

## § 7.7. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ГОЛОГРАФИИ

Голографией называют метод записи и последующего восстановления структуры световых волн, основанный на явлениях интерференции и дифракции когерентных пучков света. Как и фотография, она обеспечивает возможность записи, хранения и воспроизведения зрительных образов предметов. Однако обычная фотография дает лишь плоское изображение объемной картины, видимое из определенной точки. Рассматривая фотоснимок, невозможно заглянуть за предметы, находящиеся на переднем плане. В отличие от фотографии голография позволяет записать и восстановить не двухмерное распределение освещенности в плоскости снимка, а рассеянные предметом световые волны со всеми их характеристиками — направлением распространения, амплитудой, фазой, длиной волны. Восстановленные голограммой световые волны создают полную иллюзию реальности наблюдаемых предметов. Голограмма представляется наблюдателю окном, сквозь которое видно снятую объемную сцену во всей ее глубине. Близкие и далекие предметы видны одинаково четко. Изменяя точку зрения, можно видеть предметы в разных ракурсах.

На голограмме регистрируется не оптическое изображение объекта, а *интерференционная картина*, возникающая при наложении световой волны, рассеянной объектом, и когерентной с ней опорной волны. Эта интерференционная картина фиксирует информацию о распределении амплитуд и фаз в предметной волне. Освещение голограммы восстанавливающей волной, идентичной с той, что служила опорной при регистрации, вызывает появление дифрагировавших волн, одна из которых представляет собой более или менее точную копию волны, рассеянной предметом. Попадая в глаз наблюдателя, она создает такие же ощущения, как и при непосредственном рассматривании предмета.

Идеи, лежащие в основе голографической записи и восстановления зрительной информации, были высказаны и продемонстрированы на опыте Габором в конце сороковых годов XX столетия. Для практической реализации голографии необходимы источники света с высокой пространственной и временной когерентностью. Поэтому широкое распространение она получила лишь после создания лазеров, начиная с работ Лейта и Упатниекса (1963) и Ю. Н. Денисюка (1962—1963), предложившего записывать голограммы на толстослойных фотоэмульсиях, что позволяет восстанавливать изображение в белом свете.

Уяснить принцип голографии легче всего, рассматривая простейшие объекты. Наиболее прост для понимания случай голографической записи

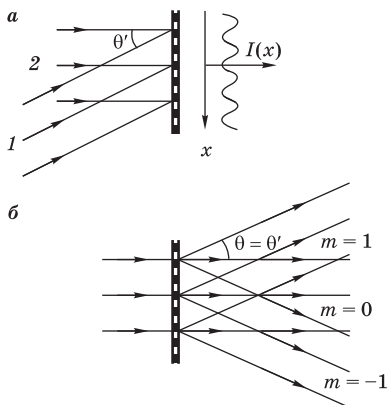


Рис. 7.35

Получение (а) и восстановление (б) голограммы плоской волны

и восстановления плоской волны. Пусть такая волна  $I$ , исходящая от предмета, падает на фотопластинку под углом  $\theta'$  к нормали (рис. 7.35, а). Мгновенное распределение фаз световых колебаний на поверхности пластинки зависит от направления волны, но светочувствительный слой способен зарегистрировать лишь среднее за время экспозиции распределение освещенности. В результате пластинка окажется равномерно почерневшей. По степени почернения можно судить об амплитудах световых колебаний, но информация об их фазах полностью теряется. Определить направление воздействовавшей на фотопластинку волны  $I$  таким способом невозможно.

