Действительно, если градации яркости всех деталей матрешки еще могут как-то уложиться на участке характеристической кривой в диапазоне освещенностей от E_1 до E_2, где плотность D зависит от освещенности, то сверкающий блик кулона попадает на участок насыщения в точку E_3 и воспроизведется на фотографии точно так же, как и детали с гораздо меньшей освещенностью.

Совсем иначе ведет себя голографическое изображение (рис. 37, *в*): при очень ограниченной широте фотографического материала такое изображение способно правильно передавать детали, яркость которых в тысячи раз превышает среднюю яркость объекта. Причина такого явления достаточно проста — при записи голограммы излучение каждой детали объекта распределяется по всей ее площади, поэтому даже очень яркой детали соответствует относительно малая модуляция ΔE вокруг некоторого среднего значения освещенности E_0. Такая модуляция не выводит материал на участок насыщения, и соответствие между яркостью объекта и откликом материала сохраняется в очень широких пределах.

При реконструкции голограммы каждая деталь изображения (например, кулон на рис. 37, *в*) формируется излучением, собранным со всей площади голограммы (лучи $\bar{l}_1$, $\bar{l}_2$, $\bar{l}_3$). В результате при относительно низком уровне модуляции записи световой поток, направляемый в изображение этой детали, может быть достаточно большим. Фактически динамический диапазон яркостей восстановленного голограммой изображения ограничивается только шумом — постоянным фоном, обусловленным, например, рассеянием на зернистой структуре фотоматериала (лучи $\bar{\lambda}_1$, $\bar{\lambda}_2$ на рис. 37, *в*).

Следует отметить, что способность голограммы правильно передавать широкий диапазон яркостей объекта имеет большое значение даже в изобразительной технике. Например, в голографическом портрете прежде всего поражает воспроизведение естественного блеска глаз, и только затем зритель обращает внимание на пространственные эффекты.

Очень интересной и важной особенностью голографического изображения является его малая чувствительность к повреждениям и дефектам фотоматериала, на котором оно записано. Механизм такой устойчивости достаточно прост — каждая точка восстановленного изображения формируется лучами, идущими со всех участков голограммы (например, изображение кулона на рис. 37, *с* формируется лучами $\bar{l}_1$, $\bar{l}_2$,

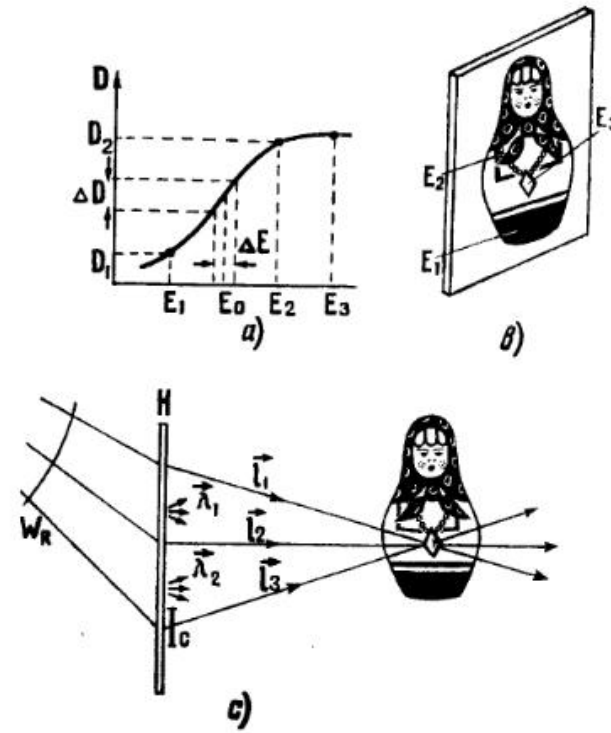

Рис. 37. К способности голограммы воспроизводить градации яркости объекта в широком динамическом диапазоне. При регистрации матрешки на обычной фотографии (рис. *б*) блестящий кулон создает на фотопластинке освещенность E_3, выходящую за пределы линейного участка характеристической кривой (рис. *а*) и поэтому передается на фотографии так же, как и гораздо менее яркие детали, которые создают освещенность E_2. Если матрешка регистрируется на голограмме, то излучение кулона рассредотачивается по всей площади фотопластинки и создает относительно небольшую модуляцию освещенности ΔE, не выходящую за пределы линейного участка характеристической кривой. Во время реконструкции изображение кулона формируется излучением, собранным со всей площади голограммы (лучи $\bar{l}_1$, $\bar{l}_2$, $\bar{l}_3$), что позволяет направлять в него большой световой поток. Распределение излучения каждой точки объекта по всей поверхности голограммы предопределяет устойчивость восстановленного изображения к повреждениям фотоматериала. Например, повреждение участка *с* исключает из процесса формирования изображения только луч $\bar{l}_3$

$\bar{l}_3$). При повреждении одного из этих участков, например c, из процесса формирования изображения исключается только часть лучей (в данном случае луч $\bar{l}_3$), остальные ($\bar{l}_1$ и $\bar{l}_2$) по-прежнему фокусируются в изображение.

Остановимся кратко на свойствах голограммы, проявляющихся в том случае, когда она реконструируется объектной волной. Рассмотрение проведем на примере Фурье-голограмм, т. е. предположим, что при записи объект O и референтный источник S располагаются в плоскости, параллельной поверхности голограммы (рис. 38). Как уже отмечалось, у такой голограммы в первом приближении каждой точке объекта (например, a и b) на голограмме соответствуют гармоники распределения плотности почернения ν_a и ν_b, отличающиеся значением пространственного периода.

Предположим теперь, что зарегистрированная таким образом голограмма восстанавливается не референтным источником S, а самим объектом O (разумеется, освещенным соответствующим когерентным излучением). На первый взгляд кажется, что голограмма должна восстановить изображение референтного источника S, однако это впечатление не совсем точно. Покажем, что двумерная голограмма обратимостью в этом смысле не обладает. С этой целью рассмотрим взаимодействие излучения отдельных точек объекта со структурой голограммы. Излучение точки a, взаимодействуя со «своей» гармоникой ν_a, образованной в результате интерференции излучения точки a и источника S, расщепляется на два луча — нулевого порядка $\bar{l}_{oa}$ и луч $\bar{l}_{ra}$, действительно соответствующий восстановленному изображению референтного источника S. Однако излучение точки a будет взаимодействовать также и с более высокочастотной «чужой» гармоникой ν_b, сформированной излучением точки b и источника S. Угол отклонения луча $\bar{l}_a$ на этой гармонике будет больше того, который необходим для получения луча референтного источника $\bar{l}_{ra}$ и в результате появится луч $\bar{l}_{ab}$, которого не было при записи голограммы. Аналогично излучение точки b образует: нулевой порядок $\bar{l}_{ob}$, луч $\bar{l}_{rb}$, совпадающий с референтным лучом $\bar{l}_r$, а также некоторый новый луч $\bar{l}_{ba}$, который не был записан на голограмме. Излучение всех остальных точек объекта трансформируется по такому же закону.

