

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

77.01

**ФОТОГРАФИРОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРА \*)***Э. Лейт, Ю. Упатниекс*

Оптический принцип фотографирования, несмотря на постоянное улучшение фотографической техники и изобретение новых фотографических материалов, мало изменился в течение последних 100 лет. Фотографический процесс состоит, по существу, в том, что на светочувствительной поверхности регистрируется двумерное изображение освещенной трехмерной картины. Отраженный объектами картины свет фокусируется на чувствительную поверхность с помощью какого-либо устройства, способного строить изображение. Это либо сложная система линз, либо просто маленькое отверстие в непрозрачном экране (см. рис. 5).

Принцип фотографирования, изложенный в статье, ничего общего с этим не имеет. Предложен этот принцип менее 20 лет назад. В этом процессе, который можно назвать фотографированием посредством восстановления волнового фронта, регистрируется не изображение фотографируемого объекта, а отраженные световые волны. Фотоснимок, представляющий собой мешанину из крапинок, маленьких кружочков и розеток, называется голограммой \*\*); снимок не имеет никакого сходства с оригиналом и тем не менее содержит более полную, особым оптическим способом закодированную информацию относительно объекта, чем та, которая содержится в обычной фотографии, и, сверх того, содержит много дополнительной информации, которую невозможно зарегистрировать с помощью любого другого фотографического процесса.

Образование видимого изображения из голограммы известно под названием процесса восстановления. На этой стадии зафиксированные волны фактически рождаются на голограмме, после чего распространяются далее, как бы «забыв» о существовании определенного промежутка времени в своей истории. Восстановленные волны неотличимы от первоначальных и способны порождать все те явления, которые были характерны для первоначальных волн. Эти волны, например, можно собрать в точку с помощью линзы, и при этом образуется изображение исходного объекта, даже если объекта давно уже нет на прежнем месте. Если восстановленные волны попадают в глаз наблюдателя, их действие в точности подобно

\*) Emmett N. Leith, Juris U p a t n i e k s, Photography by Laser, Scientific American 212(6), 24 (1965). Перевод и примечания В. С. Зуева.

В оригинале — резюме: «О новом способе фотографирования, основанном на применении когерентного света лазера, при котором на светочувствительной пленке регистрируется не изображение, а фактически сами световые волны».

\*\*) Название принадлежит автору нового метода фотографирования Д. Габору (см. далее в тексте). Этим словом Д. Габор называет фотографию дифракционной картины.

тому, какое оказывали первоначальные волны: наблюдатель видит, по всем признакам, сам исходный трехмерный объект, обнаруживает параллакс (очевидное смещение объекта при наблюдении с различных точек зрения) и много других эффектов, которые наблюдаются при нормальном процессе «видения».

Процесс восстановления волнового фронта был открыт в 1947 г. Дэнисом Габором, сотрудником Имперского колледжа наук и технологии в Лондоне. В течение последующих нескольких лет Габор систематически развивал свой метод, особенно интересуясь его применениями в электронной микроскопии. Значительные вклады в развитие этого метода были сделаны многочисленными другими исследователями во всем мире — особенно Гусейном М. А. Эль-Сумом и Полем Киркпатриком (Стэнфордский университет), но их усилия были затруднены отсутствием необходимого источника когерентного света, такого света, волны которого имеют одну фазу. Изобретение лазеров в 1960 г. открыло путь к новым успехам фотографии методом восстановления волнового фронта. Используя газовый лазер в качестве источника когерентного света, а также некоторые другие, ранее не испытанные методики, нам в нашей лаборатории в университете Мичигана удалось получить высококачественные трехмерные голограммные изображения. В результате проведенных нами исследований и отчасти благодаря еще недостаточно изученным возможностям лазера как источника когерентного света сейчас наблюдается значительный подъем интереса к возможным применениям этого увлекательного фотографического метода.

С точки зрения оптики имеются три основных отличия фотографии по методу восстановления волнового фронта от принципа обычной фотографии. Как и при обычном фотографировании, освещенный объект и фотографическая пластинка располагаются так, что отраженный объектом свет попадает на пластинку. Однако, в отличие от обычного способа, не применяются никакие линзы или другие, способные строить изображение, устройства. Никакого изображения, следовательно, не образуется. Наоборот, рассеянный каждой точкой объекта свет освещает всю поверхность фотографической пластинки, а каждая точка пластинки подвергается засветке от всего объекта (см. рис. 5).

Второе отличие от обычной фотографии состоит в применении когерентного света для освещения объекта; третье отличие заключается в использовании зеркала для отклонения некоторой части когерентного света непосредственно на пластинку, минуя объект. Этот пучок называется опорным пучком; с помощью него, благодаря интерференции, образуется видимое изображение волновой картины рассеянного объектом света.

Рассеянные световые волны подобно любым другим волнам характеризуются своей амплитудой (или интенсивностью) и фазой (или частотой). В случае точечного рассеивающего центра рассеянные волны света распространяются наружу по отношению к своему источнику в виде последовательности постоянно расширяющихся сферических оболочек, называемых волновыми фронтами \*), концентричных по отношению к точке истока. Эти сферические волны являются трехмерным аналогом круговых волн, которые появляются на спокойной поверхности воды от брошенного

---

\*) В силу того, что статья рассчитана на широкий круг читателей, авторы (чтобы не входить в подробности) не всегда точно употребляют установившиеся физические термины и определения. Но поскольку всякое новое вводимое понятие авторы определяют и затем на протяжении изложения уже не выходят за рамки сделанного определения, мы считали при переводе целесообразным придерживаться терминологии авторов.

в воду камня. Если рассеивающий объект не точечный, а достаточно сложный, его можно рассматривать как совокупность большого числа точек, а результирующую волновую структуру, возникающую в результате рассеяния на поверхности объекта, рассматривать как сумму большого числа сферических волн, каждая из которых оказывается концентричной относительно своей точки истока (см. ниже, рис. 6). Точная форма волновой картины света, рассеянного протяженным объектом с хаотической структурой, чрезвычайно сложна и не может быть рассмотрена здесь в деталях.

Центральная проблема фотографии методом восстановления волнового фронта заключается в записи этой сложной картины, содержащей

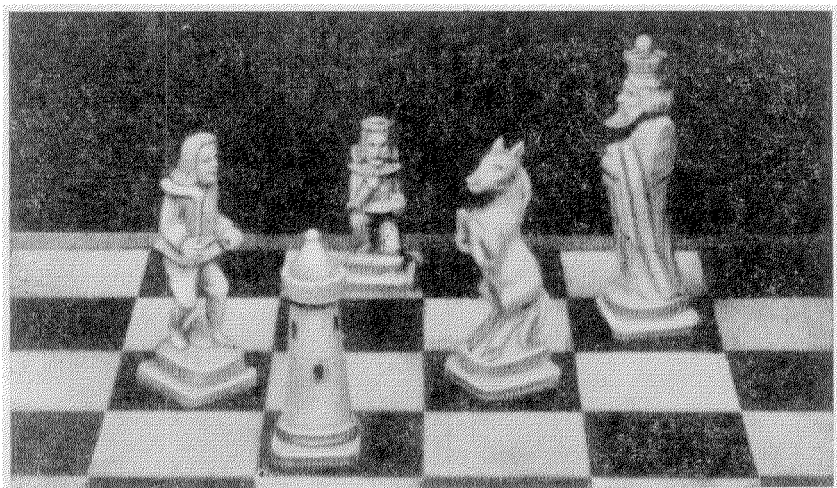


Рис. 1. Обычная фотография шахматной доски с несколькими фигурами, освещенной обычным некогерентным светом.

Двумерное изображение сцены фиксировалось на фотографической пленке. Свет, рассеянный шахматными фигурами, фокусировался на пленку с помощью линзы.

информацию об объекте, в том виде, в каком она существует в данной плоскости в некоторый момент времени. Такую запись можно назвать «замораживанием» волновой картины; картина остается замороженной до тех пор, пока кто-либо не пожелает оживить процесс, после чего волны можно «истолковать» какой-либо регистрирующей средой. Чтобы полностью зафиксировать волновую картину, на регистрирующей поверхности необходимо зарегистрировать как амплитуду, так и фазу волн. Регистрация амплитуды волн не представляет серьезных затруднений; обычная фотографическая пленка регистрирует амплитуду, преобразуя ее значения в соответствующее почернение фотографической эмульсии. Однако эмульсия совершенно нечувствительна к фазовым соотношениям, поэтому следует вооружиться соответствующим устройством, которое может преобразовать эти фазовые соотношения к форме, которую возможно зарегистрировать фотографически.

