Министерство общего и профессионального образования Российской Федерации
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Е. Н. ДЕНЕЖКИН

ОПТИЧЕСКАЯ ГОЛОГРАФИЯ

Учебное пособие для студентов РЭФ

(направление – Оптотехника)

НОВОСИБИРСК

2002

Денежкин Е.Н. Оптическая голография: Учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 93 с.

Ил. 41, табл. 1, список лит. 12 назв.

Рецензенты: С. П. Ильиных, канд. техн. наук, доцент
В. г. Нечаев, канд. техн. наук, доцент

Работа подготовлена на кафедре
оптических информационных технологий

© Новосибирский государственный
технический университет

Глава 1. Интерференция колебаний и волн.

Получение голограммы, в сущности, является регистрацией интенсивности интерференционной картины (но не интенсивностей отдельных волн!!!) Если разность фаз между интерферирующими волновыми полями постоянна в течение какого-либо времени (а именно такие поля используются в голографии), то пространственное распределение интенсивности полос в интерференционной картине будет также постоянно во времени. При этом для голографии интерес представляет интерференция монохроматических волн одинаковой частоты, полученных от одиночного непрерывно излучающего источника.

Напомним некоторые сведения, относящиеся к сложению колебаний и волн.

При сложении двух гармонических колебаний одного периода:

$S_1 = a_1 \sin(\omega t + \varphi_1)$ и

$$S_2 = a_2 \sin(\omega t + \varphi_2), \qquad (1.1.1)$$

проходящих по одному направлению, получится вновь гармоническое колебание того же периода

$$S = S_1 + S_2 = A \sin(\omega t + \theta), \qquad (1.1.2)$$

амплитуда A и фаза θ которого определяются из следующих соотношений:

$$A^2 = a_1^{\ 2} + a_2^{\ 2} + 2a_1 a_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2), \qquad (1.1.3)$$

$$\mathrm{tg}\theta = \frac{(a_1 \sin\varphi_1 + a_2 \sin\varphi_2)}{(a_1 \cos\varphi_1 + a_2 \cos\varphi_2)} \quad . \qquad (1.1.4)$$

Данное выражение показывает, что квадрат амплитуды результирующего колебания не равняется сумме квадратов амплитуд складывающихся колебаний, то есть энергия результирующего колебания не равна сумме энергий складывающихся колебаний. Результат сложения зависит от разности фаз (φ_1-φ_2)

исходных колебаний и может иметь любое значение в пределах от $A^2=(a_1-a_2)^2$ при $\varphi_1-\varphi_2=\pi$ до $A^2=(a_1+a_2)^2$ при $\varphi_1-\varphi_2=0$.

На практике мы никогда не имеем дела со строго гармоническими колебаниями, то есть длящимися бесконечно долго с неизменной амплитудой. Колебания время от времени обрываются и возникают вновь уже с иной, нерегулярно измененной фазой, то есть не являются строго гармоническими. В таком случае и результирующая интенсивность ($I \sim A^2$) также меняется с течением времени. Поскольку обычно нет необходимости следить за всеми изменениями величины I, то регистрируют только некоторое среднее во времени значение интенсивности I, обозначаемое $\vec{I}$.

Таким образом, при сложении двух колебаний одного периода различают два случая:

1. Разность фаз колебаний сохраняется неизменной за время τ, достаточное для наблюдений. Средняя энергия результирующего колебания отличается от суммы средних энергий исходных колебаний и может быть больше или меньше нее в зависимости от разности фаз. В этом случае колебания называются когерентными. Сложение колебаний, при котором не имеет место суммирование интенсивностей, называют интерференцией колебаний.

2. Разность фаз колебаний беспорядочно меняется за время наблюдения. Средняя энергия результирующего колебания равна сумме средних энергий исходных колебаний. Колебания в этом случае называются некогерентными. При их сложении всегда наблюдается суммирование интенсивностей, то есть интерференция не имеет места.

Строго гармонические колебания одинаковой частоты всегда вполне когерентны между собой, так как имеющаяся у них разность фаз сохраняется без изменения сколь угодно долгое время. Поэтому, при сложении таких гармонических колебаний всегда проявляется интерференция (ясно, почему появление лазера облегчило исследования в области голографии).

Переходя к волнам, можно говорить об интерференции волн, когда при их совместном действии не происходит суммирования интенсивностей. Условием интерференции волн одной и той же частоты является их когерентность, то есть сохранение неизменной разности фаз за время, достаточное для наблюдения (то есть $\tau >> T$). В частности монохроматические волны, то есть порождаемые гармоническими колебаниями, когерентны и могут интерферировать. Это означает, что в любой точке, которой достигнут эти волны, имеют место когерентные колебания, которые будут интерферировать.

Пусть две когерентные волны исходят из источников S_1 и S_2. колебания в них направлены перпендикулярно к плоскости рисунка, а наблюдение производится в точке М.

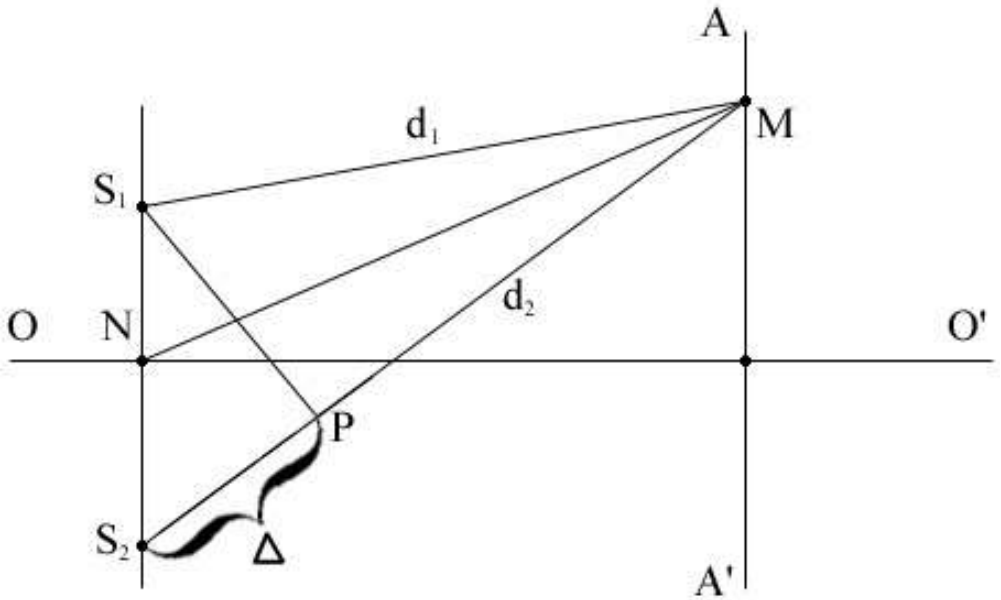


Рис.1.1. Интерференция двух когерентных волн

Для простоты, допустим, что в этой точке амплитуды обеих волн равны, тогда колебания в т. М, вызываемые первой и второй волнами, выразятся в виде:

$$S_1 = a\cos 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{d_1}{\lambda}\right)$$

$$S_2 = a\cos\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{d_2}{\lambda}\right) - \varphi\right], \qquad (1.1.5)$$

где $d_1=S_1M$ и $d_2=S_2M$, λ-длина волны, а φ - начальная разность фаз.

Складываясь в т. М, колебания дадут:

$$S = S_1 + S_2 = 2a\cos\left(\frac{\pi(d_2 - d_1)}{\lambda} + \frac{\varphi}{2}\right)\cos\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{(d_2 - d_1)}{2\lambda}\right) - \frac{\varphi}{2}\right] \qquad (1.1.6.)$$

То есть, колебание в т. М имеет амплитуду $2a\cos\left(\frac{\pi(d_2 - d_1)}{\lambda} + \frac{\varphi}{2}\right)$(этот член не зависит от времени и может считаться амплитудой) и интенсивность, пропорциональную $4a^2\cos^2\left(\frac{\pi(d_2 - d_1)}{\lambda} + \frac{\varphi}{2}\right)$

Для когерентных волн φ - постоянна, и различие интенсивности света в разных точках зависит только от различия разностей расстояний d_2 и d_1. Благодаря этой разности хода двух волн, колебания, вызванные этими волнами в точке их встречи, обладают разностью фаз даже в том случае, когда начальные фазы обеих волн одинаковы. Разность фаз φ, возникшая вследствие разности хода волн, равна

$$\varphi = 2\pi(d_2 - d_1)/\lambda. \qquad (1.1.7.)$$

Выражаем разность хода Δ через длину волны $\Delta = d_2 - d_1 = m\lambda$, где m – любое число (целое или дробное). Тогда разность фаз $\varphi = 2\pi m$

А интенсивность двух интерферирующих волн с одинаковыми амплитудами:

$$I \sim A^2 = 4a^2\cos^2[2\pi(d_2 - d_1)/\lambda] = 4a^2\cos^2 m\pi \qquad (1.1.8.)$$

При полуцелом m фазы складывающихся колебаний противоположны интенсивность I=0.

При неравных амплитудах

$$I \sim A^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2\cos 2\pi m = (a_1 - a_2)^2 + 4a_1a_2\cos^2\pi m \qquad (1.1.9.)$$

Целые значения m соответствуют максимумам $A^2 = (a_1 + a_2)^2$, полуцелые m – минимумам $A = (a_1 - a_2)^2$.

В общем случае условие максимума интенсивности интерференционной картины имеет вид:

$$\frac{(d_2 - d_1)}{\lambda} - \frac{\varphi}{2\pi} = m \qquad (1.1.10.)$$

Если обратиться к наиболее распространенной форме представления волн в виде комплексных векторов амплитуд, результирующая интенсивность принимает вид:

$$I = \vec{a} \cdot \vec{a} = \vec{a}_1 \cdot \vec{a}_1 + \vec{a}_2 \cdot \vec{a}_2 + \vec{a}_1 \cdot \vec{a}_2 \{\exp[i(\varphi_2 - \varphi_1)] + \exp[-i(\varphi_2 - \varphi_1)]\} \qquad (1.1.11.)$$

Или:

$$I = I_1 + I_2 + 2a_1 a_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) \qquad (1.1.12.)$$

Явно видно, что интенсивность в любой точке интерференционной картины, образованной двумя волнами, является суммой интенсивностей отдельных волн плюс интерференционный член.

Из последнего выражения, в частности, видно, что только параллельные друг другу векторные волновые компоненты могут создать интерференционные картины (и в конечном итоге голограммы). Поэтому при анализе процесса образования голограммы можно рассматривать взаимодействующие волновые амплитуды, как скалярные величины.

Глава 2. Голографическая запись и воспроизведение информации.

2.1. Принцип записи и восстановления оптических голограмм.

Термин «голография» происходит от греческого «holos» - полный, и «graphio» - рисую, записываю, то есть, дословно, «полная запись».

Голография – способ записи на соответствующем регистрирующем материале полного волнового фронта, содержащего полную информацию о фазе и амплитуде, с последующим его восстановлением.