В результате всего рассмотренного процесса голограмма действительно восстанавливает излучение референтного источника, однако, кроме этого, восстанавливается множество попутных лучей, которые отсутствовали при записи. Наблюдатель h, регистрирующий излучение восстановленной таким

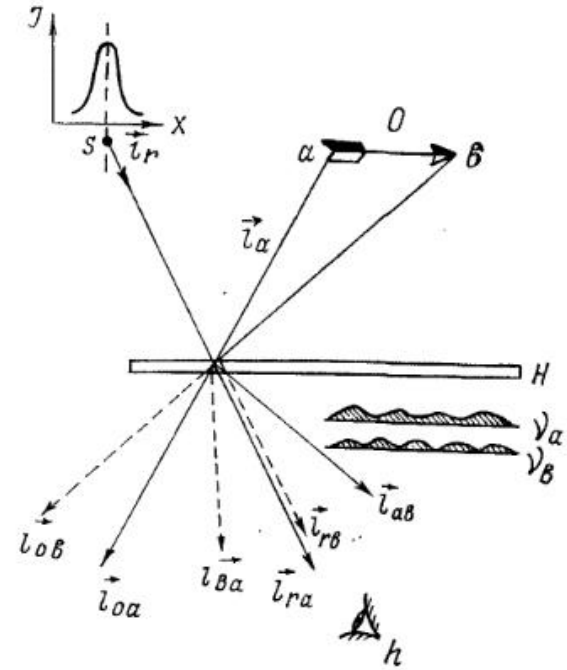

Рис. 38. Реконструкция голограммы объектной волной. Излучение точки объекта a, взаимодействуя со «своей» гармоникой ν_a, образованной на голограмме в результате интерференции излучения точки и референтного источника S, расщепляется на два луча: нулевой порядок $\bar{l}_{oa}$ и луч $\bar{l}_{ra}$ соответствующий восстановленному излучению референтного источника S. Взаимодействуя с «чужой» гармоникой ν_b, представляющей собой результат записи картины интерференции излучения точки b и референтного источника S', излучение точки a образует луч $\bar{l}_{ab}$, который не был записан на голограмме. Аналогично взаимодействует со структурой голограммы излучение точки b. Наблюдатель h, регистрирующий излучение восстановленной таким способом голограммы, видит на месте референтного источника яркую точку S, окруженную световым гало лучей, аналогичных $\bar{l}_{ab}$ и $\bar{l}_{ba}$. Типичное распределение интенсивности в таком изображении приведено в верхней левой части рисунка

способом голограммы, увидит на месте референтного источника яркую точку S, окруженную световым гало попутных лучей. Типичное распределение интенсивности в таком изображении приведено в левой верхней части рисунка. Можно показать, что оно совпадает с так называемой функцией автокорреляции объекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методы голографии и перспективы ее практического применения

Сформировавшись как наука, голография постепенно начинает входить и в нашу повседневную жизнь. Сфера ее возможных практических приложений необычайно широка, и в этом нет ничего удивительного: ведь по существу голография — чрезвычайно универсальный метод отображения и познания окружающего мира, который может равным образом использоваться фактически во всех областях человеческой деятельности, начиная от лингвистики и кончая исследованием процессов в термоядерной плазме. Главного приложения у этого метода также нет, как нет его, скажем, у линзы, которая применяется как в микроскопах, так и киноаппаратах, телескопах, биноклях и других устройствах. При таком изобилии возможностей весьма сложно дать достаточно полный обзор практических приложений голографии, более целесообразно ограничиться описанием методов, которые лежат в их основе. Методы голографии наряду со свойствами голограммы и ее закономерностями являются третьим основным компонентом этой новой науки.

Все приложения голографии можно разделить условно на два больших класса: приложения, связанные с получением пространственных изображений, предназначенных для визуального восприятия, и приложения, в которых голограмма используется как своеобразный мерительный инструмент.

Приложения, связанные с измерениями, основаны на чрезвычайной объективности голографической записи. Эта черта совершенно неотъемлема от голографии и проявляется даже там, где в этом нет особой необходимости. В частности, например, наблюдая объемные голографические изображения, которые теперь часто демонстрируются на выставках, следует всегда помнить, что на голограмме простейшей фарфоровой статуэтки в отличие от фотографии зарегистрированы самые мельчайшие подробности строения этой ста-

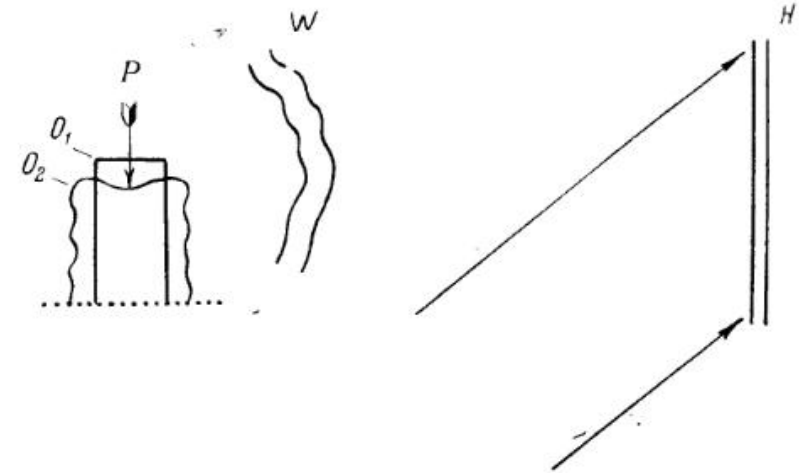

Рис. 39. Общая схема метода голографической интерферометрии. На одной и той же фотопластинке H записываются голограмма предмета, находящегося в исходном состоянии O, и голограмма этого же предмета, деформированного под действием нагрузки P. При реконструкции оба изображения восстанавливаются одновременно, соответствующее им излучение интерферирует, и деформации выявляются в виде интерференционных полос на восстановленном изображении

туэтки — трещины, выступы и шероховатости с размерами порядка микрона, тонкие детали распределения фаз света по поверхности фарфора и т. д.

Основная идеология приложений, связанных с получением изображений, предназначенных для визуального восприятия, заключается в том, что голограмма в этом случае используется в качестве своеобразного входного устройства в мозг: наш мозг устроен весьма специфично — в отличие от современных счетных машин он мыслит образами и требует, чтобы информация, которая подается ему на вход, также была сформирована в определенные образы. Например, пилоту, который заходит на посадку, можно сообщить все необходимые ему данные — высоту, скорость полета, наклоны самолета, расстояние до взлетной полосы и т. д. Однако посадить самолет по этим данным пилот не сможет. Вместе с тем, если все эти цифры преобразовать в искусственное изображение взлетной полосы, видимое так же, как видел бы ее пилот в данных условиях, то задача посадки не представит никаких сложностей.