В фотографии методом восстановления волнового фронта фазовые соотношения становятся доступными для регистрации на фотографической пластинке с помощью интерферометрической техники — стандартного и давно разработанного способа преобразования фазовых соотношений в соответствующие амплитудные. Мы прежде всего рассмотрим, как это осуществляется в сравнительно простом случае, в котором два

коллимированных световых пучка, волновые фронты которых образуют последовательность плоскостей, перпендикулярных к направлению пучков, взаимодействуют, образуя характерную интерференционную картину; в соответствии с формой их волновых фронтов такие волны называются плоскими.

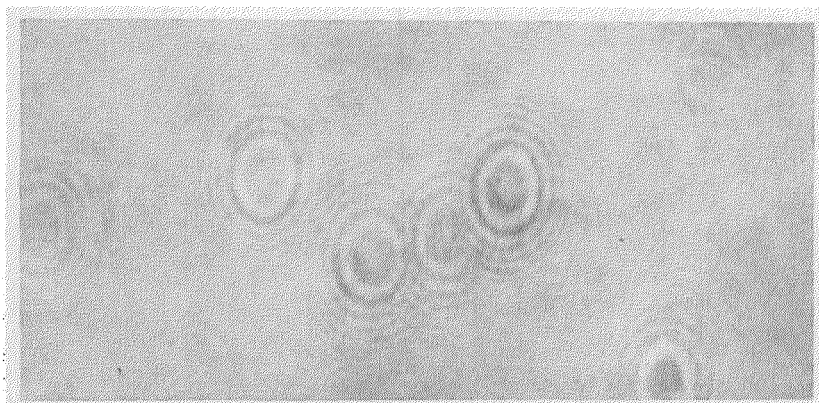


Рис. 2. Голограммная запись сцены, показанной на фотографии рис. 1, полученная на первой стадии фотографии по методу восстановления волнового фронта.

Рисунок на голограмме не имеет никакого сходства с исходной сценой, но содержащаяся в нем информация о сфотографированной сцене значительно полнее той, которая содержится в обычной фотографии. Голограммы, приведенные в статье, изготовлены Альбертом Фризенем, Мичиганский университет.

Если две плоские волны, порожденные одним источником, попадают под различными углами на непрозрачную поверхность, они образуют

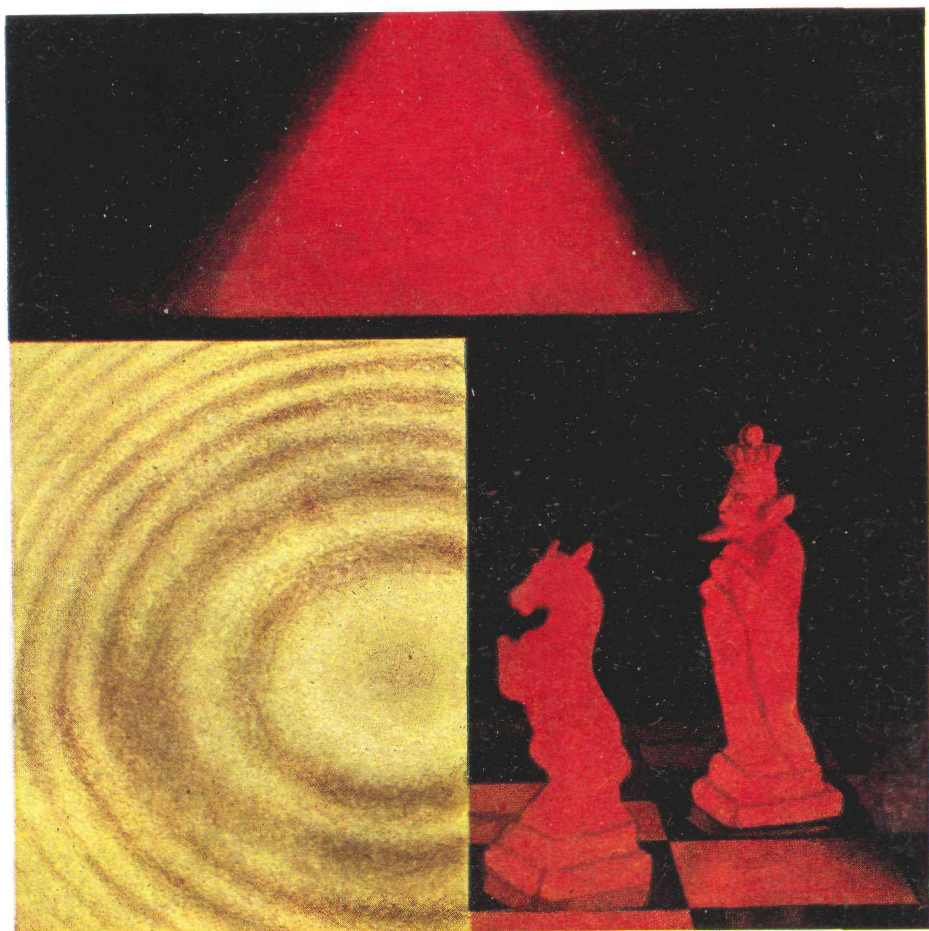


Рис. 3. Восстановленное изображение было получено при освещении голограммы лучом лазера.

Восстановленные волны были направлены на линзу, в фокусе которой возникло изображение исходной сцены, несмотря на то, что шахматных фигур на прежнем месте уже не было.

на поверхности систему однородных, параллельных интерференционных полос. Расстояние между полосами будет зависеть только от угла между волнами. Некоторых точек поверхности волны будут достигать в фазе,





Фотография, полученная с помощью лазера.



и их амплитуды будут складываться, давая в результате свет большей интенсивности, чем тот, который бы давала каждая волна в отдельности. Этот процесс называется интерференционным усилением света; он ответствен за яркие полосы в интерференционной картине. Других точек волны будут достигать в противофазе и, складываясь, будут уничтожать друг друга, причем уничтожение будет полным, если две волны равны по амплитуде. Этот процесс называется интерференционным гашением; он ответствен за темные полосы в интерференционной картине. Там, где волны не в фазе и не в противофазе, результирующая интенсивность света и соответствующий тон полос являются промежуточными между двумя этими крайними случаями.

Фотоснимок такой полосатой картины будет иметь структуру подобно решетке, которую можно рассматривать как двумерный аналог синусоидальной волны, порождаемой электрическим генератором. Наиболее существенный аспект этой аналогии заключается в том, что подобно тому, как может быть промодулирована электрическая волна, чтобы служить носителем некоторой информации (звуковой, например), так и возникшая с помощью интерференции волновая картина может быть промодулирована с той целью, чтобы служить носителем информации относительно световых волн, порождающих модуляцию.

Какую-либо модуляцию несущей волны можно осуществить различными способами, но самыми известными и самыми распространенными являются амплитудная (АМ) и частотная (ЧМ) модуляции. При амплитудной модуляции информация накладывается на несущую волну посредством изменения амплитуды волны в такт с некоторой низкочастотной волной (см. рис. 8). При частотной модуляции амплитуда несущей волны остается неизменной, но расстояние между различными циклами волны изменяется. Это явление может быть представлено как изменение частоты волн: в некоторых положениях циклы сгущаются и частота соответственно увеличивается, в других же положениях циклы разрежаются и частота уменьшается. Этот тип модуляции, с другой стороны, можно представить как фазовую модуляцию, поскольку в каждый данный момент фаза, или относительное расположение горбов и впадин волны по отношению к некоторой стационарной точке, отличается от той, какая существовала бы в отсутствие модуляции (несмотря на то, что частотная и фазовая модуляции не вполне идентичны, технические различия здесь незначительны и ими можно пренебречь).

Когда рассеянная сложным объектом волна с нерегулярной волновой картиной интерферирует с плоской волной, результирующая интерференционная картина, вместо того чтобы быть однообразной, становится нерегулярной благодаря нерегулярности попавших на пластинку волновых фронтов. Там, где несущие сигнал волны имеют наибольшую амплитуду, интерференционные полосы наиболее контрастны, а там, где амплитуда сигнальной волны мала, контраст минимальный.

Так изменения амплитуды рассеянной объектом волны производят соответствующие изменения контраста зафиксированной картины полос.

Как мы уже отмечали, расстояние между полосами связано с углом между сигнальной и опорной волнами. В тех местах, где сигнальная волна образует большой угол с опорной волной, результирующая картина полос имеет сравнительно мелкую структуру; там, где волны встречаются под меньшими углами, картина полос более крупная. Поэтому изменения фазы сигнальной волны приводят к соответствующему изменению величины промежутков между полосами на фотоснимке.