Результат же записи называется голограммой. Всюду далее под голографией подразумеваем голографию оптическую, хотя голографический

метод практически применим ко всем видам волн: электронным, рентгеновским, световым, акустическим, сейсмическим и т.д.

Принцип голографии. Это процесс регистрации интерференционной картины (голограммы), которая образованна волной, отраженной предметом, освещаемым источником света (объектная волна), и когерентной с ней волной, идущей непосредственно от источника света (опорная волна).

Рис. 2.1. Схема записи голограммы

Эта голограмма может быть зарегистрирована на фотопленке обычным фотоспособом. Если после этого на голограмму падает опорная волна, то она дифрагирует на зарегистрированной интерференционной структуре, в результате восстанавливается волна, которая шла при записи от объекта. Объект виден как бы через окно – голограмму.

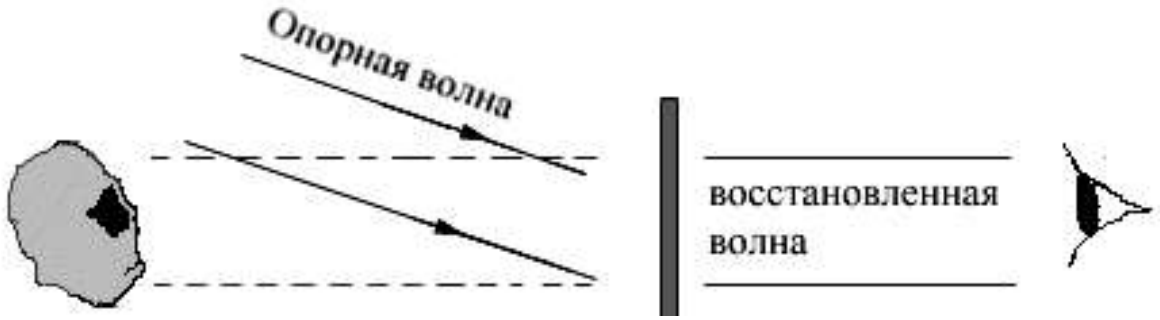


Рис. 2.2. Схема восстановления голограммы

Если опорную и предметную волны в данный момент времени записать в стандартном виде

$$\vec{E}_0 = A_0(x,y)\exp\{\iota\varphi_0(x,y)\}$$
$$\vec{E}_n = A_n(x,y)\exp\{\iota\varphi_n(x,y)\} \qquad (2.1.\ 1.)$$

где E – комплексная амплитуда волны, A(x,y) – амплитуда и φ - фаза световой волны, то освещенность или интенсивность излучения на голограмме пропорциональна квадрату модуля комплексной амплитуды:

$$I = |E_0 + E_n|^2 = |E_n|^2 + |E_n|^2 + E_0^* E_n + E_0 E_n^* \qquad (2.1.\ 2.)$$

или

$$I = |E_0|^2 + |E_n|^2 + 2E_0 E_n \cos(\varphi_n - \varphi_0)\ . \qquad (2.1.\ 3.)$$

Таким образом, освещенность в любой точке интерференционной картины, образованной двумя волнами (опорной и предметной), является суммой освещенностей отдельных волн и интерференционной составляющей, содержащей информацию о разности фаз. Последнее уравнение часто называют *уравнением голограммы*.

Минимальная и максимальная освещенность интерферограммы (узлы и пучности) определяются так:

$I_{min} \sim a\,(A_0 - A_n)^2$ при $\varphi_n - \varphi_0 = 2\pi$

$I_{max} \sim a\,(A_0 + A_n)^2$ при $\varphi_0 = \varphi_n$, (2.1. 4.)

где a – коэффициент контрастности.

В случае записи простейшей голограммы от двух плоских волн, пересекающихся под углом 2θ, имеем дифракционную решетку с равномерно чередующимися светлыми и темными полосами. Расстояние между интерференционными полосами определяется из условия:

$2d\sin\theta = \lambda$, что дает $d = \dfrac{\lambda}{2\sin\theta}$ (2.1.5.)

Таким образом, при получении голограмм производится запись более или менее сложных дифракционных картин. И при падении на голограмму плоской волны происходит ее дифракция.

Дифракцией называют явление, заключающееся в искривлении волновых нормалей (лучей) при встрече света с препятствием, оптическое пропускание или отражение которого значительно изменяется на расстояниях, близких к длине волны света.

Голограмма сама по себе есть вызывающий дифракцию объект, обладающий некоторыми специфическими свойствами. Их можно разделить на два вида, а именно - голограммы, ведущие себя:

1) подобно плоским дифракционным решеткам;

2) подобно объемным дифракционным решеткам.

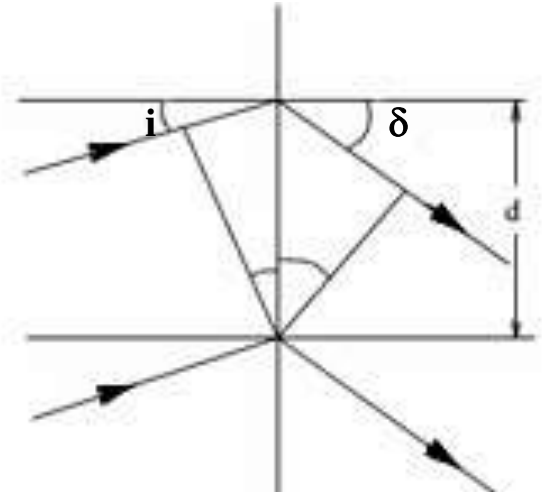


Рис. 2.3. Дифракция на плоской решетке

Плоская дифракционная решетка состоит из ряда периодически расположенных прозрачных щелей на непрозрачном экране. Для плоской волны, падающей на решетку, условие синфазности дифрагированных пучков, ведущей к их взаимному усилению, является уравнением решетки:

$$d(\sin i + \sin\delta) = \lambda, \qquad (2.1.6.)$$

где d – постоянная решетки, i – угол падения и δ – угол дифракции.

При выполнении данного условия, под углом δ образуется главный максимум дифрагированной плоской волны. Возможны отрицательные и более высокие порядки дифракции (но их в рассмотрение не принимаем, пока).

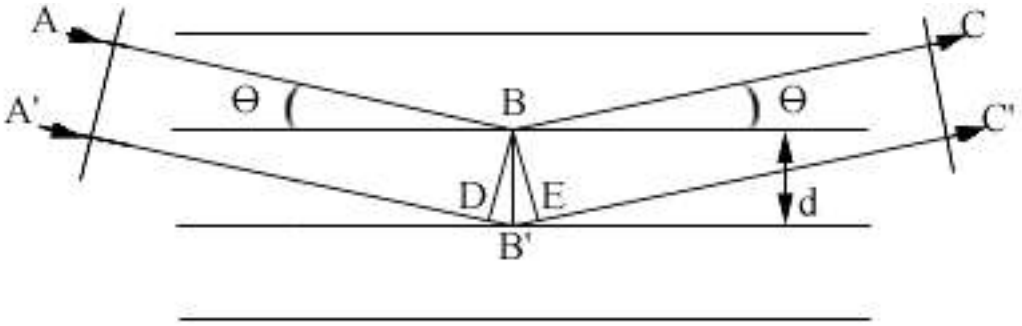


Рис. 2.4. Дифракция на объемной решетке

Объемная дифракционная решетка содержит периодически расположенные рассеивающие плоскости, освещенные плоской волной. Справедлив тот же самый принцип: интенсивность имеет максимальную величину в том направлении, в котором происходит синфазное сложение световых волн, рассеянных последовательными плоскостями. Условие образования главного максимума дифрагированной плоской волны имеет вид:

$$2d\sin\theta = \lambda \ , \qquad (2.1.7.)$$

называется *законом Брэгга*. Максимум дифракции возникает, когда углы, образованные падающим и отраженным лучами с отражающей плоскостью, равны, причем угол θ удовлетворяет условию (2.1.7.) .

Выражение для объемной решетки накладывает более жесткие условия на наблюдение максимума дифракции. Для объемной решетки выбор угла падения определяет и длину волны, и угол дифракции.

2.2. Образование и восстановление голограмм.

Выбирая термин «голография» для изобретенного способа записи, Габор подчеркнул, что регистрация как фазовой, так и амплитудной информации обеспечивает более полное описание световой волны. Информация о фазе сохраняется в интерференционной картине при двухлучевой интерференции. Таким образом, для того, чтобы получить голограмму, когерентный свет, идущий от лазера, необходимо разделить на два пучка, один из которых освещает объект, а другой служит опорным.

В качестве опорной волны, как правило, используются немодулированные волны со сферическими или плоскими фронтами. Опорный пучок направляется таким образом, чтобы он пересекся со светом, прошедшим через объект или отраженным от объекта. Если оба пучка когерентны, то интерференционная картина образуется во всем объеме, в котором перекрываются пучки. Помещенная в область перекрытия светочувствительная среда претерпевает изменения под воздействием световой энергии. После окончания экспозиции и

соответствующей обработки для перевода этих изменений в вариации оптического пропускания получается голограмма.

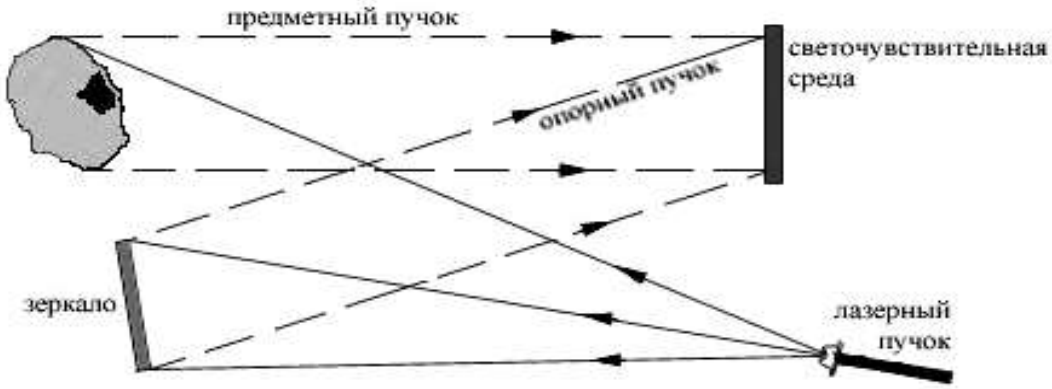


Рис.2.5. Схема записи оптической голограммы

Интенсивность интерференционной картины, образованной простыми немодулированными, плоскими или сферическими волнами, можно представить в виде трехмерной контурной карты. Контурные поверхности на такой карте соответствуют зонам максимальной интенсивности света, для которых выполняется условие $\varphi_2-\varphi_1=2\pi n$.

Если очень тонкая светочувствительная среда помещена в область интерференции и проэкспонирована, на ней зарегистрируются линии пересечения этих поверхностей с плоскостью эмульсии.

В случае толстой среды регистрируются сами контурные поверхности. В первом случае голограмма называется плоской, так как ее свойства подобны свойствам плоских дифракционных решеток. Во втором случае голограмма обладает свойствами объемной дифракционной решетки и называется объемной.