Теперь представим себе, что на ту же фотопластинку одновременно с предметной волной  $1$  падает по нормали когерентная с ней плоская волна  $2$  (опорная, или референтная, волна). В результате их интерференции на поверхности фотопластинки устанавливается стационарное распределение освещенности в виде системы параллельных эквидистантных полос, ориентированных перпендикулярно плоскости чертежа на рис. 7.35, а. Зависимость интенсивности от координаты  $x$  (см. § 5.1) выражается формулой

$$I(x) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos k\Delta(x), \quad (7.46)$$

где  $I_1$  и  $I_2$  — интенсивности предметной и опорной волн,  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число, а  $\Delta(x) = x \sin \theta'$  — разность их хода (точка  $x = 0$  выбрана там, где  $\Delta = 0$ ). Расстояние между соседними полосами, как следует из (7.46), равно  $d = 2\pi/(k \sin \theta') = \lambda/\sin \theta'$ . При правильном выборе экспозиции и режима обработки пластинки ее пропускание будет зависеть от  $x$  по тому же закону (7.46), что и  $I(x)$ , т. е. мы получим на голограмме дифракционную решетку с синусоидальным пропусканием. Структура зарегистрированных на голограмме интерференционных полос содержит информацию о распределении фаз световых колебаний в предметной волне.

Легко понять, как с помощью такой голограммы можно воспроизвести записанную на ней предметную волну. Направим на голограмму восстанавливающую волну, идентичную с опорной волной  $2$ , использовавшейся

при записи (рис. 7.35, б). В результате ее дифракции на решетке с синусоидальным пропусканием возникают (см. § 6.5) три плоские волны: одна из них соответствует главному максимуму порядка  $m = 0$  и распространяется в направлении падающей волны, две другие — главным максимумам порядка  $m = \pm 1$ . Наибольший интерес для голографии представляет волна с  $m = 1$ . Ее направление  $\theta$  определяется условием  $d \sin \theta = \lambda$ . Так как  $d = \lambda / \sin \theta'$ , то  $\theta = \theta'$ , т. е. направление этой волны (как и все остальные характеристики) точно такое же, как у предметной волны  $I$  при записи голограммы. Попадая в глаз наблюдателя при рассматривании голограммы, восстановленная волна вызывает при отсутствии предмета такие же ощущения, какие вызвала бы предметная волна при непосредственном его наблюдении.

При голографировании сложного объекта его освещают когерентным лазерным пучком. Рассеянное объектом волновое поле можно в соответствии с теоремой Фурье представить в виде совокупности плоских волн. Каждая из них при интерференции с опорной волной, получаемой из того же лазерного пучка, создает на фотопластинке свою систему интерференционных полос с характерными для нее ориентацией и пространственным периодом. После проявления на голограмме образуется совокупность дифракционных решеток с синусоидальным пропусканием. Каждая из этих решеток на этапе восстановления при дифракции пучка, идентичного с опорным, формирует соответствующую ей исходную элементарную плоскую волну. Это главный дифракционный максимум с  $m = 1$ . Все восстановленные элементарные волны находятся в таких же амплитудных и фазовых соотношениях, как и при записи голограммы. Их совокупность воссоздает полное рассеянное объектом световое поле и вызывает те же зрительные образы, что и при непосредственном наблюдении объекта. Другими словами, в том месте, где находился объект при записи голограммы, возникает его мнимое изображение. Кроме того, каждая элементарная система дифракционных полос (решетка) формирует еще две волны, соответствующие главным максимумам с  $m = 0$  и  $m = -1$ . Волны с  $m = 0$  распространяются в направлении опорной волны и не попадают в глаз наблюдателя при надлежащем его расположении. Волны с  $m = -1$  формируют, как показано ниже, еще одно (действительное) изображение объекта.

Кроме совокупности дифракционных решеток, возникших при интерференции элементарных предметных волн с опорной, голограмма содержит дополнительную структуру, возникающую из-за интерференции элементарных предметных волн между собой. Обычно опорная волна значительно интенсивнее предметных, так что эта структура выражена слабо.

При восстановлении она приводит к образованию дополнительных дифрагировавших волн, концентрирующихся вблизи направления опорной волны. Они не мешают наблюдению восстановленного голограммой мнимого изображения объекта, если угол падения опорной волны в достаточной степени отличается от углов падения предметных волн.