Короче говоря, мы сделали два существенных наблюдения: как амплитуду, так и фазу сигнальной волны можно зафиксировать в виде модуляции

контраста и взаимного расположения зарегистрированных интерференционных полос. Всю информацию, которую могут нести световые

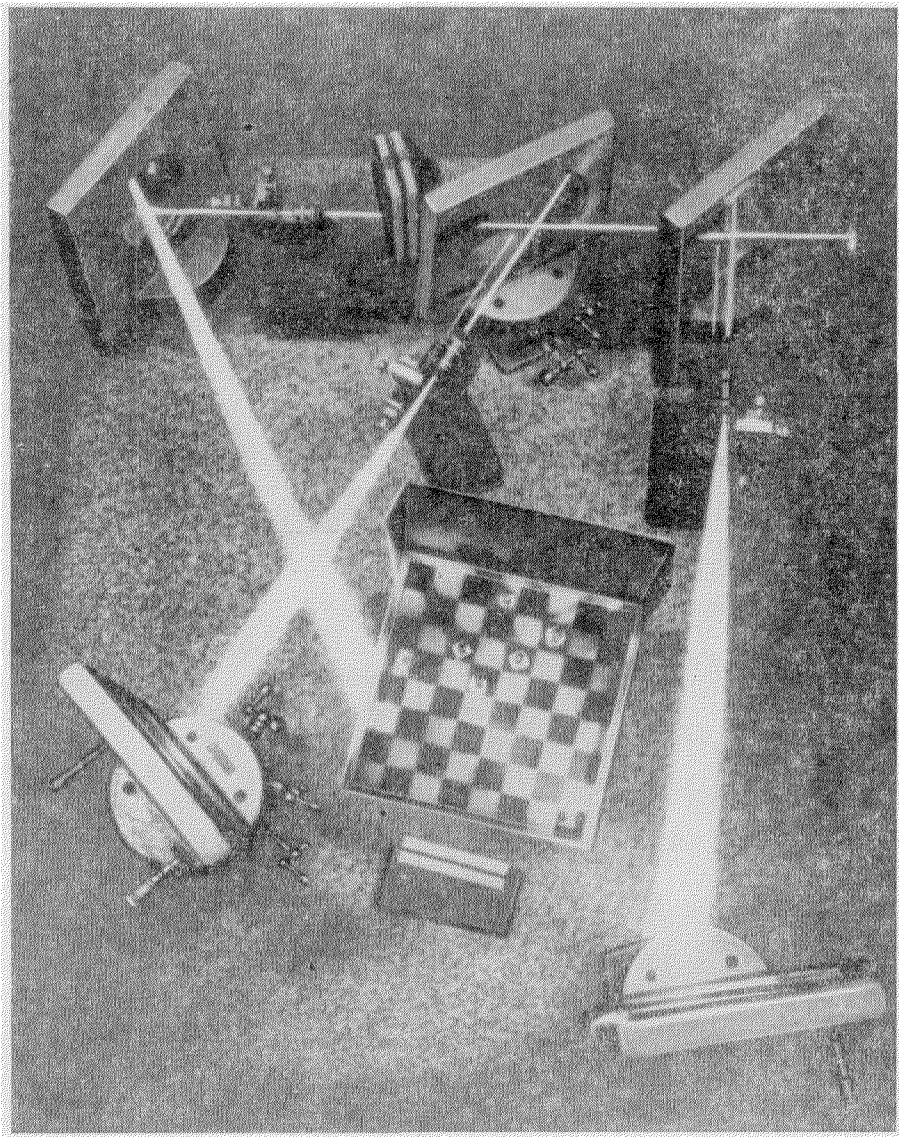


Рис. 4. Устройство для фотографирования, применявшееся на первой стадии процесса восстановления волнового фронта.

Фотография сделана в лаборатории авторов в Мичиганском университете. Лазерный луч входит в устройство в правой верхней части фотографии. Он сразу же попадает на два полупрозрачных зеркала. Отраженные части луча вновь отражаются от двух зеркал (внизу, слева и справа) и освещают, наконец, шахматную доску (в центре.) Проходящая часть луча, называемая опорным лучом, направляется еще одним зеркалом (вверху слева) непосредственно на поверхность голограммы (похожий на сэндвич предмет внизу в центре). Каждый из лучей проходит через линзу от микроскопа, которая расширяет его, но не изменяет его свойств в отношении когерентности.

волны, рассеянные объектом, можно записать на интерференционной решетке, возникающей при интерференции этих волн с наклонно падающей плоской волной.

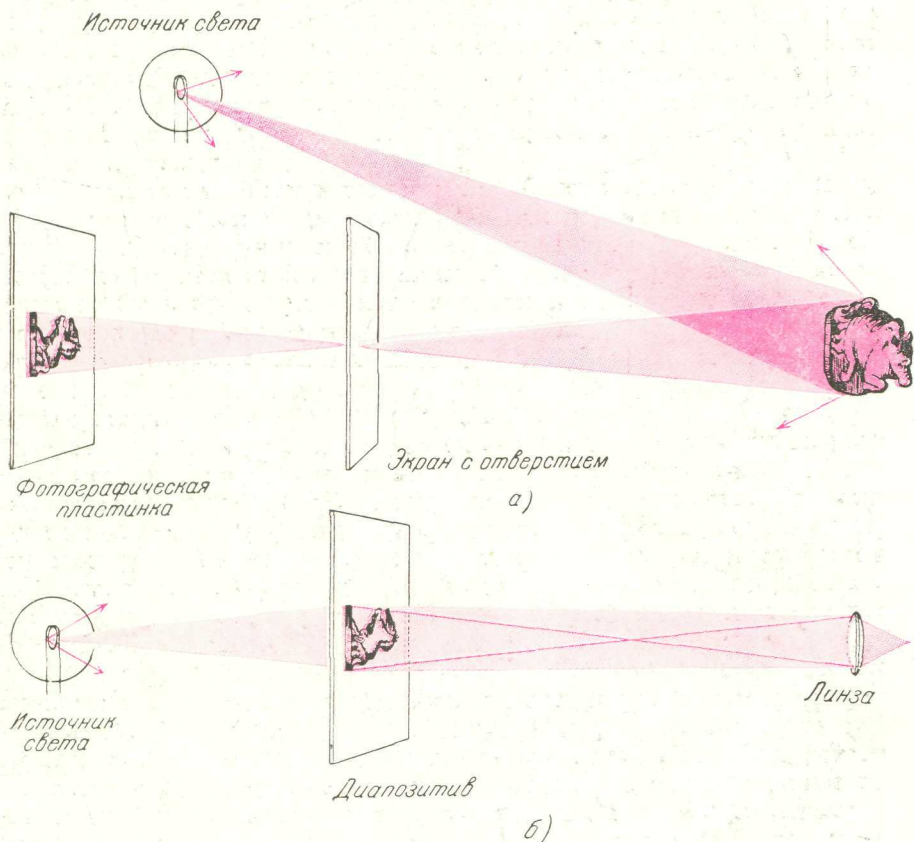
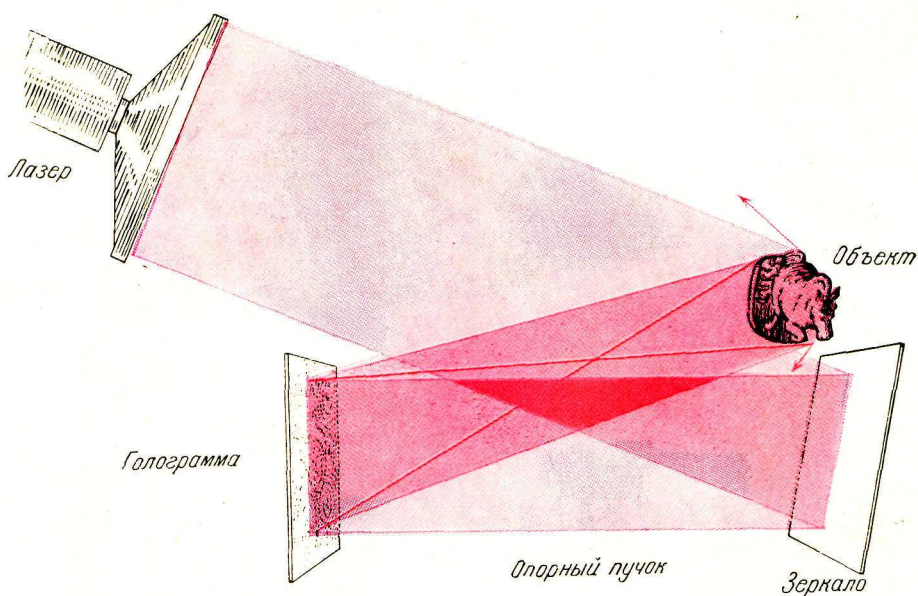