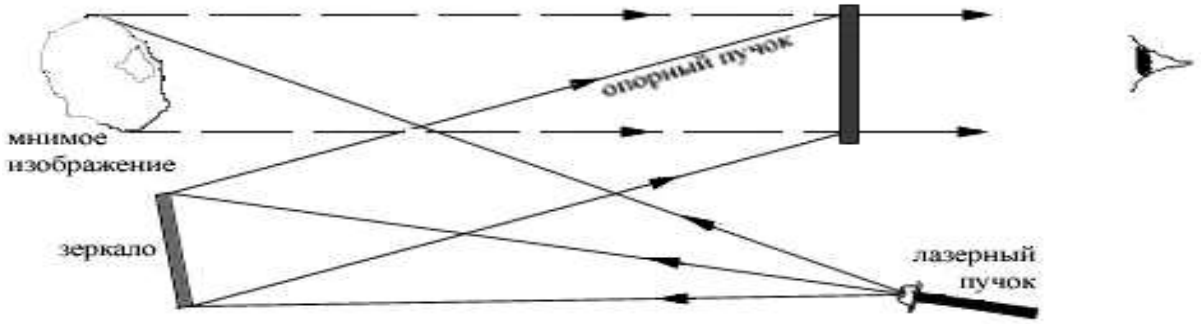


Рис.2.6. Схема восстановления мнимого изображения

Серебряные линии (плоская голограмма) или поверхности, расположенные на расстояниях, сравнимых с длиной волны и могут сильно дифрагировать свет. Поэтому при освещении голограммы исходным опорным пучком часть дифрагирующего на ней света вновь воссоздает волновой фронт, который при регистрации голограммы шел от объекта. Восстановленная волна исходит из голограммы точно также, как первоначальная предметная волна.

Наблюдатель, видящий волну, идентичную исходной предметной волне, совершенно естественно воспринимает её как бы исходящей от мнимого изображения предмета, расположенного там, где ранее находился предмет. С другой стороны, если обратить опорный пучок так, что все лучи обращенного пучка будут направлены противоположно лучам первоначального опорного пучка, то такой сопряженный пучок, освещающий обратную сторону голограммы, создаст действительное изображение предмета в месте первоначального расположения предмета.

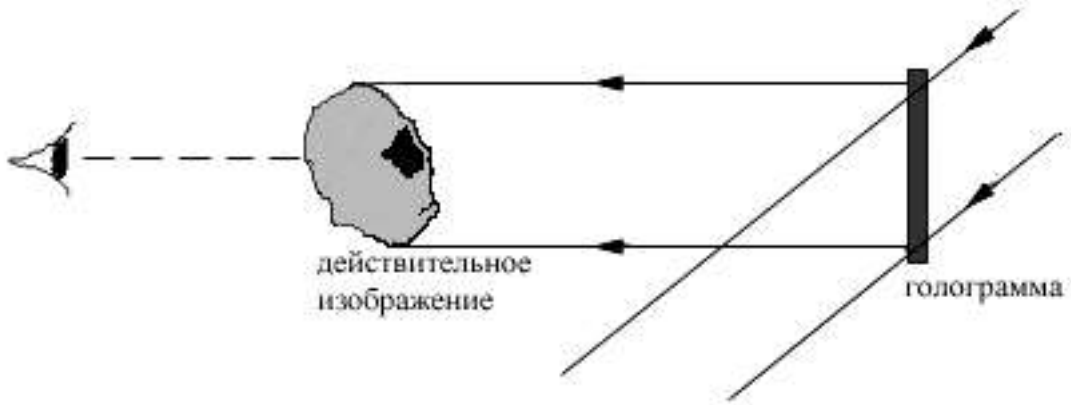


Рис.2.7. Схема восстановления действительного изображения

Поскольку свет сходится к изображению, то действительное изображение может быть непосредственно зарегистрировано фотопластиной или фотоприемником без применения линз. При этом голограмма действует не только как регистрирующая, но и как проекционная система, дающая при освещении опорной волной изображение исходного предмета, без помощи добавочных линз.

Если представить результат записи голограммы в виде

$$I = |E_0 + E_n|^2 = |E_n|^2 + |E_n|^2 + E_0^* E_n + E_0 E_n^*, \qquad (2.2.1.)$$

то результат восстановления изображения можно представить в виде

$$E_0 \cdot I = \left(\left|E_n\right|^2 + \left|E_n\right|^2\right)E_0 + E_n\left|E_0^2\right| + E_n^* E_0^2. \qquad (2.2.2.)$$

Первое слагаемое – опорная волна, амплитуда которой модулирована неким коэффициентом (почернением). Второе – объектная волна, модулированная коэффициентом E_0^2. Третье – волна, комплексно сопряженная с объектом, она несет информацию, близкую к информации об объекте, но отличается от объектной волны обратной фазой. На практике подобное изображение выглядит «вывернутым». Действительное изображение трехмерного объекта обладает этим удивительным свойством – его глубина инвертирована. В этом случае говорят о псевдоскопическом изображении. Визуально возникает ощущение, что предметный план заслоняется более глубокой областью. С помощью коррекции фронта падающей волны возможно восстановление ортоскопических изображений с нормальной глубиной.

2.3. Свойства голограммы.

1. Уникальным свойством голограммы является то, что каждый участок голограммы содержит информацию обо всем объекте, точнее обо всей освещенной его поверхности. И если голограмму разбить на несколько фрагментов, то каждый из них позволяет создать полное изображение объекта. При этом, правда, снижается качество восстановленного изображения.

2. Возможно наблюдение голограммы на разных длинах волн. Скажем, записывается голограмма в микроскопии на коротких волнах (например на рентгеновских), а восстановление в видимом диапазоне дает значительное увеличение. Правда, при этом возможно искажение изображения.

3. Самое замечательное – объемность изображения объекта – следствие регистрации на голограмме пространственной структуры волн с их фазами и амплитудами. При чем, фаза кодируется относительной плотностью, а амплитуда – контрастом интерференционной картины. Регистрация приходящих от разных точек объекта фазовых соотношений, отсутствующая в обычной

фотографии, дает информацию об относительных расстояниях до различных точек объекта. И при наблюдении и фотографировании изображения хорошо заметен параллакс и глубина резкости.

4. Возможность регистрации на одной фотопластинке последовательно нескольких изображений различных объектов, причем каждое из них восстанавливается без особых помех и независимо от других. Последнее используется при разработке ГЗУ и в голографическом кинематографе.

Глава 3. Типы голограмм.

3.1. Геометрический подход.

Рассмотрение основных типов голограмм проще всего начать с обсуждения влияния геометрии получения голограмм. Для этого снова обратимся к картине интерференции сферической волны, исходящей из точечного источника S, находящегося на определенном расстоянии от регистрирующей среды, и опорной плоской волны, распространяющейся, как показано на рисунке. Точечный источник представляет собой элементарный объект, а сферическая волна, исходящая из него – предметную волну. Можно показать, что более сложный объект можно рассматривать как совокупность элементарных точечных источников. Свет от каждого из них интерферирует с опорной волной, а взаимной (перекрестной) интерференцией обычно можно пренебречь. На рисунке представлено одно из поперечных сечений поверхностей максимальной интенсивности, образующихся при интерференции плоской опорной волны и предметной волны от точечного источника. В этом поперечном сечении, содержащем точечный источник и нормаль к плоской волне, следами поверхностей .

Направление луча от источника S и нормали к плоской волне, а также расстояние между соседними плоскостями максимальной эффективности

удовлетворяют уже встречавшемуся выражению: $2d\sin\theta = \lambda$, где 2θ - угол, между направлением луча от источника S и нормалью к плоской волне.

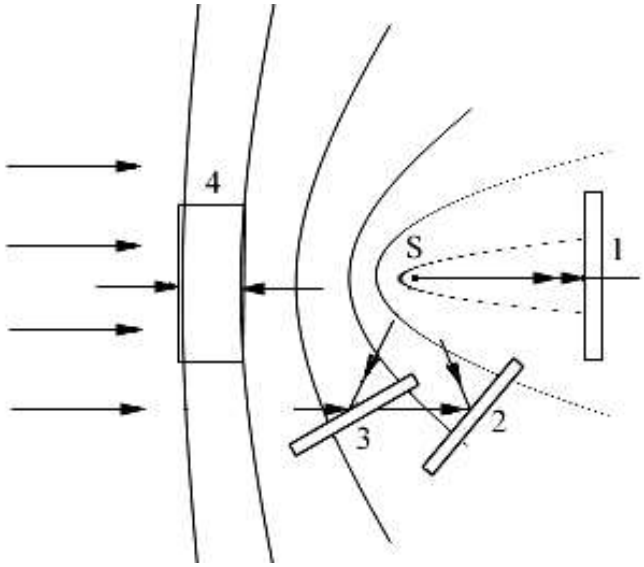


Рис.3.1. Интерференция опорной и предметной волн для разных типов голограмм являются параболы.

В соответствии с пространственным расположением голограмм по отношению к опорным и объектным волнам выделяют три основных типа голограмм. Обратимся к рисунку.

В поле интерференции объектной и опорной волн выделяют четыре основных типа голограмм. Габор, не имея в своем распоряжении лазера, вынужденный максимально использовать свет от источников с малой когерентностью, для получения своих голограмм помещает пластинку в положении 1. Здесь среднее направление света от точки S и направление опорной волны коллинеарны, поэтому полученные таким образом голограммы названы голограммами с осевым опорным пучком, или осевыми, или габоровыми голограммами. Точечный рассеиватель, помещенный в точке S в плоскую волну, создает сферическую волну, а оставшийся не рассеянным свет служит плоской опорной волной. Для интерферирующих волн, полученных этих способом, разность хода предметной и опорной волн минимальна, что позволяет использовать источники света с низкой когерентностью (сам Габор работает с ртутной лампой). Относительно большое расстояние между соседними поверхностями максимумов снижает требования к разрешающей способности

регистрирующей среды. Это все, безусловно, можно отнести к достоинствам голограмм осевых, но они обычно подавляются недостатками.

Во-первых, круг объектов, пригодных для голографирования резко сужен и сводится к транспарантам-объектам, состоящим из малых непрозрачных участков на большом прозрачном фоне.

Во-вторых, имеет место наложение несфокусированного изображения на сопряженное с ним сфокусированное изображение, как следствии осевой геометрии регистрации (и восстановления). Кроме того, всегда существует равномерно освещенный фон, еще более затрудняющий для наблюдения изображения объекта. Многочисленные попытки преодолеть хотя бы этот основной недостаток к успеху не привели.

Победа пришла с другой стороны. Отказавшись от осевой геометрии голографии и введя опорный пучок под углом к пучку, идущему от объекта, Лейт и Упатниекс изобрели наиболее общий и самый успешный метод устранения двойникового изображения и недифрагированного света из восстановленного изображения. Именно они в 1962 году получили голограммы в положении 2. В 1956 году Лейт и Упатниекс, занимаясь радиолокацией, как бы вновь открыли (во всяком случае, для себя) габоровский процесс голографии и разработали подробно теорию голографии, причем во многом работа их шла с оригинальной работой Габора, для них тогда неизвестной.