Рассмотрим подробнее приложения, в которых голография используется как своеобразный мерительный инструмент. Одним из наиболее характерных для этой области методов является так называемая голографическая интерферометрия (28, 29). Общая схема этого метода изображена на рис. 39. В этом случае на одной и той же фотопластинке H последовательно записываются голограмма предмета в исходном состоянии O_1 и голограмма этого же предмета, находящегося в конечном состоянии O_2, например, соответствующем деформации предмета под действием нагрузки P. При реконструкции экспонированной таким образом и проявленной голограммы оба изображения восстанавливаются одновременно, соответствующее им излучение интерферирует и деформации выявляются в виде интерференционных полос. Точность измерения деформаций поистине оптическая — десятые доли микрона и выше.

В настоящее время метод голографической интерферометрии достаточно широко используется в машиностроении при исследовании дефектов различных деталей, акустике при исследовании колебаний мембран, аэродинамике при исследовании процессов обтекания различных тел и во многих других областях. На рис. 40 приведена голографическая интерферограмма плазмы так называемого Z-пинча. Зарегистрирована фаза развития разряда, при которой разряд еще не успел затронуть центральные области трубы.

Весьма существенным направлением развития приложений голографии является создание оптических элементов, об-

Рис. 40. Голографическая интерферограмма плазмы так называемого Z-пинча; зарегистрирована фаза развития разряда, при которой разряд еще не успел затронуть центральные области трубы

ладающих специальными свойствами. Как уже отмечалось ранее, объективность голографической записи доходит до того, что голограмма такого объекта, как вогнутое зеркало, сама становится как бы зеркалом, т. е. приобретает способность фокусировать свет (16). В технике это глубокое свойство голограммы используется для создания фокусирующих элементов самого различного назначения (30).

В некоторых случаях за счет специального выбора схемы записи фокусирующего элемента его выполняют так, чтобы положение точки, в которой фокусируются лучи, сильно зависело от длины волны, т. е. намеренно вводят так называемый хроматизм. Такие фокусирующие элементы по сути дела представляют собой дифракционные решетки (16). Голографические дифракционные решетки отличаются отсутствием так называемого астигматизма, низким уровнем шумов и другими полезными свойствами. Наибольших успехов в этой области в настоящее время добилась французская фирма «Жобен Ивон», которая выпускает спектральную аппаратуру, основанную на использовании таких решеток (31).

Ярким примером возможностей, которые открывает голография в области создания оптических элементов, является так называемый множительный голографический элемент, используемый в микроэлектронике, а также некоторых других областях (32). Общая схема получения и использования такого элемента приведена на рис. 41. На стадии получения элемента (рис. 41, *а*) на фотопластинке F с помощью референтного точечного источника S записывается специальный объект O, выполненный в виде регулярной матрицы точек. При реконструкции на место, которое занимал точечный источник, устанавливается объект, подлежащий мультиплицированию. (В данном случае транспарант с изображением буквы $\varkappa$, освещенный пучком лучей L). Каждая точка этого объекта в соответствии с условиями съемки изображается голограммой H в виде регулярной матрицы точек. В целом голограмма восстанавливает регулярную матрицу O', составленную из изображений мультиплицируемого объекта. Такой голографический мультиплицирующий элемент можно рассматривать как обобщенную линзу: в отличие от линзы, преобразующей точку предметного пространства в точку в пространстве изображений, такой элемент преобразует точку в пространстве предметов в матрицу точек в пространстве изображений.

Одно из весьма оригинальных и существенных приложений голографии — использование ее для компенсации искажений, возникающих при наблюдении объектов сквозь оптически неоднородные среды (деформированные оптические си-

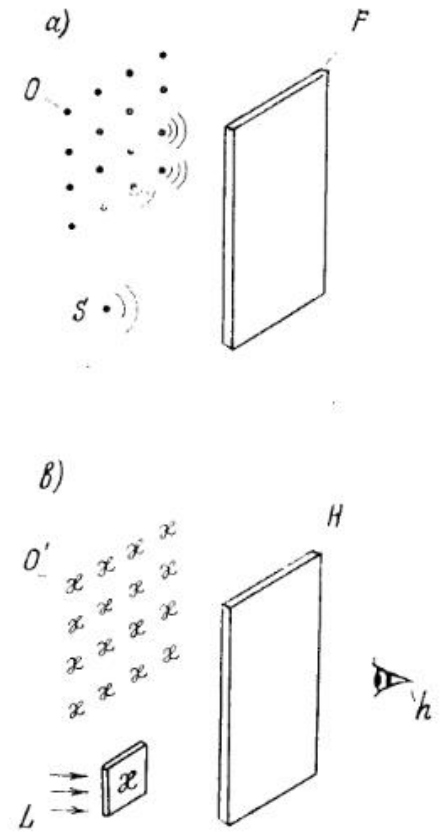

Рис. 41. Общая схема получения и использования голографического мультиплицирующего элемента. На стадии получения элемента *а* на фотопластинке F с помощью точечного референтного источника S записывают регулярную матрицу точек O. При реконструкции *b* на место восстанавливающего источника S' устанавливается объект, подлежащий мультиплицированию (в данном случае транспарант с изображением буквы $\varkappa$). Голограмма H преобразует излучение этого объекта в регулярную матрицу его изображений O'

стемы, матовые стекла, неоднородную атмосферу и т. д.). В этом направлении разработано несколько принципиально отличающихся друг от друга методов. Схема одного из них, основанного на обращении хода лучей с помощью голограммы, представлена на рис. 42 (33). Излучение объектов сцены O_1 и O_2 проходит через оптически неоднородную среду, например матовое стекло E. На первый взгляд кажется, что в прошедшем через матовое стекло излучении информация об объекте безвозвратно потеряна. Во всяком случае при визуальном наблюдении вместо объектов виден равномерный фон. Для того чтобы снова восстановить изображение, рассеянное матовым стеклом, излучение регистрируется на голограмме H с помощью референтного луча R. Экспонированная таким образом и проявленная голограмма устанавливается относительно матового стекла в прежнее положение, и на нее направляется излучение R', сопряженное по отношению к излучению R, падавшему на голограмму при ее записи. Ход лучей через голограмму обращается, восстановленное излучение идет через неоднородную среду строго по обратному направлению и приобретает фазовые набеги обратного знака. В результате внесенные матовым стеклом искажения компенсируются, и на выходе возникают изображения объектов O_1 и O_2.