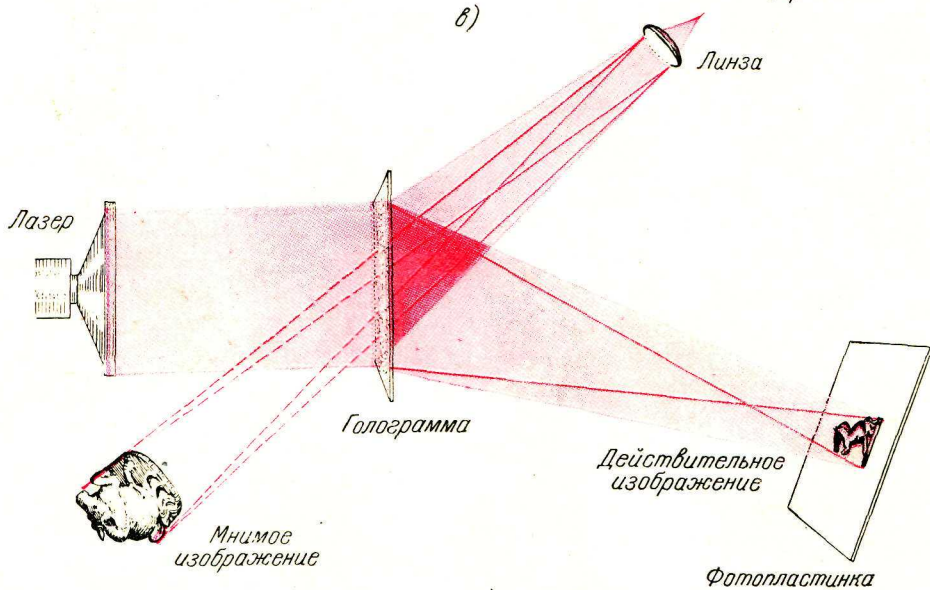
Рис. 5, а — б. Различия между обыкновенной фотографией и фотографией по методу восстановления волнового фронта.

Обычный способ фотографирования заключается в фиксировании трехмерного освещенного объекта в виде двумерного изображения на светочувствительной поверхности (а). Свет, рассеянный объектом, фокусируется на поверхность с помощью какого-либо, способного формировать изображение, устройства, в качестве которого может служить просто маленькое отверстие в непрозрачном экране. Когда фотоснимок освещается обычным, некогерентным светом (б), глаз видит только двумерное изображение исходного объекта.





б)



г)

Рис. 5, в — г. Различия между обыкновенной фотографией и фотографией по методу восстановления волнового фронта.

На стадии изготовления фотоснимка методом восстановления волнового фронта (в) линзы или какие-либо аналогичные устройства не применяются, и, следовательно, никакого изображения не образуется. Дело в том, что каждая точка объекта рассеивает свет на всю голограмму, и, наоборот, каждая точка голограммы получает свет со всего объекта. Опорный луч дает с помощью интерференции, видимую развертку волновой картины света, попавшего на голограмму после рассеяния на объекте. На стадии восстановления (г) голограмму освещают коллимированным пучком монохроматического света, и дифракционные волны «первого порядка», возникающие на системе интерференционных полос голограммы, дают два изображения. Один дифракционный порядок состоит из волн, которые кажутся исходящими из несомненно существующего объекта, расположенного в том месте, где находился исходный объект. Принято говорить, что эти волны дают мнимое изображение. Другие дифракционные волны первого порядка имеют сопряженную или обратную кривизну. Эти волны дают действительное изображение, которое можно сфотографировать непосредственно, без помощи линзы, просто поместив фотопластинку в то место, где находится изображение.



Голограмма, изготовленная только что описанным способом, во многом подобна решетке, изготавливаемой на делительной машине. Существуют, однако, некоторые существенные особенности, наиболее важная из которых — нерегулярность решетки на голограмме в противоположность строгой однородности, достигаемой на высококачественных нарезных решетках. В то время как ненамеренно возникающие нерегулярности изготовленных несовершенным способом нарезных решеток приводят

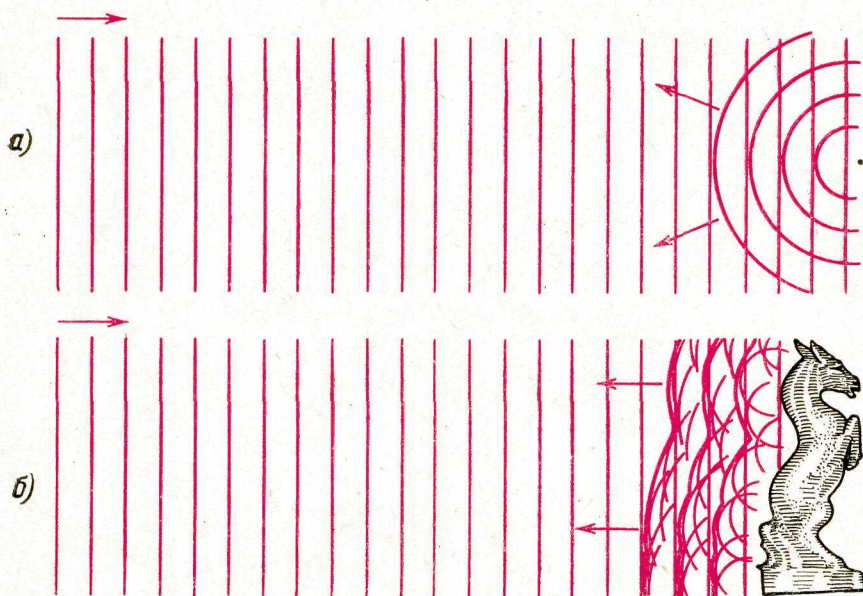


Рис. 6. Световые волны преобразуются точечным рассеивателем (а) в серию непрерывно расходящихся сферических поверхностей, называемых волновыми фронтами.

Последовательность волновых фронтов концентрична относительно точки возникновения. Если рассеивающий объект сложный (б), его можно рассматривать как набор из большого числа точек; результирующую волну, рассеянную поверхностью объекта, можно рассматривать как сумму большого числа сферических волн, каждая из которых является концентричной относительно своей точки возникновения. Основная проблема фотографии методом восстановления волнового фронта заключается в регистрации этой картины в таком виде, в каком она существует в данной плоскости в данный момент времени.

к появлению ложных спектральных линий, называемых «дұхами», намеренно вызванные нерегулярности на голограмме приводят к образованию на стадии восстановления хорошо идентифицируемого изображения.

Когда решетка, образованная неравномерно расположенными прозрачными и непрозрачными продольными штрихами, освещается коллимированным пучком монохроматического света, благодаря взаимодействию света с решеткой возникает большое число плоских волн (см. правую часть рис. 9, а). Эти плоские волны излучаются под различными углами, которые определяются расстоянием между штрихами. Волна «нулевого порядка» распространяется в том же направлении, что и падающая волна. Ее можно рассматривать просто как ослабленную падающую волну. Кроме того, имеются две дифракционные волны первого порядка, по одной с каждой стороны от волны нулевого порядка. Кроме них, наблюдаются дифракционные волны второго, третьего и более высоких порядков.

Явление генерации этих дифракционных волн можно легко объяснить, если полагать, что прозрачные штрихи являются источниками цилиндрических волн. Эти элементарные волны усиливают друг друга по определен-



ным направлениям, что приводит к появлению различных дифракционных порядков. Направления усиления получаются, если нарисовать касательные к фронтам различных элементарных волн. Волна нулевого порядка образуется в результате сложения волновых фронтов, которые образовались на штрихах решетки в одно и то же время и поэтому находятся на одном расстоянии от поверхности решетки. Если провести касательную к фронтам всех этих цилиндрических волн, то получится волна нулевого

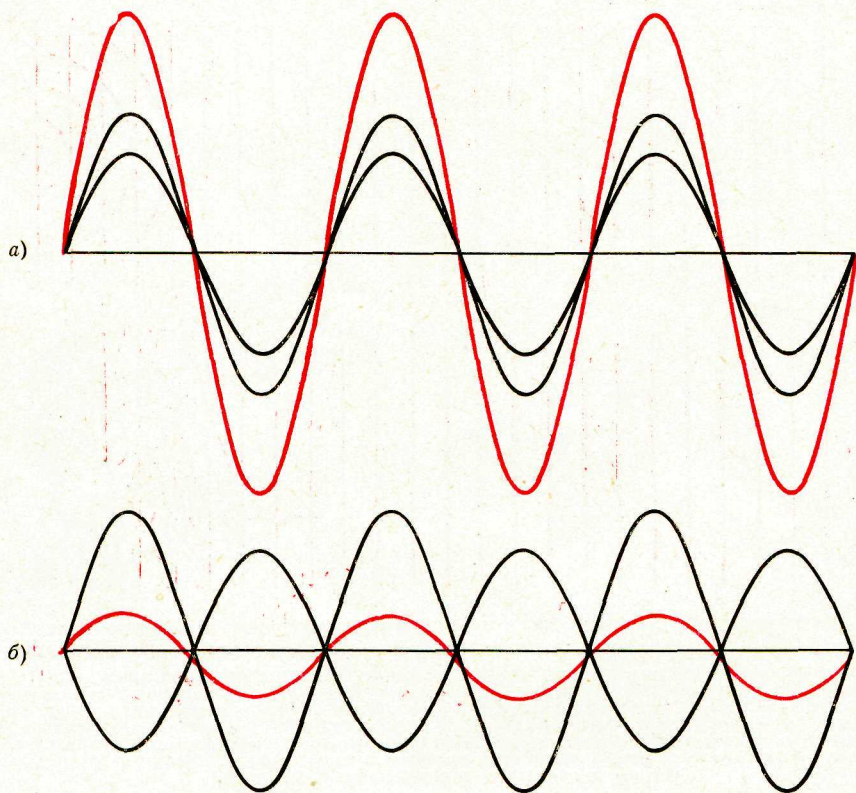


Рис. 7. Два типа интерференции световых волн.