Благодаря опыту работы в радиолокации они совершенно естественно перенесли понятие несущей частоты и в области оптики, трансформировав разделение частот в радио до разделения пространственных частот, то есть, введя внеосевой метод, с помощью чего «удалось столь эффективно избавится от проблемы сопряженного изображения» (по их собственному выражению). «Запись фазы и ее восстановления считыванием, к чему стремился Габор, были фактически обычным делом для радиоволн уже много лет».

Освещение внеосевой голограммы дало помимо ожидаемой волны нулевого порядка подобной восстановленной с обычной осевой голограммы также пару боковых порядков, ранее не наблюдавшихся. Эти волны определены

от волны нулевого порядка, что позволяет наблюдать изображение с невиданным доселе качеством. Причем один боковой порядок формировал мнимое изображение, полностью освобожденное от сопряженного изображения и других нежелательных составляющих. Другой первый порядок формировал действительной изображение того же качества. Оба изображения были позитивными!

Данные результаты получены уже с применением ртутной лампы, поскольку устранение разности хода производится независимо и возможно с интерферометрической точностью, но применение лазера усилило преимущества метода. Кроме того, данная схема записи голограмм применима не только к полупрозрачным, но и к рассеивающим (или отражающим) объектам, то есть сняты любые ограничения в этой области. Разнесение пучков позволяет также независимо изменять соотношение их интенсивностей, что обеспечивает, как будет далее сказано, оптимальную с точки зрения фотохимии запись голограммы.

Рассмотренные два типа голограмм можно отнести к «тонким» и «двумерным», так как в соответствии с уравнением решетки

$$d=\lambda/(2 \sin\theta) \qquad (3.1.1)$$

период полос d дифракционной структуры оказывается больше ее толщины ($d>>h$).

Один из вариантов лейтовской голограммы – голограмма сфокусированных изображений. При ее получении объект или его изображение (например, с помощью линз) располагается вблизи регистрирующей поверхности. Для записи и восстановления могут быть использованы неточечный опорный и восстанавливающий пучки (последний может быть и немонохроматичным). Голограммы сфокусированного изображения нечувствительны к угловым смещениям источника освещения в процессе восстановления. В отличие от традиционной внеосевой голограммы каждая точка объекта «привязана» к определенной точке голограммы.

Для голограммы в положении 3 угол между объектным и опорным пучками около 90° и расстояние между соседними поверхностями интерференционных максимумов уменьшается. При этом толщина фотоэмульсии (10-15 мкм) больше получаемого шага полос $d<<h$ и зарегистрированная голограмма может рассматриваться как объемная дифракционная решетка, соответственно и голограмма 3 (а особенно 4) называется объемной или «толстой». Голограмма 3 описана Ван Хирденом в 1963 году и называется «брэгговской» в соответствии с тем, что трактуется она как ряд частично отражающих поверхностей, селективный отклик которых на падающий свет соответствует закону Брэгга.

В положении 4 плоская опорная волна падает на фотопластинку с одной стороны, а сферический волновой фронт (объектная волна) - с другой. В этом случае расстояние между интерференционными поверхностями близко к $\lambda/2$, и эти поверхности близки к параллельным поверхности фотопластинки плоскостям. Описаны данные голограммы в 1962 году Денисюком Ю.Н. и названы голограммами во встречных пучках (что очевидно из чертежа) или голограммами Денисюка. Интерференционная картинка записывается в толстом слое эмульсии в виде объемной структуры частично отражающих поверхностей (например, серебра). Даже в эмульсии 12-15 мкм толщиной может образоваться 50-100 таких слоев. Если такую структуру осветить опорной волной, она до выхода из эмульсии последовательно рассеивается от большего числа периодически расположенных поверхностей максимальной плотности (зеркал). Чтобы амплитуда результирующей дифрагирующей волны была максимальна, необходима, чтобы рассеянные (отраженные) разными слоями волны были синфазны. В соответствии с этим усиливаются лишь волны, удовлетворяющие условию Брэгга. Поэтому эти голограммы можно восстанавливать белым (полихромным) светом. Голограмма сама выполняет роль узкополосного интерференционного фильтра, «вырезая» излучении только в узком спектральном диапазоне. Это свойство называется *селективностью голограммы*, и она тем лучше, чем толще эмульсия, и чем больше угол между опорной и

объектной волнами. В диапазоне видимого излучения при любом угле падения условие Брэгга выполняется только для одной длины волны. Данное свойство используется при формировании цветных изображений.

Эти голограммы называют также отражательными, поскольку освещающая волна во время процесса восстановления волнового фронта кажется отраженной в направлении предметной волны.

3.2. Амплитудные и фазовые голограммы.

Независимо от пространственного положения источника опорного фронта, объекта и голограммы интерференционная структура может быть зарегистрирована авточувствительным материалом в виде амплитудной или фазовой голограммы. Не вдаваясь пока в подробности отметим основные черты этих способов записи.

Амплитудная запись характеризуется пространственным изменением амплитудного пропускания, под которым понимают отношения амплитуды прошедшего света к амплитуде падающего. В классической оптике понятие «пропускание» употребляется в энергетическом смысле и определяется как отношение интенсивности прошедшего света к интенсивности падающего:

$$T=I_T/I_0 \qquad (3.2.1)$$

При записи происходит изменение амплитудного пропускания, которое определяется экспозицией. Большему количеству освещения соответствует меньшее пропускание. Пространственная модуляция интенсивности света в интерференционном поле в результате воздействия на светочувствительную среду в течение определенного промежутка времени регистрируется в виде пространственной модуляции амплитудного пропускания материала.

Амплитудная запись влияет на амплитуду световой волны, а фазовая запись – на фазу. Во втором случае количество определяет изменение тех параметров записывающего материала, которые влияют на фазу световой волны, проходящей через этот материал.

Фаза Ф световой волны определяются разностью хода δ:

$$\Phi=(2\pi/\lambda_n)\delta \qquad (3.2.2)$$

где λ_n – длина световой волны внутри записывающей среды, коэффициент преломления которой равен n. Учитывая $\lambda_{n=}\lambda/n$, имеем

$$\Phi=(2\pi/\lambda_n)n\delta \qquad (3.2.3)$$

Фазовую запись можно осуществлять как путем пространственной модуляции коэффициента преломления, так и путем модуляции длины оптического пути в среде, то есть, изменяя толщину слоя, поверхностный рельеф и т.д.

В случае линейной зависимости фазы от количества освещения абсолютная величина пропускания равна единице, изменяется лишь фазовый член.

Следует отметить также, что на практике получить условия чисто амплитудной или чисто фазовой записи практически невозможно, поэтому реальная голограмма сочетает оба эти случая и, является амплитудно-фазовой.

3.3. Голограммы Френеля, Фраунгофера и Фурье.

Рассматривая все голограммы с точки зрения геометрии дифракции регистрируемых на голограмме пучков, можно также выделить три основных типа.

Предположим, что объект освещается когерентной световой волной, и рассеянная им световая волна, несущая информацию о предмете, падает на освещаемую опорным пучком фотопластинку. В зависимости от видимого расположения объекта и пластинки, а также от наличия оптических элементов между ними, возможны различные варианты связи амплитудно-фазовых распределений объектной волны в плоскостях голограмм и объекта.

3.3.1. Голограмма Френеля.

Если фотопластинка помещена в области дифракции ближнего поля (области дифракции Френеля) на произвольном расстоянии от источника

опорной волны, то записывается голограмма Френеля. Область дифракции Френеля характеризуется соотношением $\delta \le d \le x_n$, где $\delta = 1/\Omega_z$ – наименьший линейный размер детали предмета, Ω_z – пространственная частота, x_n – наибольший линейный размер предмета.

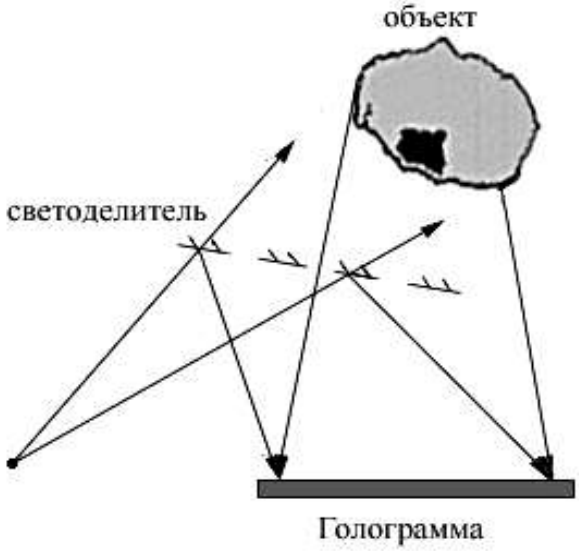


Рис.3.2. Схема записи голограммы Френеля

Это наиболее простой способ регистрации голограмм, так как он позволяет получать голограмму и затем восстанавливать волновой фронт без использования линз или каких-либо других оптических устройств. Это самый распространенный тип голограмм. Голограмма может быть получена, например, по схеме, представленной на рисунке. Собственно, все свойства голограмм Лейта и Упатиекса – это свойства внеосевых голограмм Френеля, в случае же осевой голографии Френеля мы приходим к голограмме Габора.

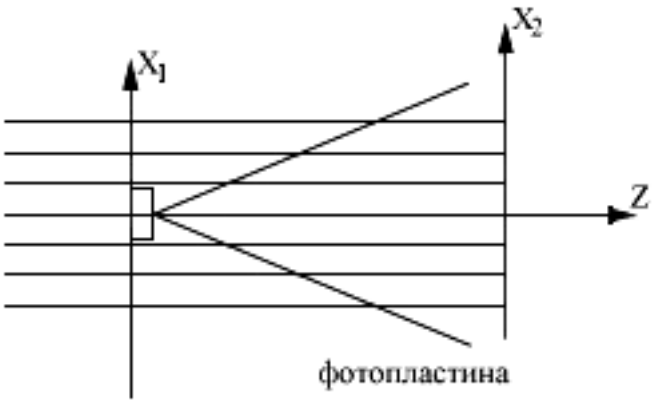
3.3.2. Голограмма Фраунгофера.

Если фотопластинка помещена на расстоянии d от предмета причем

$$\frac{x_1^2 + y_1^2}{\lambda} << d\,, \qquad (3.3.1)$$

где x_1 и y_1 - координаты произвольной точки предмета, λ - длина волны света, то на фотопластинке будет зарегистрирована картина дифракции Фраунгофера (картина дальнего поля). В этом случае появляется возможность и для осевой

голограммы наблюдать одно изображение без искажающего влияния со стороны другого. Данная возможность реализуется, например, для исследования размеров



и форм движущихся аэрозольных частиц.

Рис.3.3. Схема записи голограммы Фраунгофера

Положим, что предмет, пропускания которого описывается функцией $\bar{S}(x_1,y_1)$, имеющий Фурье-образом функцию $\bar{S}(\xi,\eta)$:

$$\bar{S}(\xi,\eta) = \int\int_{-\infty}^{+\infty} S(x,y)\exp\{-2\pi\iota(\xi x + \eta y)\}dxdy \qquad (3.3.2.)$$

освещается плоской волной в направлении, нормальном к плоскости x_1y_1.