Перейдем к приложениям голографии в аналоговой и дискретной счетной технике. Принципиальные основы использования голографии в этой области весьма глубоки и, по-видимому, заключаются в том, что операции отображения и познания в известной степени родственны друг другу. Голография — наиболее объективный и совершенный из известных нам способов отображения внешнего мира, и она, как это и следовало ожидать, открыла ряд удивительных возможностей в области осуществления разнообразных логических операций. Вершиной развития голографии в этом направлении является известная работа американского исследователя Р. И. Ван-Хирдена, выдвинувшего гипотезу о том, что процессы, протекающие в человеческом мозге, аналогичны процессам, происходящим в трехмерной голограмме (34). Однако мы не будем касаться здесь столь сложной области, а остановимся на применениях голографии в устройствах распознавания образов, а также в устройствах памяти счетных машин.

Метод опознавания образов, основанный на использовании согласованного голографического фильтра, был предложен в работе (35). Принципиальная схема этого метода приведена на рис. 43. Процесс получения фильтра сводится к тому, что на голограмме H с помощью референтного источ-

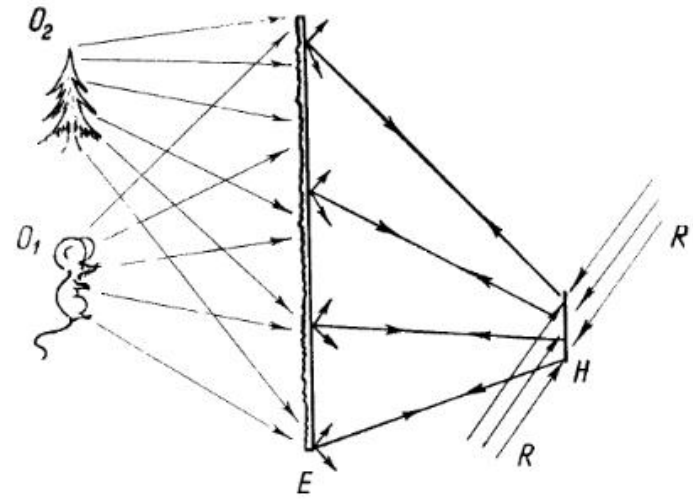

Рис. 42. Схема компенсации искажений изображения, вносимых оптически неоднородными средами методом обращения хода лучей с помощью голограммы. Излучение объектов сцены O_1 и O_2 проходит через оптически неоднородную среду — матовое стекло E — и регистрируется на голограмме H с помощью референтного луча R. При восстановлении на голограмму направляется луч R', сопряженный по отношению к лучу, использованному при записи. Ход лучей через голограмму и неоднородную среду обращается, и за матовым стеклом возникает неискаженное изображение исходных объектов

ника S регистрируют изображение объекта O, который в дальнейшем необходимо опознать среди других предметов. (В данном случае в качестве такого объекта выбран транспарант с изображением буквы ж, просвечиваемый излучением L). Операция распознавания сводится к тому, что экспонированную и проявленную голограмму-фильтр восстанавливают излучением предъявляемых к опознаванию объектов. Если предельно упростить рассуждения, то можно считать, что в случае, когда на голограмму падает излучение именно того объекта, который на ней записан (т. е. в данном случае излучение буквы ж), то в силу обратимости голограмма восстановит изображение референтного точечного источника S. Если голограмма восстанавливается излучением какого-либо другого объекта, то изображение точки не возникает. Таким образом, появление точки в поле зрения сигнализирует о факте появления интересующего нас объекта. Следует тут же уточнить, что, как уже отмечалось ранее (рис. 38), двумерная голограмма полной обратимостью в указанном смысле не обладает и вместо точки S при распознавании появляется некое размытое пятно, распределение интенсивности в котором описывается так называемой функцией автокорреляции объекта. (На рисунке график распределения интенсивности в таком пятне изображен в виде заштрихованной кривой).

Принципиальная схема устройства голографической памяти электронно-вычислительной машины изображена на рис. 44 [36]. При записи информации на фотопластинку F впечатывается система малых голограмм H_1, H_2, ..., H_n, на каждой из которых зарегистрирована одна страница памяти. Информация на каждой странице кодируется в виде изображения, характеризующегося определенным распределением интенсивности в некоторой плоскости O. Примерный вид такого распределения представлен в верхней правой части рисунка.

Извлечение информации из памяти осуществляется следующим образом. По команде счетного устройства луч когерентного излучения L с помощью отклоняющего устройства D направляется на определенную голограмму H_n, на которой записана страница информации, необходимая для решения данной задачи. Голограмма восстанавливает изображение этой страницы в плоскости O, затем распределение интенсивности в этом изображении считывается матрицей фотоприемников и подается на вход счетного устройства C. В случае, если необходимо вспомнить другую страницу информации, угол отклонения луча изменяется и соответственно восстанавливается другая голограмма. Условия записи голограмм вы-

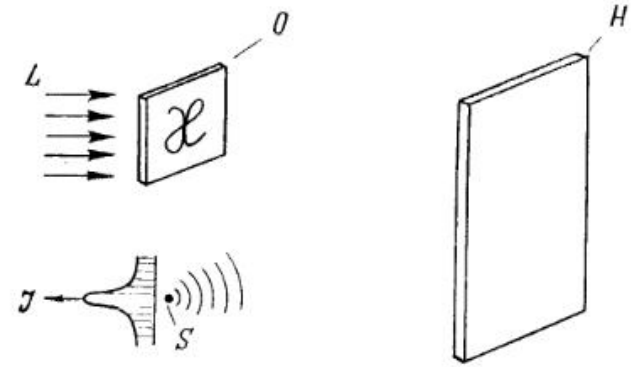

Рис. 43. Принципиальная схема опознавания образов с помощью согласованного голографического фильтра. На этапе получения фильтра на голограмме H с помощью референтного источника S регистрируется объект O, который в дальнейшем необходимо опознать среди других предметов (в данном случае транспарант с изображением буквы ж). На этапе распознавания экспонированная и проявленная голограмма-фильтр восстанавливается излучением опознаваемых объектов. В случае когда на голограмму падает излучение записанного на ней объекта, она восстанавливает изображение точки S, несколько размытое процессами интермодуляции на структуре голограммы

бираются таким образом, чтобы восстановленные изображения страниц точно проецировались на одну и ту же матрицу фотоприемников.

Основные особенности голографической памяти — относительно большой объем хранимой информации при весьма ограниченных возможностях ее перезаписи. Современные счетные машины по самой своей структуре недостаточно хорошо приспособлены к использованию памяти с такими свойствами. Возможно, что в будущем удастся создать ЭВМ, выполняющую многие математические операции за счет извлечения их результата из своей памяти. Для такой ЭВМ потребуется память с необычайно большим объемом. В этой связи представляет интерес развитие голографии с записью в трехмерных средах, которая обещает существенный прогресс в направлении увеличения количества записываемой информации (34).

Существенная доля практических приложений голографии падает на так называемую неоптическую голографию. В основном это относится к радиоголографии и акустической голографии. Голография в рентгеновской инфракрасной и ультрафиолетовой областях спектра, а также на электронных волнах развита значительно слабее.