Если две световые волны различной амплитуды оказываются на регистрирующей поверхности в фазе (а), их амплитуды будут складываться и результирующая интенсивность света (цветная кривая на рисунке а) будет больше, чем интенсивность каждой из волн в отдельности. Этот процесс называется интерференционным усилением: он ответствен за светлые полосы в интерференционной картине. Если световые волны оказываются не в фазе (б), они будут гасить друг друга. Этот процесс называется интерференционным гашением, он ответствен за темные полосы в интерференционной картине.

порядка. Эта волна параллельна поверхности решетки. Одна из дифракционных волн первого порядка образуется посредством сложения фронта элементарной волны от одного штриха с предшествующим волновым фронтом от близлежащего штриха, а тот в свою очередь складывается со следующим, соответственно опередившим его волновым фронтом от следующего штриха, и так далее. Вторая дифракционная волна первого порядка образуется подобным же способом, но в противоположном направлении. Дифракционные волны второго порядка образуются путем сложения волновых фронтов (от ближайших соседних штрихов), отстоящих друг от друга на две длины волны, и так далее. Исходя из рассмотренного метода построения, можно сделать вывод, что чем меньше расстояние между штрихами решетки, тем больше угол дифракции. Когда расстоя-



ние, т. е. фаза, между штрихами решетки меняется нерегулярным образом, так что в некоторых местах расстояние между штрихами больше, а в других меньше, местные изменения расстояния между штрихами приводят к местным изменениям в направлении дифракционных волн. Аналогично, местные изменения контраста или амплитуды полос приводят к местным изменениям амплитуды или интенсивности дифракционной

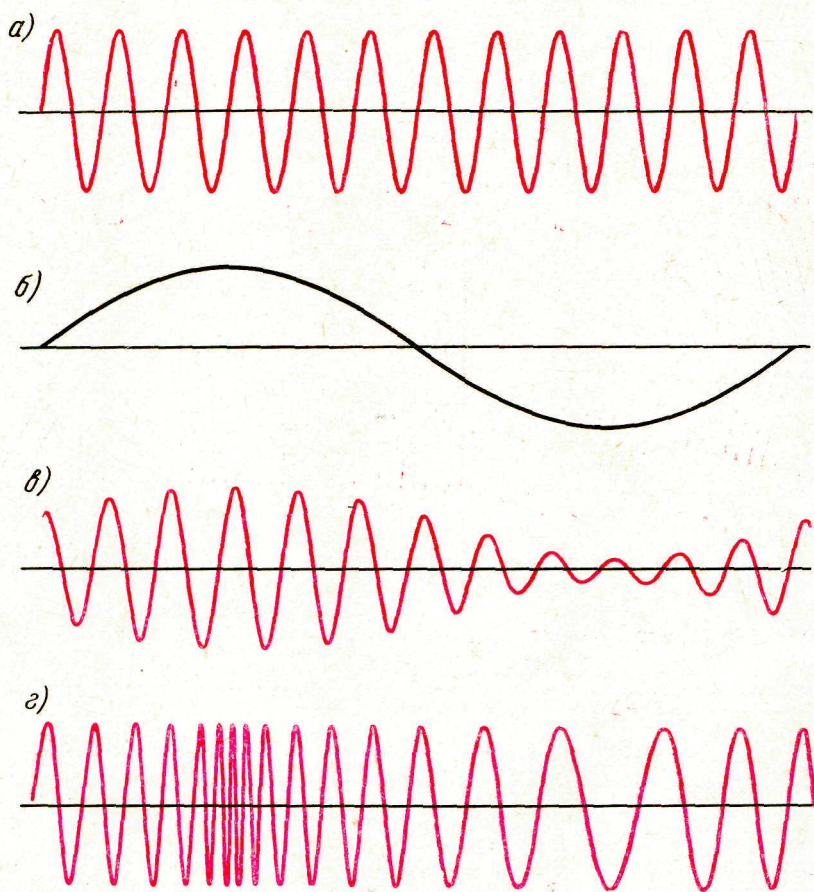


Рис. 8. Волны переносят информацию различным способом.

Хорошо известными и широко применяемыми методами являются амплитудная модуляция (АМ) и частотная, или фазовая, модуляция (ЧМ). При амплитудной модуляции (в) информация наложена на несущую волну (а) путем изменения ее амплитуды в такт с некоторой низкочастотной волной (б). При частотной модуляции (г) амплитуда несущей остается постоянной, но расстояние между периодами изменяется.

волны. Таким образом, возмущения фронта дифракционной волны связаны простым и легко предсказываемым способом с возмущениями, как амплитудными, так и по расстоянию, картины полос на голограмме.

Напомним теперь, что эта нерегулярность полос возникла благодаря местным изменениям амплитуды и направления несущих сигнал волновых фронтов, попавших на плоскость голограммы в момент, когда голограмма экспонировалась.

Таким образом, существует некая обратимость процессов: искажения фронта дифракционных волн, вызванные нерегулярной структурой полос, в точности совпадают с искажениями первоначальной волны,



породившей искаженные полосы. При обсуждении принципа изготовления голограммы мы уже отмечали, что полосы наиболее тесно расположены там, где фронт сигнальной волны образует наибольший угол с фронтом опорной волны, а эти части решетки на голограмме в свою очередь дают дифракционную волну под наибольшим углом.

В самом деле, принцип возникновения дифракционных порядков с помощью дифракционной решетки на голограмме является, по существу, процессом, обратным к эффекту образования интерференционной картины, которая фиксируется на голограмме. Сходство этих двух процессов остается справедливым и при более грубой основе, чем та, которой мы пользовались при нашем рассмотрении. Это сходство является ключевой идеей, лежащей в основе процесса восстановления волнового фронта.

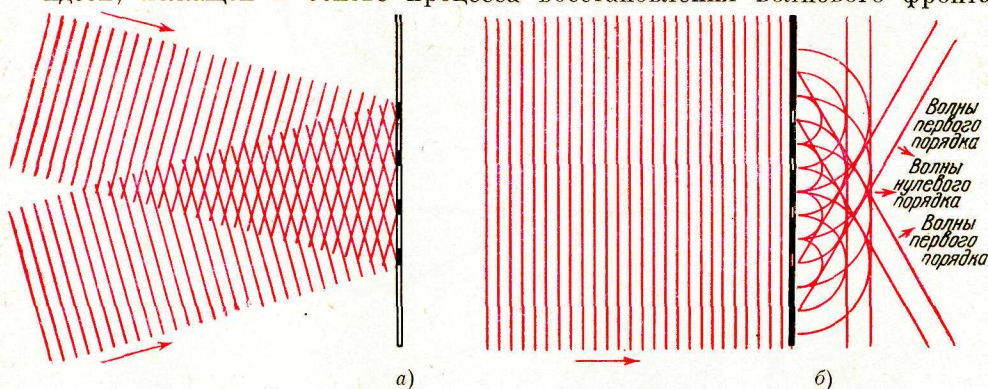


Рис. 9. Однородные параллельные полосы возникают при интерференции двух плоских волн, вышедших из одного источника и попавших на поверхность непрозрачного экрана под различными углами (а).

Расстояние между полосами зависит только от угла между волнами. Когда такая решетка освещается пучком когерентного света (б), в результате взаимодействия света с решеткой возникает большое число плоских волн. Волна «нулевого порядка» распространяется в том же направлении, что и падающая волна. Ее можно рассматривать как ослабленную часть падающей волны. Кроме волны первого порядка, наблюдаются волны второго, третьего и более высоких порядков.

Каждый из двух наборов дифракционных волн первого порядка, создаваемых голограммой, является точной копией волн, рассеянных исходным объектом. Эти волны распространяются наружу от голограммы и ведут они себя во всех отношениях так, как будто бы первоначальные волны не подвергались вмешательству фотографической пластинки, установленной на их пути. Линзы, помещенные на пути дифракционных волн, могут собирать их в фокус, образуя тем самым изображение исходного объекта даже в том случае, когда объект уже отсутствует.