Комплексная амплитуда $\bar{a}(x_2,y_2)$ света в плоскости фотопластины, расположенной в области дифракции дальнего поля на расстоянии d от плоскости x_1y_1:

$$\vec{a}(x_2,y_2) = \frac{ia}{\lambda d}\exp\left[-\frac{ia}{\lambda d}\left(x_2^2 + y_2^2\right)\right]\bar{S}(\xi,\eta)\ , \qquad (3.3.3)$$

где $S(\xi,\eta)$ - Фурье-образ функции пропускания $S(x_1,y_1)$. Объект освещается плоской волной, фото пластина экспонируется в области дальнего поля, а в качестве опорной волны использован свет, прошедший через объект без дифракции.

Если объект настолько мал, что его можно рассматривать как расположенный на оси точечный рассеиватель (аэрозольная частица), то его пропускание апроксимируется δ - функцией, а объектная волна - по сути немодулированная сферическая. Тогда на стадии восстановления амплитуды $\bar{\alpha}(x_2,y_2)$, записанной на голограмме Фраунгофера, формируется идентичная

волна, исходящая из мнимого изображения, в плоскости же действительного изображения эта волна создает только однородный фон, почти не мешающий наблюдению действительного изображения.

Таким образом, *голограмма Фраунгофера* - это голограмма, на которой регистрируется интерференционная структура, образованная дифракционной картиной от предмета в области дальнего поля и сферической волны от опорного источника, некомпланарного предмету.

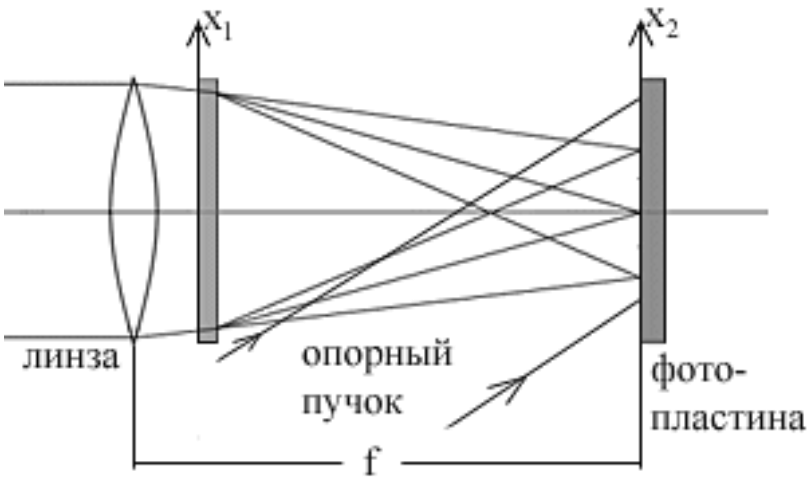


Рис.3.4. Схема записи голограммы Фраунгофера с применением линзы

Как правило, опорный источник располагается на бесконечности и опорная волна - плоская. Все сказанное выше относится к без линзовой голографии Фраунгофера, но возможна регистрация этих голограмм с помощью линзы с соблюдением следующих условий:

1. Расположенный вплотную к линзе транспарант освещается плоской волной.
2. Используется плоская (например, внеосевая опорная волна).
3. Предметная и опорные волны интерферируют в плоскости голограммы, помещенной в задней фокальной плоскости линзы.

3.3.3. Голограммы Фурье.

В ряде случаев представляет большой практический интерес возможность формирования в плоскости голограммы распределение амплитуд, соответствующее либо точному Фурье - образу предмета,

либо произведению Фурье-образа на медленно меняющийся фазовый множитель. Общим для различных методов, реализующих данное требование, является следующее: опорный источник должен располагаться строго в той же (входной) плоскости, что и предмет.

Фурье- голограммой называют голограмму в том случае, если на ней регистрируется интерференция двух волн, комплексные амплитуды которых в плоскости голограммы являются Фурье-образами предмета и опорного источника.

Такие голограммы применяются в качестве пространственных фильтров для опознавания образов, а свойства преобразования Фурье лежат в основе процесса опознавания.

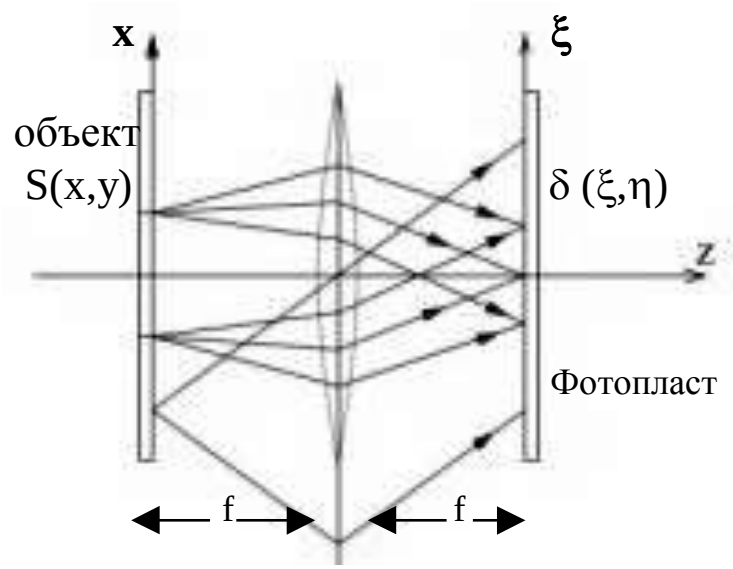


Рис.3.5. Схема записи голограммы Фурье

Известно, что Фурье-образ двумерного предмета формируется в задней фокальной плоскости линзы. В передней фокальной плоскости линзы расположен и точечный источник опорной волны. При восстановлении дифрагированный на голограмме свет сходится, образуя два действительных изображения одной интенсивности, отличающихся тем, что одно - зеркальное отражение другого.

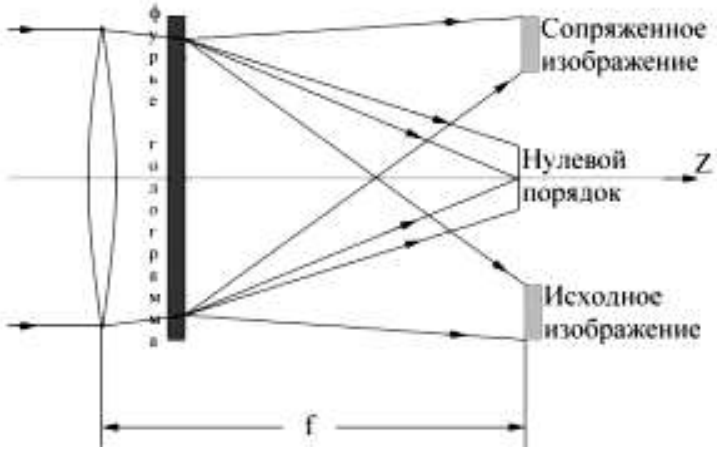


Рис.3.6. Схема восстановления голограммы Фурье.

Самое последнее свойство Фурье-голограмм, записанных с плоской опорной волной, состоит в том, что формируемые ими изображения остаются неподвижными при перемещении голограммы! Благодаря этому с голограмм, записанных на пленке, намотанной на барабан, можно восстановить неподвижные изображения при вращении барабана, что реализовано в ГЗУ.

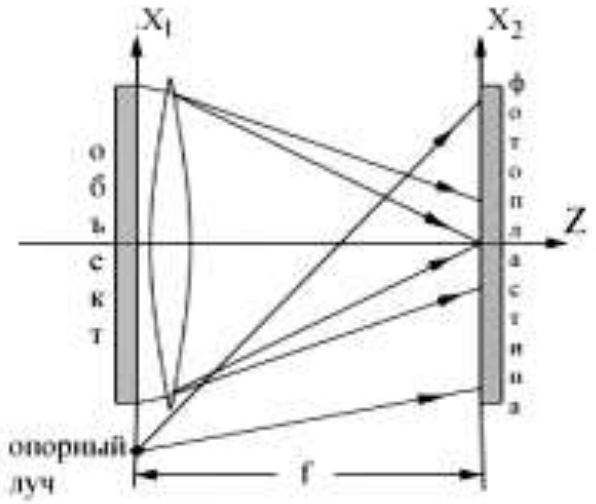


Рис.3.7. Схема записи квази-Фурье-голограммы

В некоторых случаях можно без особых потерь реализовать упрощенный способ записи голограмм Фурье, называемых в этом случае квази-Фурье-голограммами. Для этого:

1. фото пластинка расположена в задней фокальной плоскости линзы,
2. предмет - транспарант и опорный источник находятся в одной и той же плоскости, расположенной перед линзой или за ней, но не являющейся

передней фокальной плоскостью линзы. Предмет или линза (что ближе) освещается плоской волной.

В этом случае на голограмме Фурье-образ транспаранта умножается на фазовый множитель сферической волны, представляющий из себя пропускание тонкой рассеивающей линзы, которое можно учесть.

Преобразования Фурье можно рассматривать как разложение сплошной световой волны на множество плоских волн, направляющие косинусы которых соответствуют пространственным частотам.

Плоская волна, испытавшая дифракцию на транспаранте, и распространяющаяся под углом θ к оси Z, характеризуется пространственной частотой $\eta=(\sin\theta)/\lambda$. И если плоская волна падает на тонкую линзу с примыкающим транспарантом, то в задней фокальной плоскости линзы образуется, как уже говорилось, распределение комплексных амплитуд, пропорциональное произведению фазового множителя сферической волны и Фурье-образа транспаранта.

Пространственная частота ξ и η есть

$$\xi = \frac{X_2}{\lambda f}, \eta = \frac{Y_2}{\lambda f}, \qquad (3.3.4)$$

где x_2,y_2 - координаты Фурье-образа пропускания транспаранта.

Линза осуществляет частотный анализ функции транспаранта, то есть если разложить эту функцию по гармоникам пространственных частот, то каждая точка в фокальной плоскости линзы отвечает своей пространственной частоте с соответствующей фазой. А поскольку информация о каждой точке транспаранта содержится в любой точке Фурье-образа транспаранта, то потеря части спектра не приводит к потере всего образа, а лишь снижает разрешение и яркость это его изображение. Это объясняет высокую надежность и помехоустойчивость информации. Кроме того, данные голограммы имеют максимальную плотность хранения информации, т.к. регистрируются на малой площади в фокальной плоскости.

Глава 4. Анализ голограмм.

4.1. Дифракционная эффективность.

Качество голографического изображения характеризуется несколькими параметрами. Один из важнейших является дифракционная эффективность голограмм. Эта величина определяет, сколько света необходимо при реконструкции для создания голографического изображения.