К объяснению принципа голографии можно подойти и иначе, рассматривая процесс записи и восстановления сферических волн, рассеиваемых отдельными точками объекта. Интерференция сферической волны, исходящей из точки  $S$  (рис. 7.36а), и когерентной с ней плоской опорной волны, падающей по нормали на фотопластинку, приводит к образованию стационарной картины в виде концентрических колец. Радиальное

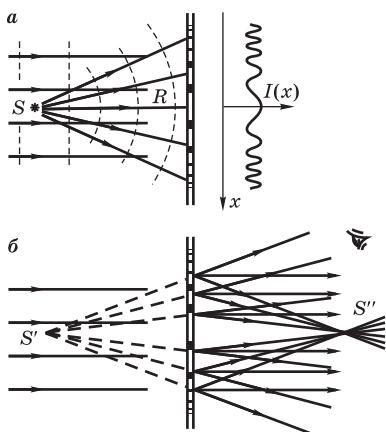


Рис. 7.36

Запись (а) и восстановление (б) голограммы точечного источника

распределение интенсивности в интерференционной картине опять дается формулой (7.46), но разность хода  $\Delta(x)$  между плоской опорной волной и сферической предметной зависит от  $x$  по закону  $\Delta(x) = (R^2 + x^2)^{1/2} - R \approx x^2/(2R)$  (если в точке  $x = 0$  разность хода  $\Delta = 0$ ). Радиус  $x_n$   $n$ -го светлого кольца находится из условия  $\Delta(x_n) = n\lambda$ , откуда  $x_n = \sqrt{2Rn\lambda}$ . Как раз такими должны быть радиусы колец в зонной пластинке Френеля (см. § 6.1) с фокусным расстоянием  $f = R$ . Отличие голограммы точечного источника от зонной пластинки, показанной на рис. 6.5, состоит только в том, что переход от светлых колец к темным происходит в соответствии с (7.46) плавно, по синусоидальному закону.

На стадии восстановления полученную голограмму освещают плоской волной, идентичной с опорной (рис. 7.36б). Как и в случае зонной пластинки, в результате дифракции возникают кроме проходящей прямо волны сходящаяся и расходящаяся сферические волны. Из-за плавного перехода от светлых колец к темным здесь образуются, как и у дифракционной решетки с синусоидальным пропусканием, только три главных максимума  $m = 0, \pm 1$ . Центр расходящейся дифрагировавшей волны  $S'$  расположен как раз в том месте, где находился точечный источник  $S$  при записи голограммы. В самом деле, когда продолжения дифрагировавших лучей пересекаются в  $S'$ , разность хода между лучами от соседних светлых

колец голограммы равна длине волны  $\lambda$ . Это эквивалентно отсутствию разности хода вообще, и такие лучи будут восприниматься глазом как выходящие из точки  $S'$ . Они образуют мнимое изображение источника. Наблюдатель видит сквозь голограмму находящийся в  $S'$  точечный источник, хотя никакого источника там нет. Возникающая при дифракции восстанавливающего пучка на голограмме расходящаяся сферическая волна создает такой же зрительный образ, как и исходная предметная волна. Сходящаяся дифрагировавшая волна создает в точке  $S''$  действительное изображение точечного источника. Так как здесь пересекаются сами дифрагировавшие лучи, а не их продолжения, действительное изображение можно получить на помещенном в это место экране в виде светлого дифракционного кружка. Оно формируется голограммой без помощи линз или зеркал.

В схеме на рис. 7.36б для наблюдения мнимого изображения  $S''$  глаз должен располагаться выше или ниже голограммы, так как в противном случае прошедшая прямо или сходящаяся волна создают сильные помехи. Чтобы избежать этого, используют угловое разделение прошедшей и дифрагировавшей волн при наклонном падении опорной волны. Возможная схема записи и восстановления приведена на рис. 7.37. Параллельный пучок лазерного излучения, предварительно расширенный простой оптической системой, направляется на объект и расположенное рядом с ним зеркало. Отраженная зеркалом волна когерентна с волнами, рассеянными предметом, и используется в качестве опорной. При восстановлении прошедшая прямо волна и дифрагировавшие волны, образующие мнимое  $S'$  и действительное  $S''$  изображения, оказываются хорошо разделенными в пространстве, что позволяет без помех наблюдать мнимое изображение.