В одном важном отношении две дифракционные волны первого порядка отличаются друг от друга. Один дифракционный порядок состоит из волн, которые кажутся исходящими из видимого объекта, находящегося там, где находился исходный объект. Мы говорим, что эти волны дают мнимое изображение подобно мнимому изображению, которое получается в зеркале. Другие дифракционные волны первого порядка являются также точной копией первоначальных волн, за исключением того, что они имеют сопряженную или обратную кривизну: первоначально расходящиеся сферические волны от точки на объекте преобразованы в сходящиеся сферические волны. Эти волны дают действительное изображение, которое можно непосредственно сфотографировать без линз, путем помещения фотографической пластинки в то место, где расположено изображение.

Голограммы и изображения, которые они образуют, обладают многими удивительными и просто очаровывающими свойствами. Например, голо-



грамма рис. 2 совершенно невразумительна и не дает никакого намека на изображение, скрытое в ней. При беглом ее осмотре хочется отождествить видимую структуру (концентрические кольца, пятна) с определенными частями объекта. Но такое отождествление было бы совершенно неверным. Видимая структура не имеет отношения к объекту и возникает благодаря частицам пыли и другим дефектам на зеркале, создающем опорный пучок. Настоящую информацию на голограмме можно увидеть лишь при увеличении, и заключена она в сильно деформированных полосах, которые не имеют никакого сходства с объектом. Совершенно невозможно предположить, что кто-нибудь мог бы напрактиковаться в визуальном

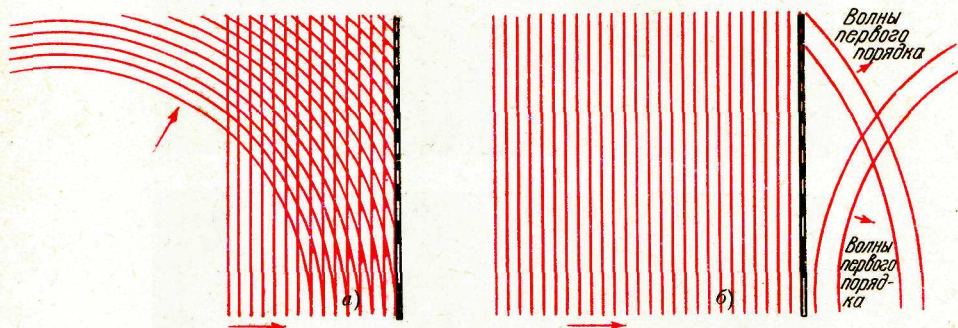


Рис. 10. Модулированные полосы возникают при интерференции плоской волны с нерегулярной волной, в данном случае с цилиндрической (а).

Когда угол между фронтами плоской и искаженной волн велик, картина полос имеет тонкую структуру; там, где угол мал, полосы идут реже. При освещении когерентным светом модулированная картина полос действует подобно несовершенной дифракционной решетке, создающей искаженные дифракционные волны (б). Расходящаяся дифракционная волна первого порядка создает мнимое изображение исходного объекта; сходящаяся дифракционная волна первого порядка дает действительное изображение объекта.

распознавании содержания голограммы, не прибегая к действительному восстановлению изображения.

Но когда голограмма помещается на пути когерентного пучка света, изображение, скрытое в ней, тотчас же обнаруживается. Полное сходство между восстановленной волной и волной первоначальной, засветившей пластинку при изготовлении голограммы, означает, что изображение, создаваемое голограммой, должно быть неотличимым по внешнему виду от первоначального объекта. Это полное тождество реализуется в действительности. Мнимое изображение, которое видно сквозь голограмму как через окно, выглядит, например, как объемный, трехмерный объект, и эффект объемности достигается полностью без каких-либо стереопар, без применения приборов, подобных стереоскопу.

Изображение имеет дополнительные черты реальности, которые даже не наблюдаются при обычной стереофото съемке. Если наблюдатель изменяет, например, точку наблюдения, перспектива картины изменяется совершенно так, как это происходило бы, если бы наблюдатель рассматривал исходный объект. Эффект параллактического смещения очевиден для ближних и дальних объектов какой-либо сцены: если объект на переднем плане закрывает собой что-либо еще, наблюдатель может передвинуть голову и заглянуть за мешающий объект, т. е. увидеть ранее скрытый объект. Более того, наблюдатель должен перефокусировать свои глаза, когда он переводит взгляд с более близкого на более удаленный объект сцены.

Короче говоря, восстановленная картина обладает всеми видимыми свойствами исходной сцены, и нам неизвестно ни одного визуального



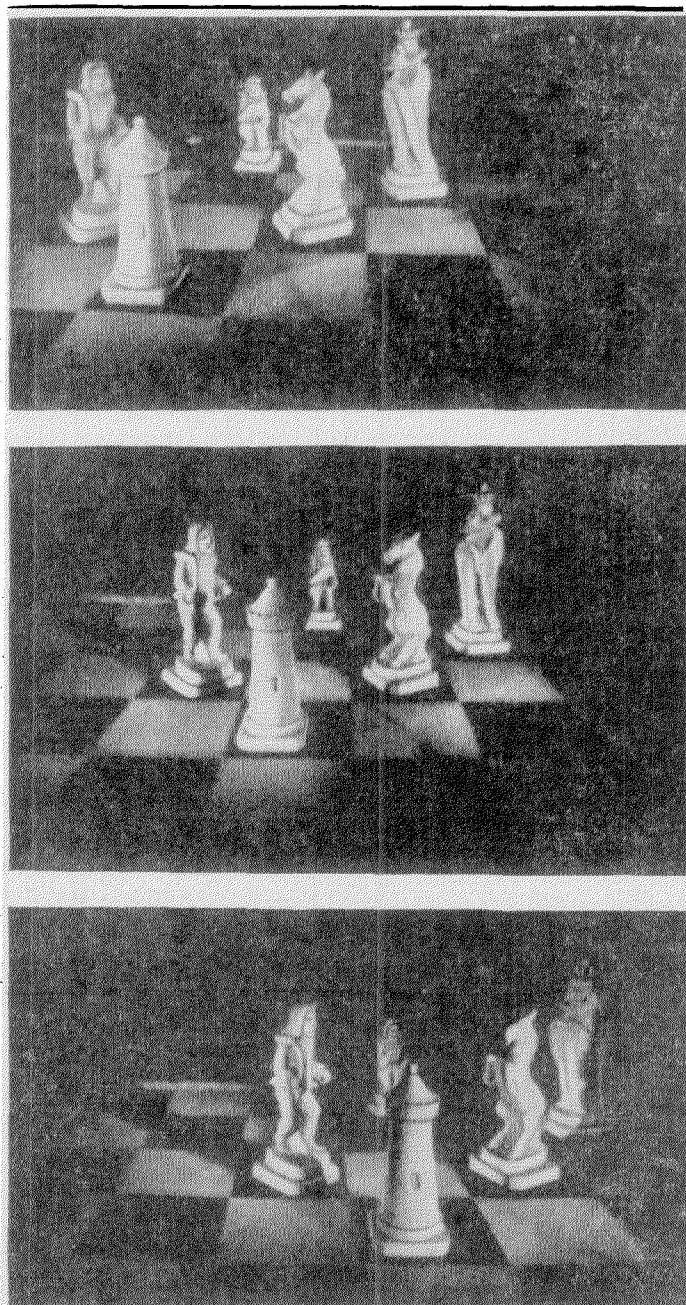


Рис. 11. Явление параллакса очевидно из этих трех фотографий мнимого изображения, изготовленных с помощью одной и той же голограммы.

Кажущееся смещение шахматных фигур возникает при легком перемещении голограммы. Такой же эффект возник бы и в случае закрепленной неподвижно голограммы, но при перемещающемся фотоаппарате либо при закрепленных голограмме и фотоаппарате, но при перемещении лазера.

теста, с помощью которого кто-либо мог бы отличить изображение от объекта. Аналогично, действительное изображение также видно наблюдателю, причем он обнаруживает его висящим в пространстве между собой и пластинкой. Это изображение обладает всеми упомянутыми выше свойствами, но его более трудно наблюдать по причинам, которые мы не будем здесь обсуждать.