Под *дифракционной эффективностью* (ДЭ) голограммы понимают обычно отношение интенсивности света первого дифракционного порядка к интенсивности реконструирующего пучка:

$$\eta = I_I / I = \left| A_I / A \right|^2 \qquad (4.1.1)$$

Для восстановления максимально яркого изображения полезно знать максимальную дифракционную эффективность голограмм разного типа.

Начнем со случая плоских голограмм, образованных при интерференции плоской наклонной волны $\bar{r} = r \exp(2\pi\iota\xi x)$ и аксиальной немодулированной плоской предметной волны с амплитудой a.

1)В случае <u>амплитудной голограммы</u>, зависящую от экспозиции часть амплитудного пропускания t_E, имеем в следующем виде:

$$t_E \sim I = a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \cos(2\pi\xi x), \text{ или} \qquad (4.1.2)$$

$$t_E = t_{E_0} + t_1 \cos(2\pi\xi x). \qquad (4.1.3)$$

Полное амплитудное пропускание плоской амплитудной голограммы $t = t_0 - t_E$, где

t_0- пропускание неэкспонированной пластинки. Если $t_0=1$ (пластинка абсолютно прозрачна), то t изменяется в пределах: $0 \le t \le 1$. Максимальный диапазон изменения t достигает при $t_{Eo}=1/2$, и $t_1=1/2$. При этих условиях

$$t = t_0 - t_E = 1 - \frac{1}{2} - \frac{1}{2}\cos(2\pi\xi x) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2}\cos(2\pi\xi x) =$$
$$= \frac{1}{2} - \frac{1}{4}\exp\{2\pi i\xi x\} - \frac{1}{4}\{-2\pi i\xi x\} \qquad (4.1.4)$$

Если осветить голограмму аксиальной плоской волной единичной амплитуды, то за голограммой амплитуда волны и равна этому пропусканию. Свет дифрагирует только в нулевом и двух первых порядках. Значит, амплитуда дифрагированной волны 1-го порядка (любой) составляет 1/4 амплитуды падающего света, а интенсивность $I_{I+1}=(1/16)I$. Поэтому дифракционная эффективность (максимальная!) плоской амплитудной голограммы. $\eta_{max}=1/16\approx 6{,}25\%$.

Если голограмма синтезирована на ЭВМ, можно синусоидальное пропускание реальной голограммы записать прямоугольной периодической функцией. При этом, возможно достижение максимальной ДЭ несколько выше: $\eta_{max}=(1/\pi)^2\approx 10{,}1\%$.

2)Для фазовой голограммы в отсутствие потерь считаем пропускание t=1, тогда комплексное пропускание

$$\bar{t} = t\exp\{i\varphi(x)\}=\exp\{i\varphi(x)\}. \qquad (4.1.5)$$

Фазовый сдвиг $\varphi(x)$, приобретаемый плоской волной при прохождении обработанной голограммы, пропорционален интенсивности света при экспозиции:

$$\varphi(x)\approx a^2+r^2+2\cdot a\cdot r\cdot\cos(2\pi\xi x)=\varphi_0+\varphi_1\cos(2\pi\xi x). \qquad (4.1.6)$$

Пропускание голограммы:

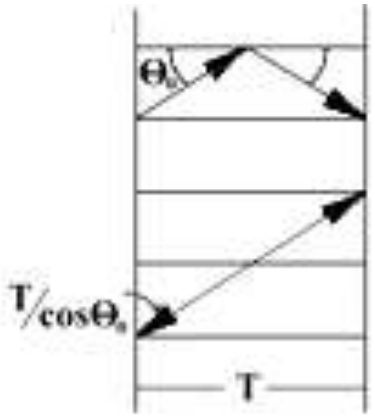
$$\vec{t}=t\exp\{i\varphi_0\}\exp\{i\varphi_1\cos(2\pi\xi x)\}\sim\exp\{i\varphi_1\cos(2\pi\xi x)\}. \qquad (4.1.7)$$

Последнее можно представить в виде ряда Фурье:

$$\bar{t}=\exp\left(i\varphi_1\cos(2\pi\xi x)\right)=\sum_{-\infty}^{+\infty}i^n J_n(\varphi_1)\exp(in2\pi\xi x), \qquad (4.1.8)$$

где J_n - функция Бесселя первого рода n-го порядка. При освещении голограммы аксиальной плоской волной единичной амплитуды, амплитуда дифрагированной волны 1-го порядка описывается функцией $J_1(\varphi_1)$. Ее максимальное значение 0,582, соответственно максимальная ДЭ тонкой фазовой голограммы $\eta_{max}=33{,}9\%$. Вновь для синтезированных голограмм с прямоугольной функцией пропускания ДЭ выше: $\eta_{max}\approx 40{,}4\%$.

3)<u>Объемная фазовая пропускающая голограмма.</u> Вновь полагаем амплитуду падающей волны равной 1. Если свет падает под углом Брэгга, то ДЭ может достичь значения η_{max}=100% в случае, когда $\frac{n_1 T}{\cos\theta_0} = \frac{\lambda_a}{2}$.



Здесь T - толщина голограммы ,
θ_0 - угол падения (отражения), λ_a - длина волны в среде, $T/\cos\theta_0$ - длина пути света в среде.

Рис.4.1. Дифракция Брэгга

При несоблюдении условия Брэгга ДЭ существенно ниже.

4)<u>Объемная абсорбционная пропускающая голограмма.</u> В этом случае дифракция света на голограмме обусловлена только вариациями коэффициента поглощения (показатель же преломления постоянен). Для брэгговского падения единичной волны η_{max}=1/27≈3,7%. Это хуже, чем для тонкой абсорбционной голограммы.

5)<u>Объемная фазовая отражательная голограмма.</u> Эффективность ее непрерывно возрастает по мере увеличения экспозиции и асимптотически приближается к абсолютной величине $\eta_{max}\to$100% при падении под углом Брэгга. При этом отсутствуют какие-либо условия на толщину и другие параметры.

6)<u>Объемная абсорбционная отражательная голограмма.</u> Максимальное значение ДЭ η_{max}=7,2%. Последнее установлено и экспериментально, то есть ДЭ отражательных абсорбционных голограмм достигает максимума, когда фотопластинка совсем темная.

Суммируем все сказанное в таблице.

Толщина регистр. среды	Тонкая		Толстая			
Вид голограммы	Пропускающие		Пропускающие		Отражающие	
Модулируемая величина	Амплитуда	Фаза	Коэф. пропуск.	Показ. преломл.	Коэф. пропуск.	Показ. преломл.
ДЭ макс. % (теоретически)	6,25	33,9	3,7	100	7,2	100
ДЭ макс. % (эксперимент.)	6,00	32,6	3,0	90	3,8	80

4.2.Видность (контраст) интерференционных полос.

Для успешной регистрации голограммы прежде всего должно выполнятся условие высокого контраста интерференционных полос. Интенсивность интерференционной картины, образованной двумя пучками

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos(\varphi_2 - \varphi_1) \qquad (4.2.1)$$

Высокий контраст, или большая глубина модуляции, означает, что амплитуда, изменяющаяся в пространстве косинусоидального члена, сравнима по величине с постоянным членом (I_1+I_2). Чем больше амплитуда косинусоидального члена, тем больше амплитуда дифрагированной на голограмме волны, на стадии восстановления. Для точного восстановления исходной предметной волны необходимо, для амплитудной голограммы к примеру, чтобы амплитудное пропускание голограммы линейно зависело от интенсивности регистрируемой на ней интерференционной картины.

Количественно контраст характеризуется *видностью полос*:

$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}, \qquad (4.2.2)$$

где I_{max} и I_{min} - максимальная и минимальная интенсивность интерференционных полос в плоскости наблюдения. Обычно в разных участках

плоскости наблюдения видность различна, поэтому и определяют для такой области, размеры которой превышают шаг полос.

Видность полос зависит от степени когерентности $|\mu_t(\tau)|$ между интерферирующими пучками, от угла Ω между направлениями поляризаций пучков и от отношения R интенсивности обоих пучков ($R=(r/a)^2$).

Опустим громоздкий вывод и приведем явный вид этой зависимости.

$$V = \frac{2ra|\mu_t(\tau)|\cos\Omega}{r^2 + a^2} = \frac{2|\mu_t(\tau)|\sqrt{R}\cos\Omega}{R+1}. \qquad (4.2.3)$$

Видно, что $V(R)=V(1/R)$, то есть голограмме все равно, какая волна опорная, какая предметная, важно лишь соотношение. Видность достигает максимального значения $V_{max}=1$ при условии, что каждый из трех параметров равен единице.

Для $\mu_t(\tau)$ это достигается, если оптическая разность хода $\Delta L=c\tau$ опорного и предметного пучков меньше длины когерентности ΔL_H. Кстати, наблюдение видности полос в зависимости от разности хода пучков может служить простым способом определения длины когерентности лазера (при постоянных R=1 и $\cos\Omega=1$).

Условие R=1 не выполняется по всей плоскости голограммы, т.к. информация о предмете передается пространственной модуляцией предметной волны. И данное условие выполнимо только в местах с наибольшей интенсивностью предметной волны. На практике требуется R>1.

Условие на $\cos\Omega=1$ добивается достаточно легко, требуется лишь иметь на входе пучок с вертикальной поляризацией.

Видность интерференционных полос связана и с линейностью записи волнового фронта, т.е. с тем, насколько точно восстанавливается предметная волна. Для <u>точного</u> восстановления исходящей (предметной) волны в случае, например, амплитудной голограммы, необходимо, чтобы амплитудное пропускание последней линейно зависело от интенсивности регистрируемой на ней интерференционной картины.

Экспозиция, которой подвергается фотоматериал

$E(x,y)=Ip(x,y)\tau_e=k_1I(x,y)\tau_e$, (4.2.4)

где τ_e- время экспозиции.

Голографическая запись называется *линейной*, если по всей плоскости голограммы комплексная амплитуда восстановленной волны пропорциональна исходной амплитуде предметной волны. Вспоминая, что комплексное амплитудное пропускание фотоматериала $\bar{t} = t\ \exp(i\varphi)$, дифференцируем по экспозиции

$$\frac{d\bar{t}}{dE} = \frac{dt}{dE} \cdot \exp(i\varphi) + it \cdot \exp(i\varphi)\frac{d\varphi}{dE}. \qquad (4.2.5)$$

Под воздействием света, падающего на светочувствительный слой, могут изменяться и модуль t и фаза φ его пропускания. Хотя фотоматериалы реагируют на действие света изменением как одной, так и другой величины, у большинства материалов заметно изменяется лишь одна из них.

Если $\frac{dt}{de} = const$ - это условие линейной записи *амплитудной* голограммы. И для определения области линейности данного фотослоя нужно построить кривую зависимости амплитудного пропускания от экспозиции (t-E- кривая).