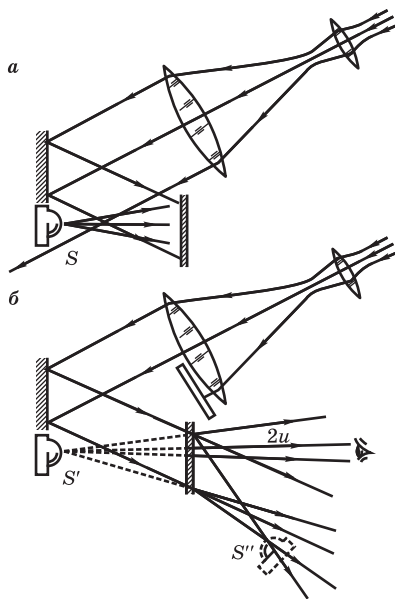


Рис. 7.37  
Схема получения (а) и восстановления (б) голограммы предмета

Сложный объект, рассеивающий когерентный лазерный свет, можно рассматривать как совокупность точечных источников, испускающих

сферические волны. В результате их интерференции с опорной волной на голограмме возникает сложный узор в виде наложения элементарных зонных решеток. На этапе восстановления при дифракции опорной волны каждая такая решетка формирует волну, расходящуюся от центра, где находилась соответствующая рассеивающая свет точка предмета при записи голограммы. Совокупность этих волн, создающих мнимое изображение всего объекта, неотличима от волн, рассеянных объектом при записи, так как характеризуется тем же распределением амплитуд и фаз. Поэтому голограмма полностью восстанавливает его объемную структуру и передает не только видимое пространственное расположение предметов, но и эффект параллакса, заключающийся в изменении этого расположения при перемещении точки наблюдения.

Совокупность сходящихся волн, возникающих при дифракции восстанавливающей волны на голограмме, без всяких линз формирует действительное изображение предмета. Увидеть его можно лишь при определенном положении глаза, когда изображение находится между голограммой и глазом. При этом изображение предмета рассматривается с задней стороны и выпуклые места предмета выглядят на нем как вогнутые, и наоборот, т. е. изображение будет как бы вывернутым (псевдоскопическим).

**В**ажное свойство голограмм заключается в том, что восстановить предметную волну можно с помощью небольшого участка голограммы. В случае голограммы плоской волны это свойство очевидно: если закрыть часть дифракционной решетки, то направление дифрагировавших волн останется прежним. При этом лишь уменьшится их интенсивность и несколько увеличится ширина главных максимумов. Этот вывод справедлив и для зонной пластинки, небольшую часть которой можно рассматривать как дифракционную решетку с искривленными штрихами и постепенно изменяющимся периодом. Изменение шага решетки приводит к локальным изменениям направления дифрагировавших пучков, так что любой участок зонной пластинки восстанавливает часть одной и той же сферической волны. В отличие от обычной фотографии, где информация о какой-либо точке предмета фиксируется в одной определенной точке, каждый участок голограммы содержит в закодированной форме информацию о всех точках предмета, так как при ее записи свет, рассеянный каждой точкой предмета, обычно падает на всю поверхность фотопластинки. По мере уменьшения размеров голограммы лишь ухудшается разрешающая способность и сужается поле зрения.

Наблюдение мнимого изображения фактически эквивалентно рассматриванию самого предмета через отверстие, совпадающее с рабочей частью голограммы. При фиксированном положении глаза используется

только часть дифрагировавшего излучения, ограниченная действующим конусом лучей, попадающих в глаз. Ясно, что при рассматривании определенной точки предмета в этом конусе распространяется свет, претерпевший дифракцию на небольшом участке голограммы (рис. 7.37). Если изменить положение глаза, изображение той же точки будет восстанавливаться другим участком голограммы.