Одним из удачных примеров приложений неоптической голографии можно считать голографический метод измерения амплитудно-фазового распределения поля в раскрыве антены в СВЧ диапазоне спектра (37). Задача заключается в данном случае в следующем. Для прямого измерения диаграммы направленности больших антени волновое поле антенны необходимо сканировать на очень большом удалении и по весьма большой площади. Значительно проще измерить распределение амплитуд и фаз в раскрыве антенны и затем по этим данным вычислить значение поля в дальней зоне. Применяя методы голографии, можно еще более упростить задачу. В этом случае в оптическом диапазоне спектра строится уменьшенная модель поля СВЧ, создаваемого антенной, и измерения индикатрисы направленности проводятся на этой модели.

Общая схема получения голограммы поля в раскрыве антенны приведена на рис. 45. Электромагнитные колебания, задаваемые генератором G, испускаются в пространство излучателем S и затем преобразуются антенной A в направленный пучок (волны W_1, W_2). Поле СВЧ вблизи раскрыва антенны сканируется приемником R по некоторой траектории Z, и зарегистрированные приемником сигналы подаются в смеситель M. В этот же смеситель по другому каналу поступают

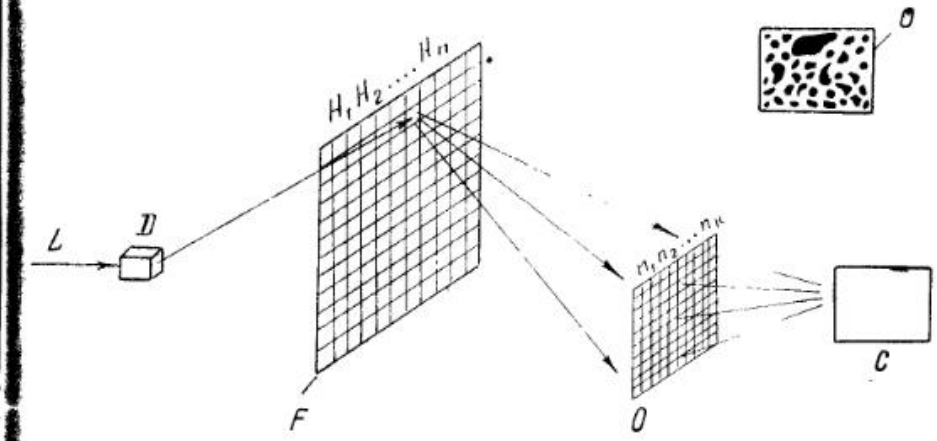

Рис. 44. Принципиальная схема устройства памяти электронно-вычислительной машины. По команде счетного устройства луч когерентного излучения L направляется на голограмму H_n, на которой записана искомая страница информации. Изображение этой страницы восстанавливается в плоскости O, считывается матрицей фотоприемников и подается на вход счетного устройства C

колебания генератора G, которые в данном случае используются в качестве опоры при сравнении фаз сигнала приемника R, т. е. играют роль референтного пучка. Сигнал, возникающий в результате интерференции сигналов приемника R и генератора G, детектируется и используется для модуляции яркости узкого пучка света P, сканирующего фотопластинку синхронно с движением приемника R, сканирующего поле в раскрыве антенны. Таким образом, записывается голограмма поля антенны. Если направить на полученную таким способом голограмму пучок когерентного света l, то она восстановит модель поля в раскрыве A, а также модель поля, создаваемого антенной в пространстве (волны W_1' и W_2'). Собирая излучение этого поля с помощью линзы L, можно получить в ее фокусе модель распределения интенсивности поля антенны в дальней зоне.

В заключение остановимся на применении голографии в изобразительной технике. Впервые мысль о возможности использования голограммного метода для создания изобразительной техники, воспроизводящей полную иллюзию действительности изображаемых объектов, была высказана в работе (15). Первая голограмма естественного объекта (шахматных фигурок) была получена Э. Лейтом и Ю. Упатниексом в 1964 г. (14). Развитие голографической изобразительной техники пошло с тех пор по двум основным направлениям — по линии создания так называемых видовых голограмм и по пути развития метода, известного под названием композиционная голография.

Под термином «видовые голограммы» обычно понимают голограммы естественных объектов, предназначенные для показа на выставках, в музеях, а также художественные голограммы — копии произведений искусств, служащие для украшения интерьеров общественных зданий и частных квартир. Кроме того, к видовой голографии можно отнести также портретную голографию.

Принципиально в технике получения видовых голограмм мало что изменилось за последние годы: в США, Англии и Франции такие голограммы в основном получают по методу голографии с записью в двумерных средах. Реконструкция в этом случае, как правило, осуществляется с помощью монохроматического излучения ртутных ламп. В Советском Союзе видовые голограммы получают главным образом по методу записи в трехмерных средах. Такие голограммы можно реконструировать с помощью обычных ламп накаливания, что весьма удобно на практике.

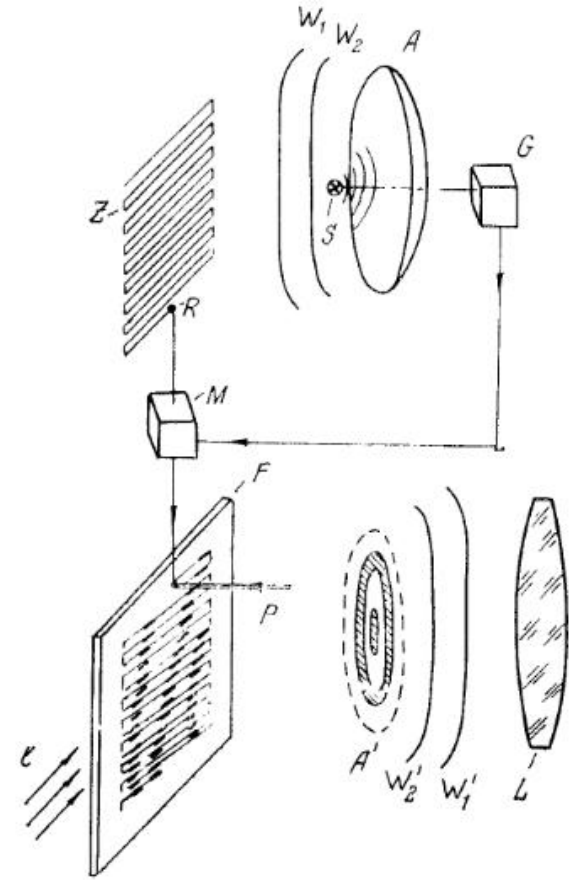

Рис. 45. Схема регистрации голограммы распределения поля СВЧ диапазона в раскрыве антенны A. Генератор G задает колебания, которые испускает в пространство излучатель S через антенну A. Поле вблизи раскрыва антенны сканируется приемником R по некоторой траектории Z. В смеситель M подаются сигналы приемника R и референтный сигнал генератора G. Результат интерференции этих сигналов модулирует световой пучок P, сканирующий фотопластинку F синхронно с движением приемника R. При реконструкции полученной таким образом голограммы пучком когерентного света l восстанавливается оптическая модель поля антенны как в раскрыве A, так и в пространстве (волны W_1' и W_2'). В фокальной плоскости линзы L получают оптическую модель распределения поля СВЧ в дальней зоне

Совершенствование видовой голографии в настоящее время идет в основном по линии улучшения лазеров и фотоматериалов. В результате этой не очень заметной повседневной работы размеры видовых голограмм возросли до нескольких метров и сами они имеют вид весьма эффектных объемных картин. Повсеместно проводятся выставки таких голограмм и организуются музеи для их показа (38, 39).