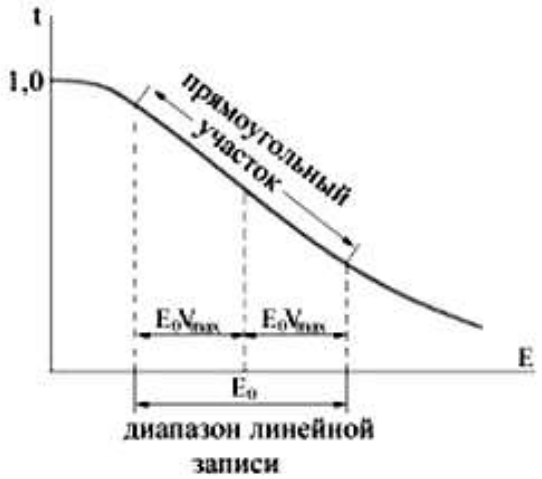


Рис.4.2. t-E кривая фотоматериалов

Для записи *фазовой* голограммы условие линейности $\exp(i\varphi)\frac{d\varphi(E)}{dE} = const$, где φ(E) - зависящая от экспозиции часть фазы амплитудного пропускания. Тривиальное решение: φ=const и $\frac{d\varphi}{dE} = 0$, т.е. строго говоря, линейная запись фазовых голограмм невозможна. Однако для малых, но конечных значений φ(E) экспоненциальный множитель близок к 1, т.е. exp(iφ)≈1 и условие линейности запишем $\frac{d\varphi(E)}{dE} = const, \varphi(E) << 1$.

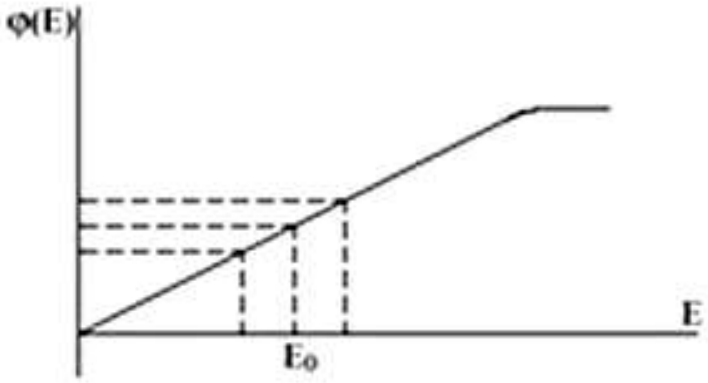


Рис.4.3. φ -E кривая фазового материала

У многих материалов прямолинейный участок не доходит до значения E=0, а т.к. нижняя граница линейного диапазона $E=E_0(1-V_{max})$, то и видность V всюду меньше 1, т.е. не достигает максимального значения.

4.3. Геометрический анализ голограмм.

Для того, чтобы понять свойства образующихся при восстановлении мнимого и действительного изображений, в том числе и увеличение и геометрические искажения, достаточно проанализировать голограммы точечного источника. Последних в природе не существует, однако протяженные источники и освещенные объекты можно рассматривать как набор точечных источников.

Рассматриваем один предметный точечный источник. Опорный источник так же считаем точечным. Далее делаем следующие *предположения*:

1. Освещающие волны полностью когерентны,
2. Голограмма экспонируется и проявляется таким образом, чтобы и амплитудное пропускание было пропорционально интенсивности интерференционной картины (линейная запись),
3. Голограммы действуют как плоские (двумерные) дифракционные решетки.

Считаем, что амплитуда сферической волны, исходящей из каждого точечного источника, приблизительно постоянна в плоскости голограммы. Рассмотрим, каким образом предметная, опорная и освещающая волны в любой точке Q в плоскости голограммы характеризуются фазой в этой точке по отношению к фазе в фиксированном начале координат O. Считая голограмму очень тонкой, относительно фазы можно рассчитать по геометрическим разностям хода световых лучей.

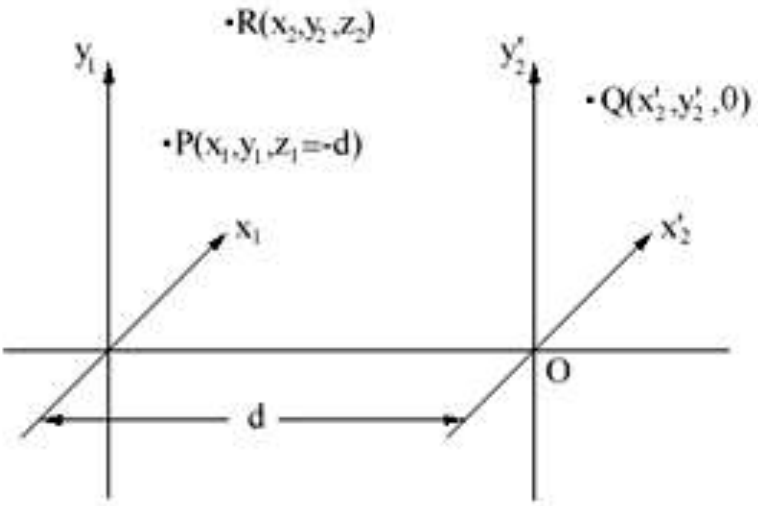


Рис.4.4. Геометрия схемы записи голограммы

Пусть $\bar{\alpha} = \alpha_0 \exp(\iota\varphi_a)$ комплексная амплитуда волны, приходящей в плоскость голограммы из точечного предметного источника, $\bar{r}=r_0\exp(\iota\varphi_2)$ - то же для опорной. Тогда регистрируемая в плоскости голограммы интенсивность:

$$I = a_0^2 + r_0^2 + 2a_0 r_0 \cos(\varphi_r - \varphi_a), \qquad (4.3.1)$$

причем наибольший интерес представляют интерференционные члены с разностью фаз ($\varphi_r - \varphi_a$). Предметный источник расположен в плоскости x_1y_1,

отстоящей от начала координат на r_1=-d. Начало координат в плоскости $x_2'y_2'$ (штрихи пока не обсуждаем до рассмотрения увеличения голограммы). Опорный точечный источник R расположен в некоторой произвольной плоскости $x_r y_r$ на расстоянии z_r от плоскости голограммы. Поскольку P и R - точечные источники, излучающие сферическую волну, фаза ее в любой точке пространства пропорциональна радиальному расстоянию от этой точки до источника. Разность фаз φ_a, соответствующая разности хода PQ-PO, равна $|\varphi_a| = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)|PQ - PO|$.

Знак здесь выбирается так: если волна расходящаяся и если PQ>PO, то $\varphi_a = -\frac{2\pi}{\lambda}(PQ - PO)$. Так же и для опорной: «+» для сходящейся, «-» для расходящейся.

Тогда

$$\varphi_a = -\frac{2\pi}{\lambda_1}(PQ - PO) == -\frac{2\pi}{\lambda_1}\left\{\left[\left(x_2' - x_1\right)^2 + \left(y_2' - y_1\right)^2 + z_1^2\right]^{\frac{1}{2}} - \left[x_1^2 + y_1^2 + z_1^2\right]^{\frac{1}{2}}\right\} =$$

$$= \frac{2\pi}{\lambda_1} z_1 \left\{\left[1 + \frac{\left(x_2' - x_1\right)^2 + \left(y_2' - y_1\right)^2}{z_1^2}\right]^{\frac{1}{2}} - \left[1 + \frac{x_1^2 + y_1^2}{z_1^2}\right]^{\frac{1}{2}}\right\} \qquad (4.3.2)$$

при этом предполагается, что Z_1-отрицательно, поэтому знак φ_a остается отрицательным. Если P и Q не удалены от оси z, и z_1 достаточно велико, то φ_a в первом приближении (достаточно точно) представляется в виде:

$$\varphi_a = \frac{2\pi}{\lambda_1}\left[\frac{1}{2z_1}\left(x_2'^2 + y_2'^2 - 2x_2'x_1 - 2y_2'y_1\right)\right] \qquad (4.3.3)$$

Фаза опорной волны в т. Q рассчитана аналогично:

$$\varphi_r = \frac{2\pi}{\lambda_1}\left[\frac{1}{2z_2}\left(x_2'^2 + y_2'^2 - 2x_2'x_r - 2y_2'y_r\right)\right] \qquad (4.3.4)$$

Разность фаз опорной и предметной волн:

$$\varphi_r - \varphi_a = \frac{2\pi}{\lambda_1}\left[\left(x_2'^2 + y_2'^2\right)\cdot\left(\frac{1}{2z_2} - \frac{1}{2z_1}\right) - \right.$$

$$\left. - x_2' \cdot \left(\frac{x_2}{z_2} - \frac{x_1}{z_1}\right) - y_2'\left(\frac{y_2}{z_2} - \frac{y_1}{z_1}\right)\right] = \frac{2\pi}{\lambda_1}\Delta l \qquad (4.3.5)$$

Величина в […] - разность хода волн в точке Q. Не останавливаясь далее на получении голограммы, перейдем сразу к ее восстановлению.

Предположим, что полученную голограмму можно до восстановления увеличить или уменьшить. Это учитывается обозначением координат в плоскости голограммы через $x_2=mx_2'$, $y_2=my_2'$, где m - линейное увеличение. Кроме того, длина волны λ_2 при восстановлении не обязательно должна быть равна длине волны λ_1 при получении. Их отношение обозначим $\mu=\lambda_2/\lambda_1$.

Восстанавливающая волна исходит из точечного источника $C(x_c y_c z_c)$. Последний не обязательно совпадает с исходным опорным источником. Дифракция происходит за счет двух членов комплексного пропускания, т.е. $\bar{\vec{c}} \cdot \vec{r} \cdot \vec{a}^* + \vec{c} \cdot \vec{r}^* \cdot \vec{a}$, где первый член дает действительное изображение, а второй мнимое. Фаза дифрагированной волны:

$\vec{c} \cdot \vec{r} \cdot \vec{a} = c_0 r_0 a_0 \exp\{i(\varphi_c + \varphi_r - \varphi_a)\}$ обозначается: $\varphi_R=\varphi_c+\varphi_r-\varphi_a$. Ааналогично $\varphi_V=\varphi_c-\varphi_r+\varphi_a$. Как и выше для φ_a и φ_r запишем в первом приближении φ_c

$$\varphi_c(x_2, y_2) \approx \frac{2\pi}{\lambda_2}\left[\frac{1}{2z_c}\left(x_2^2 + y_2^2 - 2x_2x_c - 2y_2y_c\right)\right]. \qquad (4.3.6)$$

Подставляем φ_c,φ_r и φ_a, получаем

$$\varphi_v = \frac{2\pi}{\lambda_2}\left(\frac{1}{2}\right)\left(\frac{x_2^2 + y_2^2 - 2x_2x_c - 2y_2y_c}{z_c}\right) + \frac{2\pi}{\lambda_1}\left(\frac{1}{2}\right)\left(\frac{x_2'^2 + y_2'^2 - 2x_2'x_1 - 2y_2'y_1}{z_1}\right) -$$

$$- \frac{2\pi}{\lambda_1}\left(\frac{1}{2}\right)\left(\frac{x_2'^2 + y_2'^2 - 2x_2'x_r - 2y_2'y_r}{z_r}\right) \qquad (4.3.7)$$