Создаваемое голограммой изображение (мнимое или действительное) точки предмета, как и в любой другой оптической системе, имеет вид дифракционного пятна, размеры и форма которого определяются раствором (угловой апертурой) пучка дифрагировавшего на голограмме света, формирующего изображение точки. Минимальное расстояние  $l_{\min}$  между близкими точками предмета, разрешимыми на изображении, как и для случая когерентного освещения в микроскопе, дается выражением (7.43):  $l_{\min} = \lambda / \sin u$  (или  $l_{\min} = \lambda / (2 \sin u)$  при наклонном падении опорной волны). Здесь  $2u$  — угол, под которым из места расположения точек предмета видна действующая часть голограммы. При визуальном наблюдении мнимого изображения глаз пропускает лишь часть восстановленной голограммой волны (рис. 7.37), действующая часть голограммы (и апертура  $2u$ ) ограничена не размером голограммы, а конусом попадающих в глаз дифрагировавших лучей. В этом случае предельное разрешение определяется глазом, т. е. разрешающая способность голограммы полностью не используется.

До сих пор предполагалось, что светочувствительный слой, регистрирующий интерференционную картину, полностью передает все ее детали. Для этого требуется фотографическая эмульсия высокого качества. Если опорная волна падает на пластинку под углом  $\theta$ , а предметная — приблизительно по нормали, то соседние интерференционные полосы проходят на расстоянии  $d = \lambda / \sin \theta$ . Чтобы при восстановлении прямая волна ( $m = 0$ ) не мешала наблюдению мнимого изображения, угол  $\theta$  должен быть достаточно большим. Уже при  $\theta \approx 20^\circ$  расстояние между полосами  $d \approx 2$  мкм, т. е. 500 полос на 1 мм, а при встречном направлении опорной и предметной волн (метод Ю. Н. Денисюка, см. ниже)  $d = \lambda/2$ , что соответствует примерно 3000 полос на 1 мм. Применяемые в обычной фотографии фотоматериалы позволяют зарегистрировать около 100 штрихов на 1 мм. Чтобы размер зерна не ограничивал разрешающей способности голограмм, специально для голографии разработаны мелкозернистые фотоземлюлины, регистрирующие несколько тысяч линий на 1 мм.

Для восстановления изображения в равной мере пригодны как позитив, так и негатив голограммы. В случае зонной пластинки это очевидно: действие ее одинаково как при четных, так и при нечетных открытых зонах

Френеля. В общем случае это следует из теоремы Бабине, согласно которой дополнительные экраны создают одинаковые дифракционные картины в тех местах, куда не попадает прямая волна (восстанавливающий пучок). Важно только, чтобы амплитудное пропускание голограммы линейно зависело от освещенности зарегистрированной на ней интерференционной картины. Тогда при записи плоской волны получается дифракционная решетка с синусоидальным пропусканием, которая даст при восстановлении главные максимумы только порядков  $m = 0, \pm 1$ . В противном случае функция пропускания будет иметь пространственные гармоники более высоких порядков  $m = \pm 2, \pm 3, \dots$ , которые приведут на стадии восстановления к возникновению соответствующих главных дифракционных максимумов, т. е. дополнительных мнимых и действительных изображений предмета. В голографии они играют роль помех.

Наряду с рассмотренными выше *амплитудными* голограммами применяют и прозрачные *фазовые* голограммы, в которых интерференционный узор зафиксирован в изменениях не пропускания, а показателя преломления (оптической толщины) регистрирующего слоя. Это достигается соответствующей химической обработкой (отбеливанием) светочувствительного материала. Такая голограмма приводит к пространственной модуляции фазы восстанавливающей волны, из-за чего возникают дифрагировавшие волны. Они создают, как и в случае амплитудной голограммы, мнимое и действительное изображения предмета.

Опорная волна при записи голограммы должна быть когерентна со светом, рассеянным всеми точками объекта. Для получения голограммы большого объекта необходимо излучение с высокой степенью временной и пространственной когерентности. Длина когерентности должна превосходить максимальную разность хода между опорной и предметными волнами, которая для трехмерного объекта практически совпадает с его размерами. Размеры области пространственной когерентности должны быть больше размеров голограммы. Одновременное выполнение этих условий возможно только при использовании лазерного излучения. Для получения четкой интерференционной картины при записи голограммы необходимо также обеспечить во время экспозиции неподвижность всех элементов с точностью до долей длины волны.