Голограмма, изготовленная только что описанным методом, имеет несколько интересных свойств, не считая тех, которые связаны со способностью давать трехмерное восстановленное изображение. Например,

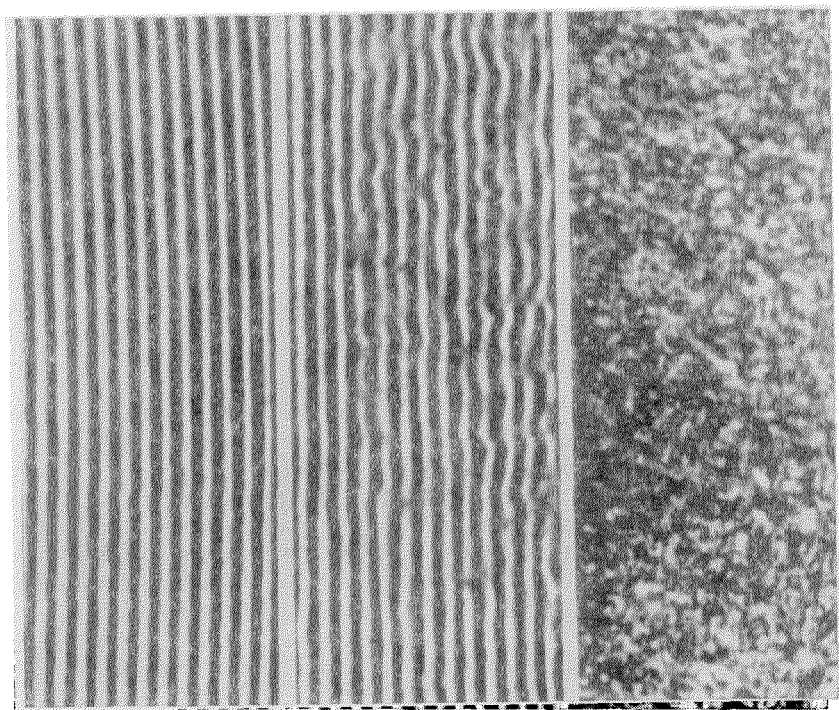


Рис. 12. Три интерференционные картины, поясняющие эффект амплитудной и фазовой модуляции пространственной несущей волны.

Картина полос на левом снимке была получена при падении на фотопластинку двух плоских волн под небольшим углом друг к другу. Одна из волн, ответственных за картину на центральном снимке, была в малой степени промодулирована; в результате возникли небольшие изменения контраста и нерегулярность полос (увеличенная часть картины на голограмме сравнительно простого фотодиaposитива). Интерференционная картина на правом снимке является увеличенной частью голограммы диффузно рассеивающего, трехмерного объекта. Степень модуляции так велика, что интерференционные полосы перестали быть непрерывными и более уже не выглядят как полосы.

каждая часть голограммы, пусть даже малая, способна воспроизводить полное изображение; таким образом, голограмму возможно расчленить на мелкие кусочки, каждый из которых можно использовать для воспроизведения полного изображения. Чем меньше кусочек, тем хуже разрешение, поскольку разрешение является функцией апертуры устройства, рисующего изображение. Это удивительное свойство голограммы объясняется наблюдением, сделанным выше: каждая точка голограммы подвергалась действию света от всех частей предмета, и поэтому в каждой точке в закодированной форме хранится информация о всем изображении.

Второе удивительное свойство процесса восстановления волнового фронта заключается в том, что этот процесс не дает негативов. Негативом следовало бы по обычным представлениям считать саму голограмму, но изображение, которое она дает, позитивное. Если бы с голограммы контактным способом была снята копия, голограмма стала бы обращенной в том смысле, что непрозрачные участки стали бы прозрачными и наоборот. Изображение, восстановленное с помощью копии, осталось бы позитивным и неотличимым от изображения, полученного с помощью оригинала голограммы, за исключением небольшого ухудшения качества, которое всегда возникает при фотокопировании. Это удивительное свойство связано с тем, что на пленке информация зафиксирована в виде модуляции пространственной несущей. Существо контактного копирования пленки сводится лишь к изменению полярности несущей, а изменение полярности несущей не оказывает влияния на сигнал, наложенный на несущую. Этот факт хорошо известен из радиотехники. Причину этой нечувствительности к изменению полярности можно понять, если вспомнить, что информация на решетке-несущей заключена в вариациях контраста и расстояний между полосами, но ни то, ни другое не изменяется при изменении полярности.

Еще одно интересное свойство фотографии по методу восстановления волнового фронта заключается в том, что восстановленное изображение имеет ту же контрастность, что и исходный объект, безотносительно к степени контрастности фотографической эмульсии. Таким образом, особо контрастные пластинки, которые в обычной фотографической практике оказались бы пригодными только для штриховых объектов, в этом случае также можно использовать без риска утратить тональную гамму объекта. Пусть фотографическая пластинка, содержащая голограмму, способна давать лишь две степени почернения — полную прозрачность и полную непрозрачность; даже в этом случае тональная гамма восстановленного изображения не пострадает. Это загадочное свойство восстановительной фотографии трудно объяснить в простых терминах, но связано оно по-прежнему с наличием несущей, а также с тем, что каждая точка объекта фиксируется не в единственной точке голограммы, а всей голограммой. Можно показать, что при таких обстоятельствах ошибка в передаче правильной тональной гаммы приводит главным образом к появлению дифракционных волн высших порядков.

Дифракционные волны первого порядка, которые образуют в первом приближении восстановленное изображение, не подвержены влиянию дефектов в передаче тональной гаммы.

И, наконец, еще одно интересное свойство голограмм заключается в том, что на одной пластинке можно путем последовательного экспонирования зафиксировать несколько изображений, и каждое изображение может быть высвечено без помех от других изображений. Это можно сделать, используя для каждой картины свою собственную пространственно-частотную несущую, подобно тому, как передается большое число одновременных сообщений по радио с помощью различных несущих частот. Решетки-несущие могут иметь различные частоты, как в радиосвязи, но, кроме того, поскольку пленка — двумерное образование, появляется еще одна степень свободы — угол поворота. Таким образом, решетка-несущая характеризуется расстоянием между полосами и ориентацией полос. Картина полос может быть, например, вертикальной при одной экспозиции и горизонтальной при другой. В процессе восстановления различные восстановленные волны будут распространяться по различным направлениям, а восстановленные изображения образовываться в различных местах.



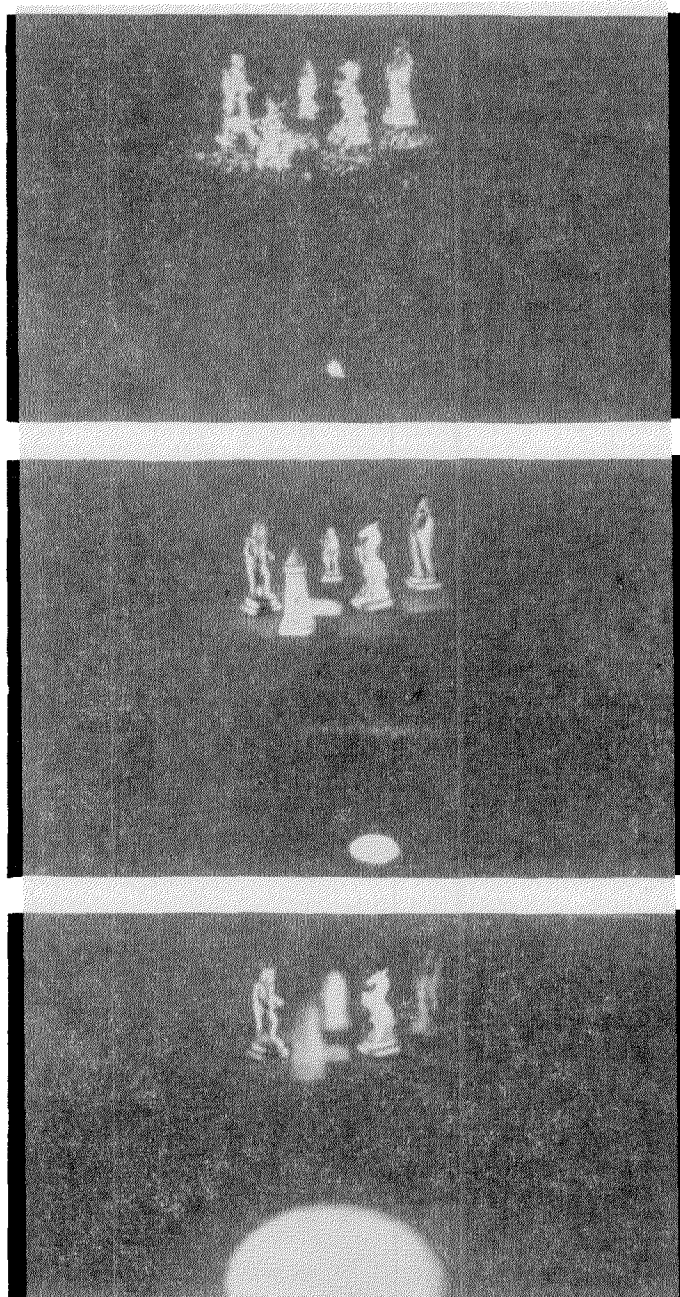


Рис. 13. Полное изображение исходной сцены воспроизводится любой частью голограммы, даже малой.

На верхнем снимке на голограмму (бледный прямоугольник на переднем плане каждого снимка) направлен нерасширенный лазерный пучок (порядка половины миллиметра в диаметре). Поскольку фотографическое разрешение является функцией апертуры образующего изображение устройства, при такой малой апертуре изображение пятнистое и плохо различимое. Последовательное увеличение освещаемой части голограммы (средний и нижний снимки) приводит к улучшению разрешения, но глубина резкости изображения уменьшается.