Регистрацию видовых голограмм осуществляют обычно с помощью газовых лазеров непрерывного действия. В этом случае съемка возможна только при условии исключения малейших перемещений объекта относительно фотопластинки. Для того чтобы выполнить это условие, объект и всю голографическую установку монтируют на массивной амортизированной плите. В качестве объектов при этом обычно выбирают жесткие изделия из металла, керамики и т. п.

Одна из основных перспектив видовой голографии — переход на съемку с помощью импульсных лазеров. Используя такую технику, можно регистрировать практически любые объекты, отказавшись от каких-либо плит, поскольку за короткое время вспышки лазера практически любой объект не успевает переместиться на сколько-нибудь заметную величину. Особенно интересна с точки зрения практики открывающаяся при этом возможность регистрации объемных голографических портретов. Первый такой портрет был получен в 1968 г. Л. Р. Зибертом (40). Известны и аналогичные отечественные работы (41). Дальнейшего развития техника регистрации голографических портретов пока что не получила отчасти из-за несовершенства импульсных лазеров, отчасти из-за ухудшения свойств фотоматериалов в условиях засветки импульсным излучением.

В последнее время в США достаточно широкое распространение получили так называемые радужные голограммы, которые хотя и записываются по двумерной схеме, однако допускают реконструкции источником со сплошным спектром (42). Принцип действия такой голограммы поясняется рис. 46. Перепечатывая изображение с одной голограммы на другую через узкую горизонтальную щель, можно получить такую голограмму H, которая при реконструкции излучением какой-то одной длины волны, например, красным излучением гелий-неонового лазера, из всех лучей, формирующих изображение объекта O, восстановит только те, которые проходят через узкую горизонтальную полоску t_1. Если такую голограмму восстановить излучением со сплошным спектром, то красная составляющая этого излучения восстановит лучи, образующие изображение объекта O и проходящие через го-

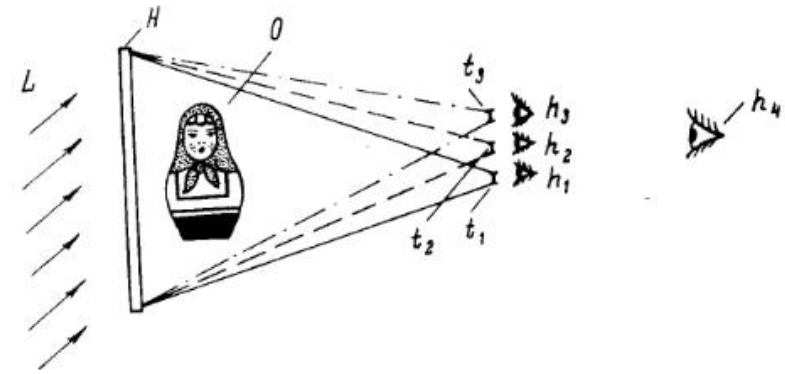

Рис. 46. Принцип действия «радужной голограммы». При восстановлении излучением со сплошным спектром красная составляющая этого излучения восстанавливает лучи, которые, формируя изображение объекта O, проходят через узкую горизонтальную полоску t, зеленая составляющая восстанавливает лучи, которые проходят через полоску t_2, синяя — лучи, проходящие через полоску t_3. Наблюдатель, находящийся в положениях h_1, h_2, h_3, видит красное, зеленое и синее изображения объекта соответственно. В положении h_4 наблюдатель видит верхнюю часть объекта через полоску t_3 окрашенной в синий цвет, т. е. верхняя часть объекта кажется ему синей, среднюю — через полоску t_2 (эта часть объекта кажется зеленой), нижнюю через полоску t_1 — т. е. она кажется красной

ризонтальную полоску t_1. Зеленая составляющая спектра отклонится голограммой на меньший угол и образует лучи, формирующие изображение того же объекта и проходящие через полоску t_2, смещенную вверх относительно полоски t_1, синяя составляющая восстановит изображение объекта в лучах, проходящих через полоску t_3. В результате наблюдатель h_1, глаза которого совмещены с полоской t_1, увидит красное изображение объекта, при перемещении в положение h_2 — зеленое и перемещении в положение h_3 — синее. Если, однако, наблюдатель h_n находится далеко от изображений полосок t_1, t_2, t_3, то он видит верхнюю часть объекта O через «синюю полоску», среднюю — через зеленую и нижнюю — через красную. Объект при этом оказывается окрашенным во все цвета радуги.

Наиболее существенный недостаток обычной видовой голографии заключается в том, что объект при съемке должен освещаться излучением лазера. При этом условии оказывается возможным записать голограмму скульптуры, портрета или даже сцены в небольшом помещении, однако возможность записи натурных сцен таких, как здания, ландшафты, при этом полностью исключена. В 1967 г. американский исследователь Р. В. Поль предложил так называемый метод композиционных голограмм (43), сочетающий голографию и метод интегральной фотографии Липпмана (44). Используя такой метод, можно получить голограммы, воспроизводящие объемные изображения предметов, освещенных естественным светом.

Сущность метода композиционных голограмм поясняется рис. 47 и 48. На этапе съемки сцена регистрируется методами обычной фотографии со многих точек зрения: dH_1, dH_2, dH_3, ... (рис. 47, *а*). В результате получают множество фотографий — ракурсов изображаемой сцены f_1, f_2, f_3, ..., на которых сцена зарегистрирована с различных сторон. В частности, в случае, изображенном на рисунке, на фотографии f_3 матрешка закрывает метлу, на фотографии f_1 конец метлы появляется над головой матрешки.

На этапе синтеза композиционной голограммы фотографии — ракурсы изображаемой сцены впечатываются на фотопластинку F в виде голограмм dH_1, dH_2, dH_3, ..., с помощью референтного луча R (рис. 47, *б*). При этом взаимное положение участков dH_1, dH_2, dH_3 ..., на которые впечатываются голограммы, выбирается так, чтобы оно точно совпадало со взаимным положением точек, из которых регистрировались соответствующие ракурсы изображаемой сцены.