Когда пучок света при восстановлении идентичен опорному пучку, использованному при записи, мнимое изображение расположено там же, где находился предмет, и полностью ему подобно. Но в стадии восстановления можно использовать свет с другим направлением распространения. Если восстанавливающий пучок повернуть на небольшой угол, направления пучков, образующих действительное  $S'$  и мнимое  $S''$  изображения,



повернутся на такой же угол. Изображения  $S'$  и  $S''$  расположены симметрично относительно плоскости  $H$ , перпендикулярной направлению восстанавливающего пучка (рис. 7.38).

На стадии восстановления можно использовать монохроматический свет с другой длиной волны, нежели при записи. Тогда линейный размер восстановленного изображения будет отличаться от размера предмета и оно будет находиться от голограммы на ином расстоянии. В качестве опорного и восстанавливающего излучений можно использовать не только плоские, но и сферические волны. Однако во всех случаях, когда восстанавливающая волна не идентична опорной волне, пучки дифрагировавших на голограмме лучей, формирующие изображения отдельных точек предмета, перестают быть гомоцентрическими. Восстановленному изображению в большей или меньшей степени присущи сферическая aberrация, кома, астигматизм, дисторсия и хроматизм, аналогичные соответствующим aberrациям оптических систем (см. § 7.5).

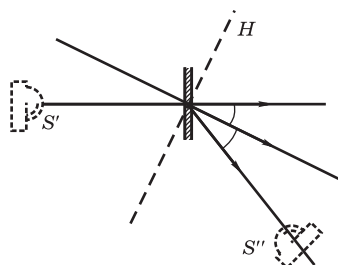


Рис. 7.38

Расположение изображений объекта при восстановлении голограммы

При изложении предполагалось, что толщина светочувствительного слоя много меньше пространственного периода регистрируемой на голограмме интерференционной картины. Такие голограммы называют *плоскими* (двухмерными). Если толщина слоя регистрирующей среды существенно превосходит этот период, говорят об *объемной* (трехмерной) записи. Для уяснения особенностей толстослойных голограмм рассмотрим простейший случай интерференции плоских опорной и предметной волн с волновыми векторами  $\mathbf{k}_2$  и  $\mathbf{k}_1$ . Как было показано в § 5.1, поверхности равной интенсивности представляют собой эквидистантные плоскости  $\mathbf{K}\mathbf{r} = \text{const}$ , перпендикулярные вектору  $\mathbf{K} = \mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1$  (см. рис. 5.2) и отстоящие на расстояние  $\Delta(x) = \lambda/[2 \sin(\alpha/2)]$ , где  $\alpha$  — угол между  $\mathbf{k}_1$  и  $\mathbf{k}_2$  [см. (5.5)]. После проявления в толще фотоэмульсии на месте максимумов интенсивности образуется система полупрозрачных зеркальных плоскостей, расположенных параллельно биссектрисе угла между направлениями опорной и предметной волн (рис. 7.39, а).

Будем для простоты пренебрегать преломлением света в материале эмульсии, считая расстояние между плоскостями равным  $\Delta x$ . Пусть на голограмму падает плоская волна с длиной волны  $\lambda'$  (рис. 7.39, б), направление которой, как и у опорной, составляет угол  $\alpha/2$  с зеркальными

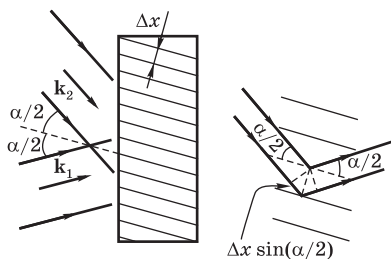


Рис. 7.39

К объяснению свойств толстослойных голограмм

$\neq \lambda$ , то отраженные разными плоскостями волны имеют всевозможные разности фаз и не дают конструктивной интерференции. При освещении пучком белого света в восстановлении изображения участвуют только волны с  $\lambda' = \lambda$ . Таким образом, на стадии восстановления толстослойная голограмма действует как *интерференционный фильтр*, выделяя из падающего света излучение с той длиной волны, которая использовалась при записи. Конечно, такой фильтр характеризуется ограниченным спектральным разрешением, и выделяемое им излучение не столь монохроматично, как при записи. Чем больше отражающих слоев содержит объемная голограмма, тем выше степень монохроматичности восстановленного пучка.