Фотография методом восстановления волнового фронта, казалось бы, таит в себе удивительные возможности, но вплоть до последнего времени она не выходила за стены лаборатории. И такое положение, по крайней мере в течение некоторого короткого времени, еще сохранится. Основная причина такого положения — чрезвычайно жесткие требования к когерентности источника света, применяемого в описанном процессе. Обычный свет не обладает свойством когерентности, а источники когерентного света относительно дороги и неудобны в применениях.

Существуют два сорта когерентности — временная и пространственная, и каждая из них необходима в восстановительной фотографии. Временная когерентность, или монохроматичность, необходима потому, что картина полос, возникающая при интерференции, является функцией длины волны освещения. Если спектр света широк, каждая спектральная компонента будет давать свою определенную картину, но при одновременном действии всех спектральных компонент полосы усредняются и распределение освещенности станет равномерным.

Суперпозицию ограниченного числа спектральных компонент можно допустить, но с тем, чтобы с помощью трех монохроматических волн, соответствующих трем простым цветам, получить цветное восстановленное изображение. Однако в ослаблении условия монохроматичности зайти слишком далеко нельзя, и каждая из трех цветных компонент должна занимать очень узкую спектральную область.

Второе требование когерентности — пространственная когерентность — означает, что свет должен испускаться точечным источником или, что равноценно, свет должен фокусироваться в маленькую точку. Если источник не имеет пространственной когерентности (т. е. источник протяженный), интерференционные полосы от какого-либо одного элемента источника будут смещены по отношению к полосам от другого элемента. Сумма многих таких наборов полос усредняется к какому-то почти постоянному значению, а картина полос исчезает.

Оба требования когерентности можно удовлетворить, применяя традиционные источники, каким, например, является ртутная дуговая лампа. Монохроматичность достигается пропусканием света через оптическое устройство, например монохроматор или узкополосный цветной фильтр. Все спектральные компоненты, за исключением тех, которые попадают в узкую полосу, срезаются. Пространственная когерентность достигается фокусированием источника на маленькое отверстие. Поскольку через это маленькое отверстие может пройти лишь малая часть полного светового потока лампы, традиционные источники оказываются совершенно неэффективными; только чрезвычайно малая часть светового потока используется для освещения объекта.

Свет, излучаемый лазером, обладает высокой степенью монохроматичности и необыкновенной пространственной когерентностью; тем самым все описанные выше операции оказываются ненужными. Свет, излучаемый лазером, на несколько порядков интенсивнее света других источников с той же степенью монохроматичности и пространственной когерентности. Следовательно, с точки зрения восстановительной фотографии лазер обладает огромным превосходством по сравнению со всеми другими известными источниками. И, конечно, в основном благодаря применению лазера уже получены интересные результаты.

После демонстрации совершенной техники получения необычных и удивительных изображений возникает естественный вопрос о том, какие же применения должны быть найдены для этой техники. С тех пор как Габор сделал свое открытие, высказано много различных предложений

относительно использования метода восстановления волнового фронта, да и теперь число предлагаемых применений быстро растет.

Два применения тотчас приходят на ум — в телевидении и в кино. Вообще говоря, возможно построить телевизионную систему по принципу голограммы, поскольку голограмму с одинаковым успехом можно зафиксировать на светочувствительной поверхности телевизионной камеры, как и на фотографической эмульсии. Более того, информацию, заключенную в голограмме, можно передавать и восстанавливать в телевизионном приемнике. Такая система телевидения обеспечивала бы предельную реалистичность изображения.

Но при изучении необходимых устройств и элементов оказывается, однако, что возможность осуществления этого проекта лежит далеко за пределами современного состояния искусства человека. Полоса частот, необходимая для передачи, в несколько сотен раз превышает телевизионную полосу, если только не пойти на компромиссы, связанные с частичной утратой поразительного эффекта, которого можно достичь с помощью голограммы. Передающие камеры, телевизионные трубки и другие необходимые элементы по качеству должны сильно превосходить существующее оборудование. Объекты к тому же должны освещаться лазером; в приемнике соответственно тоже должен быть лазер; существующие лазеры не соответствуют этим задачам и требуют улучшения. Возможности велики, но стоимость еще очень высока.

Изучаются методы уменьшения жестких требований на полосу системы. Некоторые успехи уже достигнуты, но многое еще предстоит сделать. В кино по принципу голограммы проблемы те же, а может быть, более серьезные.

По мере совершенствования лазеров фотография по методу восстановления волнового фронта сможет покинуть лабораторию; благодаря своей замечательной способности давать трехмерное изображение она может стать важной фотографической частью имитирующих реальные условия устройств для специальных тренировок. Этот фотографический метод будет необходим и там, где требуется абсолютно точное воспроизведение объекта.

Исторически так сложилось, что микроскопия оказалась первой областью применения метода восстановления волнового фронта. Предложенные Габором применения лежат в этой области. Габор, а также Гусейн Эль-Сум и Альберт В. Бэц в Стэнфорде показали, что по методу восстановления волнового фронта, без применения каких-либо линз, можно получать при расходящемся пучке излучения значительные увеличения.

Более того, голограмму можно экспонировать в свете источника одной длины волны, а восстановление произвести при освещении светом другой длины волны. Габор предложил экспонировать голограмму электронными волнами в электронном микроскопе, восстанавливая затем изображение с помощью видимого света. Таким способом можно перенести разработанные до совершенства оптические методы построения изображения в диапазон электронных волн, в область, где линзовая техника менее совершенна. Эль-Сум и Бэц получили голограмму с помощью рентгеновского микроскопа, а изображение восстановили с помощью видимого света. Это применение является многообещающим, поскольку рентгеновские лучи можно сфокусировать лишь грубо и с большими трудностями. Разрешение, достигнутое в рентгеновской микроскопии, на несколько порядков хуже того, которое допустимо в теории. Это положение можно исправить с помощью метода восстановления волнового фронта. Технические трудности задерживают прогресс в этой области, но они

(главным образом отсутствие источника рентгеновских лучей необходимой интенсивности, монохроматичности и пространственной когерентности) не кажутся непреодолимыми.

Коллеги авторов Роберт Пауэлл и Карл Ститсон показали, что с помощью метода восстановления волнового фронта можно измерить вибрации сложного объекта. Свет, отраженный вибрирующим объектом, теряет свою когерентность таким образом, который можно предсказать. На восстановленное по голограмме изображение оказывается наложенным контур амплитуд вибраций; амплитуду вибрации в каждой точке можно определять непосредственно с помощью этой восстановленной картины путем простого изучения голограммного изображения.

Брайон Томпсон, Джордж Парент и их сотрудники из «Technical Operations» разработали применение, обладающее замечательной простотой. Они столкнулись с проблемой измерения распределения по величине и некоторым другим свойствам взвешенных в объеме образца частиц, подобных частицам тумана. Такие частицы находятся в постоянном движении, так что наблюдатель не успевает сфокусироваться на них. А часто бывает желательным сфотографировать в одно и то же время все частицы в объеме. Метод восстановления волнового фронта является идеальным решением этой проблемы. Голограмма изготавливается путем освещения объема светом импульсного лазера и фотографической регистрации проходящего света. Для «замораживания» перемещений частиц обычно применяют лазер с импульсом малой длительности. При восстановлении получается изображение всего объема, следовательно, размеры частиц, их распределение, взаимное расположение в различных поперечных сечениях легко изучить с помощью микроскопа (Томпсон и Парент, так же как и мы, воспользовались объемными свойствами изображения восстановительной фотографии и высокой когерентностью лазера, но их деятельность никак не связана с нашей: они направили свои усилия на развитие оригинальных идей Габора совершенно по другим направлениям).

Со временем должны появиться новые применения, особенно если развитие техники приведет к появлению новых приборов, которые позволят упростить метод восстановления волнового фронта. К существенным успехам должны, в частности, привести мощные импульсные лазеры с хорошей когерентностью. Можно с уверенностью утверждать, что в будущем основное внимание будет сконцентрировано на свойстве этого метода давать трехмерное, высокореалистичное изображение; в этом и заключается неоспоримое превосходство этого метода перед остальными методами фотографии.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. W. L. Bragg, G. L. Rogers, *Nature* **167** (No. 4240), 190 (1951).
2. D. Gabor, *Nature* **161** (No. 4098), 777 (1948).
3. E. N. Leith, J. Upatnieks, *JOSA* **52** (10), 1123 (1962).
- 4\*. R. Gabor, *Proc. Roy. Soc. (London)* **A197**, 454 (1949)\*).
- 5\*. E. N. Leith, J. Upatnieks, *JOSA* **53** (12), 1377 (1963).

---

\*) Литература, помеченная звездочкой, добавлена при переводе. (Ред.)