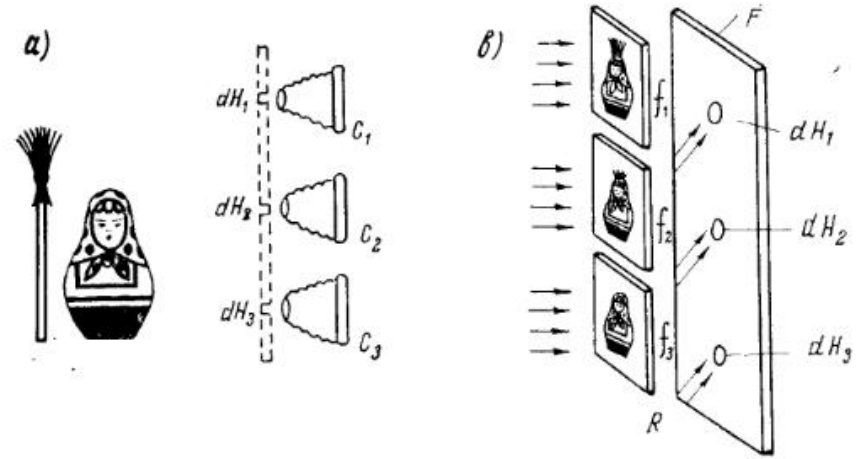

Рис. 47. Схемы регистрации и синтеза композиционной голограммы. На этапе съемки сцена регистрируется методами обычной фотографии из многих точек зрения dH_1, dH_2, dH_3 (*а*). В результате получают множество фотографий — ракурсов изображаемой сцены f_1, f_2, f_3, на которых эта сцена зарегистрирована с разных сторон. На этапе синтеза композиционной голограммы (*б*) фотографии — ракурсы изображаемой сцены впечатываются на фотопластинку F в виде голограмм dH_1, dH_2, dH_3... с помощью референтного луча R. При этом взаимное положение участков dH_1, dH_2, dH_3... выбирается так, чтобы оно точно совпадало со взаимным положением точек, из которых регистрировались ракурсы сцены

Принцип создания иллюзии предмета с помощью композиционной голограммы пояснен рис. 48. Голограмма реконструируется лучом R', совпадающим по направлению с референтным лучом, использовавшимся при съемке. Каждый из участков голограммы восстанавливает изображение зарегистрированного на ней ракурса предмета, в частности участок dH_1, восстанавливает изображение ракурса f_1, участок dH_2 — изображение ракурса f_2, и т. д. Поскольку положение участков голограммы с записанными на них ракурсами точно совпадает с положением точек, из которых эти ракурсы регистрировались, наблюдатель, перемещающийся относительно поверхности композиционной голограммы, регистрирует такую смену ракурсов, которая точно соответствует смене ракурсов при наблюдении реального предмета. В частности, в случае, изображенном на рисунке, в положении h_1 наблюдатель видит изображение ракурса f_3, восстановленное участком dH_3; перемещаясь в точку h_2, он видит через участок dH_2 изображение ракурса f_2. Это изображение уже несколько отличается от того, которое наблюдалось из точки h_1: как видно из рисунка, на ракурсе f_2 из-за головы матрешки начинает показываться конец метлы. На ракурсе f_3 метла выдвигается еще больше. Правильная закономерная смена ракурсов при изменении положения точки наблюдения относительно композиционной голограммы создает у наблюдателя впечатление, что он осматривает реальный предмет.

Техника синтеза композиционных голограмм весьма сложна и создаваемые ими изображения пока что недостаточно совершенны, однако нет сомнения, что именно этот метод открывает широкие перспективы внедрения голографии в изобразительную технику. В частности, композиционная голография может быть положена в основу создания голографического объемного кинематографа и телевидения, воспроизводящих полную иллюзию действительности изображаемой сцены.

Необходимость регистрации сцены при естественном свете — далеко не единственная трудность, возникающая при создании объемного кино и телевидения, не менее важно найти способы сокращения избыточности голографической записи. Сущность проблемы избыточности заключается в следующем. Как уже отмечалось ранее, даже на обычной видовой голограмме предметы записываются со всеми мельчайшими подробностями их структуры, например, такими как строение пор на коже человека. Это совершенно бесполезная для зрителя и очень большая по объему информация требует для своей записи существенного увеличения разрешающей спо-

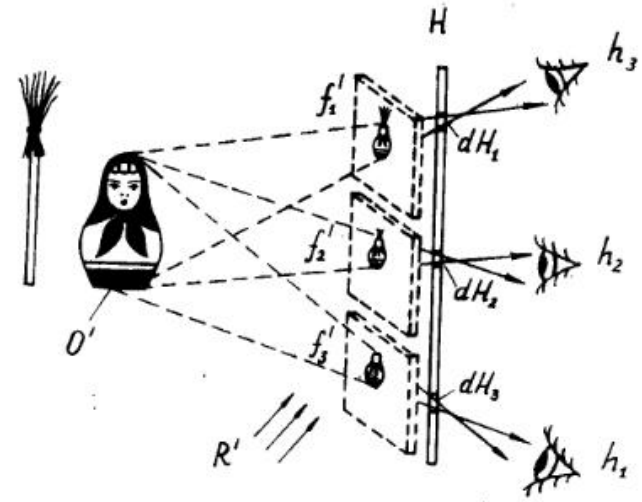

Рис. 48. К принципу создания иллюзии предмета с помощью композиционной голограммы. При реконструкции голограммы лучом R' каждый из ее участков dH_1, dH_2, dH_3 восстанавливает изображение зарегистрированного на ней ракурса (f_1, f_2, f_3 соответственно). Поскольку положение участков голограммы с записанными на них ракурсами точно совпадает с положением точек, из которых эти ракурсы регистрировались, то наблюдатель h при перемещении относительно поверхности композиционной голограммы регистрирует смену ракурсов, точно соответствующую смене ракурсов при перемещении точки зрения относительно реального предмета. В результате у наблюдателя создается впечатление, что он осматривает реальный предмет

собности фотоматериала, на котором регистрируется фильм, и, если речь идет о телевидении, соответственного расширения полосы частот телевизионного тракта. Сокращение избыточности голографической записи оказалось весьма сложной задачей, решение которой, по-видимому, следует искать на пути исследования закономерностей исходной системы ракурсов, регистрируемых на этапе съемки сцены (45).