Если восстановление производится монохроматическим светом с той же длиной волны, что и при записи, то отраженные зеркальными слоями волны лишь тогда будут находиться в фазе и при интерференции усилят друг друга, когда направление восстанавливающего пучка совпадает с опорным. Голограмма действует как *оптический коллиматор*. Отраженные волны, как видно из рис. 7.39б, имеют при этом то же направление, что и предметная волна. Поэтому толстослойная голограмма восстанавливает лишь одно (мнимое) изображение предмета. Для получения действительного изображения восстанавливающий пучок должен иметь направление, противоположное опорному, т. е. должен освещать голограмму с обратной стороны. При этом восстанавливается волна с такой же формой волновых поверхностей, что и предметная, но с противоположным направлением распространения. Иначе можно сказать, что в процессе восстановления реализуется *обращение волнового фронта* предметной волны. Изображение получается в том же месте, где находился предмет.

Особенности объемной голограммы как интерференционного фильтра проявляются наиболее сильно, когда отражающие поверхности рас-

плоскостями. Легко видеть, что разность хода волн, отраженных соседними плоскостями под таким же углом  $\alpha/2$ , составляет  $2\Delta x \sin(\alpha/2)$ . Если подставить сюда  $\Delta x = \lambda/[2 \sin(\alpha/2)]$ , то получим, что разность хода равна  $\lambda$ , т. е. длине волны излучения, использованного при записи голограммы. Чтобы эти волны при многолучевой интерференции усиливали друг друга, должно выполняться условие  $\lambda' = \lambda$ . Если  $\lambda' \neq$

полагаются почти параллельно границам эмульсионного слоя, т. е. когда опорная и предметные волны распространяются почти навстречу. Такое расположение (рис. 7.40) используется в методе, предложенном Ю. Н. Денисюком. Плоская опорная волна лазерного излучения падает на фотопластинку со стороны стекла и, проходя через фотослой толщиной 15–20 мкм, освещает предмет. Рассеянные предметом волны распространяются почти навстречу опорной волне и при интерференции с ней образуют в толще фотоземлюли системы из нескольких десятков параллельных полупрозрачных отражающих слоев. При освещении белым светом такая голограмма восстанавливает только одно изображение. Из-за усадки фотоземлюли в процессе химической обработки пространственный период регистрируемой трехмерной интерференционной структуры уменьшается и цвет восстановленного изображения отличается от опорного лазерного излучения сдвигом в сторону синего конца спектра. При изменении направления восстанавливающего пучка цвет изображения изменяется.

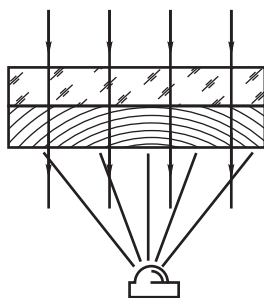


Рис. 7.40  
Схема получения толсто-слоистой голограммы по методу Ю. Н. Денисюка

Изображение в натуральных цветах можно получить, если на одной объемной голограмме зарегистрировать интерференционные картины при освещении предмета излучением, имеющим в своем спектре три монохроматические линии (красную, зеленую и синюю), которые вместе вызывают ощущение белого света. При восстановлении с помощью источника белого света возникают три совмещенных изображения предмета в трех спектральных цветах, воспринимаемые глазом как одно объемное изображение, передающее натуральную окраску предмета.

Из многочисленных практических применений голографии отметим прежде всего *голографическую интерферометрию*, позволяющую наблюдать интерференцию волн, зарегистрированных в разные моменты времени. Используя один и тот же опорный пучок, на одной фотопластинке можно дважды последовательно запечатлеть рассеянные предметом волны. Если между экспозициями какие-то части предмета несколько сместились или деформировались, то при восстановлении две одновременно возникающие когерентные предметные волны будут иметь определенную разность хода и изображение поверхности предмета будет покрыто системой интерференционных полос (рис. 7.41), аналогичных обычным полосам равной толщины. По расположению этих полос можно судить об

изменениях предмета между экспозициями. Замечательно, что изучаемый предмет может при этом отражать свет диффузно, иметь сложный рельеф и шероховатую поверхность, так как все эти факторы одинаково влияют на обе восстанавливаемые предметные волны. Несмотря на очень сложную форму волновых поверхностей, эти волны вполне подобны и создают простые и легко наблюдаемые интерференционные полосы.



Рис. 7.41

Интерференционные полосы, наблюдаемые при восстановлении голограммы, полученной методом двойной экспозиции

Методом двойной экспозиции можно исследовать и изменения, происходящие в прозрачных (фазовых) объектах (см. рис. 7.41). На пути просвечивающего объекта пучка ставят прозрачный рассеивающий экран (матовое стекло), чтобы свет от каждой точки объекта попадал на всю поверхность голограммы. Так как этот экран и объект неподвижны и экспонируются дважды, их оптические неоднородности, сколь бы сложными они ни были, никак не влияют на расположение интерференционных полос, наблюдаемых на восстановленном изображении. Эти полосы характеризуют локальные изменения оптической толщины объекта между двумя экспозициями. В противоположность этому в традиционной интерферометрии для выполнения аналогичных измерений поверхности объекта должны обладать высокими оптическими качествами.

В другом варианте метода на голограмме регистрируют волну, рассеянную объектом только в некотором начальном состоянии. Затем при восстановлении полученной голограммы объект не удаляют, а освещают так же, как и при регистрации голограммы. В результате возникают две волны: распространяющаяся от самого объекта в данный момент и восстановленная голограммой предметная волна, соответствующая начальному состоянию объекта. Непрерывно наблюдая создаваемую этими когерент-

ными волнами интерференционную картину, можно судить о происходящих с течением времени изменениях состояния объекта. Такой метод называют *голографической интерферометрией реального времени*.

Применение голографии в микроскопии позволяет преодолеть серьезный недостаток микроскопа при сильном увеличении — очень малую глубину резкости изображения. Вместо того чтобы регистрировать изображение, можно записать на голограмме проходящую через микроскоп предметную волну. При восстановлении такой голограммы можно наблюдать находящиеся в разных плоскостях детали предмета, перемещая только оптическую систему наблюдения.

Используя вместо когерентного света ультразвуковые волны, можно получить акустическую голограмму. Звук проникает в оптически непрозрачные предметы. Поэтому акустическая голограмма позволяет восстановить трехмерное изображение внутренних частей предмета, например органов человеческого тела или глубин океана, что открывает широкие перспективы для применений в медицине, в подводных исследованиях, геофизике, археологии.

Специально изготовленные голограммы могут использоваться в качестве определенных оптических элементов. Голограмма — зонная решетка может выполнять некоторые функции линзы, голограмма — дифракционная решетка — служить диспергирующим элементом спектрального прибора, толстослойная голограмма с параллельными отражающими слоями — служить интерференционным фильтром и т. п.

С помощью одной голограммы можно записать и восстановить огромное количество информации. Большое число независимых сведений, регистрируемых голограммой, внешне проявляется в чрезвычайной сложности ее структуры. Под микроскопом такая голограмма производит впечатление хаотического набора пятен всевозможной формы и ориентации в отличие от регулярной структуры голограммы простейшего объекта. Очень важно, что декодирование этой огромной информации на этапе восстановления происходит просто и чрезвычайно быстро. Способность голографии к регистрации, хранению и быстрому преобразованию информации открывает перспективы создания новых систем памяти для компьютеров, оптических систем обработки данных, систем распознавания образов и символов с помощью оптической фильтрации сигналов.

### **Контрольные вопросы**

- В чем заключается основная идея голографической записи зрительных образов?
- Как выполняется декодирование информации, зарегистрированной на голограмме?