Несмотря на всю сложность проблем, возникающих при создании объемного кино и телевидения, а также технологические трудности регистрации видовых голограмм, уже сейчас становится очевидным, что мы стоим на пороге создания голографической изобразительной техники, воспроизводящей полную иллюзию действительности изображаемых объектов. Широкое внедрение такой техники в жизнь должно существенно изменить образ жизни и психологию грядущих поколений и будет весомым вкладом в развитие человеческой культуры. Успехи в этой области, как, впрочем, и во всех остальных приложениях голографии существенно зависят от достижений в развитии главного инструмента современной оптики — оптических квантовых генераторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Stratton D. M. — „Psychol. Rev.", 1896, vol. 3, p 611.
2. Stratton D. M. — „Psychol. Rev.", 1896, vol. 4, p. 463.
3. Bequerel A. — „Annales de Chimie et de Physique", 3-eme serie, t. 22, № 25, p. 42.
4. Niepce N — „Compt. rend. l'Academie des Sciences Paris, 1851, bis 1866.
5. Lippman G. — „Journ de Phys.", 1894, vol. 3, p. 97.
6. Abbe E. Die Lehre von der Bildentstehung im Microskop. Braunschweig, 1910.
7. Boersch H. — „Techn. Phys." 1938, vol. 19, p. 337.
8. Bragg W. — „Nature", 1942, vol. 149, p. 470.
9. Gabor D. — „Nature", 1948, vol. 161, p. 777.
10. Gabor D. — „Proc. Roy. Soc." (London), 1949, vol. A197, p. 454.
11. Gabor D. — „Proc. Phys. Soc.", 1951, vol. B64, p. 449.
12. Leith E. N., Upatnieks J. — „J. Opt. Soc. Am.", 1962. vol. 52, p. 1124.
13. Leith E. N., Upatnieks J. — „J. Opt. Soc. Am.", 1963, vol. 53, p 1377.
14. Leith E. N., Upatnieks J. — „Opt. Soc. Am"., 1964, vol. 54. p. 1295.
15. Денисюк Ю. Н. — «ДАН СССР», 1962, т. 144, № 6, с. 1275.
16. Денисюк Ю. Н. — «Оптика и спектроскопия», 1963, т. 15, с. 523.
17. Денисюк Ю. Н. — «Оптика и спектроскопия», 1965, т. 18, с. 275.
18. Суханов В. И., Денисюк Ю. Н. — «Оптика и спектроскопия», 1970, т. 28, с. 126.
19. Денисюк Ю. Н. — «ЖТФ», 1974, т. XLIV, с. 131.
20. Cathey W. T. — „J. Opt. Soc. Am.", 1965, vol. 55, p. 457.
21. Rigler A. K. — „J. Opt. Soc. Am.", 1965, vol. 55, p. 1693.
22. Какичашвили Ш. Д. — «Квантовая электроника», 1974, т. 1, № 6, с. 1435.
23. Стаселько Д. И., Денисюк Ю. Н., Смирнов А. Г. — «Оптика и спектроскопия», 1969, т. XXVI, с. 413.
24. Стаселько Д. И., Денисюк Ю. Н. — «Оптика и спектроскопия», 1970, т. XXVIII, с. 324.
25. Meier R. W. — „J. Opt. Soc. Am.", 1965, vol. 55, p. 987.
26. Champagne E. B. — „J. Opt. Soc. Am.", 1967, vol. 57, p. 51.
27. Денисюк Ю. Н., Гальперн Д. Ю. — «Оптика и спектроскопия», 1969, т. XXVII, с. 176.

28. Powell, R. L., Stetson K. A. — „Journ. Opt. Soc. Amer.", 1965, vol. 55, p. 1593.
29. Александров Е. Б., Бонч-Бруевич А. М. — «ЖТФ», 1967, т. 37, с. 360.
30. Mclauley D. G., Sinpson C. B., Murbach W. I. — „Appl. Opt.", 1973, vol. 12, № 2, p. 232.
31. Labeyrie A., Flemand I. — „Optics commun", 1969, vol. 1, p. 5.
32. Groh G. — „Appl. Opt." 1968, vol. 7, p. 1643.
33. Kogelnik H., Pennington K. S. — „Journ Opt. Soc. Amer.", 1968, vol. 58, p. 273.
34. Van Heerden P. I. — „Appl. Opt.", 1963, vol. 2, p. 393.
35. Vander Lugt A., Rotz F. B., Klooster A. In Optical Information Processing ed. I. T. Tippet et al. Cambridge Mass, 1965.
36. Smits F. M., Gallaher L. E. — „Bell. Syst. Tech. Journ.", 1967, vol. 46, 1267.
37. Бахрах Л. Д., Курочкин А. П. — «ДАН СССР», 1966, т. 171, № 6, с. 1309.
38. Benton S. A. — „Appl. Opt.", 1975, vol. 14, № 12, p. 2795.
39. Kramer H. — „Appl. Opt.", 1975, vol. 14, № 12, p. 2796.
40. Siebert L. D. — „Proc. IEEE", 1968, vol. 56, № 7, p. 1242.
41. Стаселько Д. И., Денисюк Ю. Н., Смирнов А. Г. — «Журн. научн. и прикладн. фотографии и кинематографии», 1970, № 2, с. 147.
42. Benton S. A., Mingace H. S. — „Appl. Opt.", 1970, vol. 9, № 12, p. 2812.
43. Pole R. V. — „Appl. Phys. Letters", 1967, vol. 10, № 1, p. 20.
44. Lippman G. — „C. R. Acad. Sci", 1908, vol. 146, p. 446.
45. Денисюк Ю. Н. — «Журн. технич. физики», 1975, т. XLV, № 12, с. 2574.

Книги по голографии

1. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. «Мир», 1973.
2. Строук Дж. Введение в когерентную оптику и голографию. «Мир», 1967.
3. Вьеио Ж.-Ш., Смигильский П., Руайе А. Оптическая голография, ее развитие применение. «Мир», 1973.
4. Островский Ю. И. Голография и ее применение. Л., «Наука», 1973.

СОДЕРЖАНИЕ

стр.

Глава I. **Фундаментальные явления, лежащие в основе голографии** 3
§ 1. Образ объекта и возможности его воспроизведения . . . 3
§ 2. Некоторые элементы волновой теории света 16

Глава II. **Истоки голографии в области фотографии и инструментальной оптики** 31
§ 1. Отображение спектрального состава излучения объемной картиной стоячих волн (метод цветной фотографии Липпмана) 31
§ 2. Связь структуры оптического изображения со значениями поля на поверхности (теория возникновения изображения в микроскопе Э. Аббе) 42

Глава III. **Отображение волновых полей и объектов с помощью голограммы** 47

Введение 47
§ 1. Отображающие свойства двумерного сечения картины стоячих волн 48
§ 2. Отображающие свойства объемной картины стоячих волн 56

Глава IV. **Основные свойства голограммы** 67

Введение 67
§ 1. Влияние свойств регистрирующей среды на голограмму . . 67
§ 2. Влияние когерентных свойств записывающего источника излучения на голограмму 75
§ 3. Трансформационные свойства голограммы 84
§ 4. Некоторые специфические свойства голограммы 94

Заключение 102
Методы голографии и перспективы ее практического применения

Литература 123