Вводя $x_2=mx'_2$, $y_2=my'_2$ и $\mu=\lambda_2/\lambda_1$, получим

$$\varphi_v(x_r, y_2) = \frac{\pi}{\lambda_2}\left[\left(x_2^2 + y_2^2\right)\left(\frac{1}{z_c} + \frac{\mu}{m^2 z_1} - \frac{\mu}{m^2 z_r}\right) - 2x_2\left(\frac{x_c}{z_c} + \frac{\mu x_1}{m z_1} - \frac{\mu x_r}{m z_r}\right) - \right.$$

$$\left. - 2y_2\left(\frac{y_c}{z_c} + \frac{\mu y_1}{m z_1} - \frac{\mu y_r}{m z_r}\right)\right] \qquad (4.3.8)$$

Аналогично:

$$\varphi_R(x_2, y_2) = \frac{\pi}{\lambda_2}\left[\left(x_2^2 + y_2^2\right)\left(\frac{1}{z_c} - \frac{\mu}{m^2 z_1} - \frac{\mu}{m^2 z_r}\right) - 2x_2\left(\frac{x_c}{z_c} - \frac{\mu x_1}{m z_1} + \frac{\mu x_r}{m z_r}\right) - \right.$$

$$\left. - 2y_2\left(\frac{y_c}{z_c} - \frac{\mu y_1}{m z_1} + \frac{\mu y_r}{m z_r}\right)\right] \qquad (4.3.9)$$

Опять же в первом приближении распределение фазы сферической волны в плоскости голограммы:

$$\varphi\ (x_2, y_2) \approx \frac{2\pi}{\lambda_2}\left[\frac{1}{2z_3}\left(x_2^2 + y_2^2 - 2x_2 x_3 - 2y_2 y_3\right)\right]. \qquad (4.3.10)$$

Здесь z_3- расстояние от голограммы до плоскости изображения, а x_3 и y_3 - координаты изображения точки P в плоскости изображения. К такому виду и надо привести φ_v и φ_R, тогда в первом приближении, восстановленные волны будут сферическими, сходящимися или расходящимися в зависимости от знака φ_V и φ_R.

Очевидно, что к желанной форме мы приходим если вынесем за скобки коэфициент при $(x_2^2+y_2^2)$ в выражениях для φ_V и φ_R выше. Таким образом, восстановленное изображение представляет собой точечный источник с координатами (x_{3V}, y_{3V}, z_{3V}) для φ_V и (x_{3R}, y_{3R}, z_{3R}) для φ_R, где

$$z_{3V} = \left(\frac{1}{z_c} + \frac{\mu}{m^2 z_1} - \frac{\mu}{m^2 z_r}\right)^{-1} = \frac{m^2 z_c z_1 z_R}{m^2 z_1 z_r + \mu z_c z_r - \mu z_c z_1};$$

$$x_{3V} = \frac{m^2 x_c z_1 z_r + \mu m x_1 z_c z_r - \mu m x_r z_c z_1}{m^2 z_1 z_r + \mu z_c z_r - \mu z_c z_1};$$

$$y_{3V} = \frac{m^2 y_c z_1 z_r + \mu m y_1 z_c z_r - \mu m y_r z_c z_1}{m^2 z_1 z_r + \mu z_c z_r - \mu z_c z_1}; \qquad (4..3.11)$$

$$z_{3V} = \left(\frac{1}{z_c} - \frac{\mu}{m^2 z_1} + \frac{\mu}{m^2 z_r} \right)^{-1} = \frac{m^2 z_c z_1 z_r}{m^2 z_1 z_r - \mu z_c z_r + \mu z_c z_1};$$

$$x_{3V} = \frac{m^2 x_c z_1 z_r - \mu m x_1 z_c z_r + \mu m x_r z_c z_1}{m^2 z_1 z_r - \mu z_c z_r + \mu z_c z_1};$$

$$y_{3V} = \frac{m^2 y_c z_1 z_r - \mu m y_1 z_c z_r + \mu m y_r z_c z_1}{m^2 z_1 z_r - \mu z_c z_r + \mu z_c z_1}; \qquad (4.3.12)$$

Вместе с соотношениями, определяющими положение восстановленного изображения, найдем выражение для поперечного увеличения M_{non}: $M_{non} \equiv \frac{dx_3}{dx_1} = \frac{dy_3}{dy_1}$. Из выше приведенных выражений имеем:

$$M_{non,V} = m\left(1 + \frac{m^2 z_1}{\mu z_c} - \frac{z_1}{z_2}\right)^{-1} \qquad (4.3.13)$$

$$M_{non,R} = m\left(1 - \frac{m^2 z_1}{\mu z_c} - \frac{z_1}{z_2}\right)^{-1} \qquad (4.3.14)$$

Для углового увеличения:

$$M_{угл} = \frac{d(x_3/z_3)}{d(x_1/z_1)} \qquad (4.3.15)$$

получаем $|M_{угл}| = \frac{\mu}{m}$.

А теперь рассмотрим свойства изображений для основных типов голограмм.

I. Начнем с <u>осевых голограмм,</u> когда опорный, предметный и освещающий источник лежат на одной оси, так, что $x_r=x_1=x_c=0$. Рассматриваем только x- и z-координаты изображения (y-координата не имеет дополнительной информации). Примем также $\mu=m=1$ и $z_c=z_r$, что соответствует условию опыта Габора. Тогда

$$x_{3V} = x_{3R} = 0, z_{3V} = z_1 = z_c - \Delta, z_{3R} = \left(\frac{2}{z_c} - \frac{1}{z_1}\right)^{-1} \approx z_c + \Delta \qquad (4.3.16)$$

Здесь $\Delta=z_r-z_1$ - некая величина (отрицательна), причем $(\Delta/z_1)<<1$. То есть изображения расположены симметрично относительно освещающего источника

на небольшом расстоянии от него. А т.к. z_c - отрицательно, то оба изображения мнимые. Поперечное же увеличение имеет вид (для μ=m=1)

$$M_{non,V} = \left(1 + z_1\left(\frac{1}{z_c} - \frac{1}{z_r}\right)\right)^{-1}; M_{non,R} = \left(1 - z_1\left(\frac{1}{z_c} + \frac{1}{z_r}\right)\right)^{-1} \qquad (4.3.17)$$

Если освещающий источник расположен в той же точке, где находится исходный опорный, т.е. $z_c=z_r$, то $M_{non,V}=1$ и $M_{non,R}\approx-1$ (т.к. $z_1/z_r\approx1$). Последнее говорит о перевернутом изображении.

Угловое же увеличение $M_{угл}=\mu/m=1$. И наконец можно показать, что продольное увеличение $M_{пр}=(\lambda_1/\lambda_2)M_{non}$. Если же расположить объект вблизи голограммы ($|z_1|<<|z_r|$), то для $x_r=x_1=x_c=0$, и μ=m=1,$z_c=z_r$

имеем $$x_{3V} = x_{3R} = 0, z_{3V} = z_1, z_{3R} = \left(\frac{2}{z_r} - \frac{1}{z_1}\right)^{-1}. \qquad (4.3.18)$$

И при использовании плоской опорной волны ($z_2\to\infty$) $z_{3V}=z_1$, и $z_{3R}=-z_1$, то есть действительное и мнимое изображение симметричны относительно голограммы, причем оба они прямые, т.к. $M_{non,V}=M_{non,R}=+1$. Вообще же, если масштаб голограммы неизменен (m=1), то поперечное увеличение для голограммы, освещаемой плоской волной ($z_c=\infty$), $M_{non} = \left(1 - \frac{z_1}{z_2}\right)^{-1}$ зависит только от соотношения z_1/z_2, но не зависит от длины волны. Если же и опорная волна была плоской ($z_2\to\infty$), то при восстановлении всегда отсутствует увеличение.

II. <u>Схема Лейта и Упатниекса с внеосевым опорным пучком</u>. Вновь считаем размеры голограммы неизменяемыми (m=1), а волны освещающую и опорную плоскими ($z_c=z_r=\infty$). При этих условиях:

$$x_{3V} = x_1 + \left(\frac{x_c}{z_c}\right)\frac{z_1}{\mu} - \left(\frac{x_r}{z_r}\right)z_1 = x_1 + z_1\left(\frac{\theta_c}{\mu} - \theta_r\right),$$
$$z_{3V} = z_1/\mu, x_{3R} = x_1 - z_1\left(\frac{\theta_c}{\mu} + \theta_r\right), z_{3R} = -z_1/\mu, \qquad (4.3.19)$$

где $\theta_c \approx tg\theta_c = x_c/z_c$ и $\theta_r \approx tg\theta_r = x_r/z_r$ - углы освещающего и опорного пучков с положительным направлением оси z.

Если освещающая волна идентична опорной ($\mu=1$ и $\theta_c=\theta_r$), то $x_{3V}=x_1$, $z_{3V}=z_1$, $x_{3R}=x_1-2z_1\theta_r$, $z_{3r}= -z_1$, т.е. мнимое изображение появится в месте исходного объекта, а действительное в плоскости на расстоянии z_1 по другую сторону от освещающего источника. Оба изображения - прямые.

Часто бывает полезно определить угол дифракции при освещении голограммы плоской волной. Полагая $\theta_c=\theta_r=0$, найдем углы дифракции для волны с фазой φ_V и φ_R

$$\theta_{3V} = \frac{x_{3V}}{z_{3V}} = \frac{x_1}{z_1} \approx \theta_1, \quad \theta_{3R} = \frac{x_{3R}}{z_{3R}} = -\frac{x_1}{z_1} \approx -\theta_1 \qquad (4.3.20)$$

В общем случае, когда плоская опорная и освещающая волны идут под углом к оси, для углов дифракции имеем

$\theta_{3V} = \mu\theta_1 + \theta_c - \mu\theta_r$; $\theta_{3R} = - \mu\theta_1 + \theta_c + \mu\theta_r$.

Если взять $\theta_1=-\alpha$, $\theta_r = + \alpha$, $\theta_c=+\alpha$, $\mu=1$, то $\theta_{3V=} - \alpha$, $\theta_{3R} = +3\alpha$

III. <u>Все источники находятся на одинаковом расстоянии от голограммы.</u>

Пусть предметный и опорный источник лежат в одной плоскости ($z_1=z_r$) и освещающая волна идентична опорной ($x_c=x_r$, $z_c=z_r$), тогда

$$x_{3v} = x_r (1 - \mu) + \mu x_1, \quad z_{3v} = z_1, \qquad (4.3.21)$$

$$x_{3R} = x_r (1 + \mu) - \mu x_1, \quad z_{3R} = z_1.$$

Оба изображения мнимые и расположены в той же плоскости, что и объект. Изображение с координатами (x_{3R},z_{3R}) - перевернутое.

Глава 5. Источники света для записи и восстановления голограмм.

Как только для получения голограмм стали применять лазеры, голография встала на практический фундамент. До открытия лазеров в качестве источников света обычно использовались ртутные лампы, которые позволяли в то время достичь компромисса между требованиями когерентности и интенсивности излучения.

Увеличения пространственной когерентности (а значит и размеров объекта) можно было добиться только путем уменьшения светящейся поверхности источника, что приводило к значительному ослаблению интенсивности. Лазерное же излучение обладает одновременно и высокой когерентностью и большой интенсивностью.

Источники света для голографии подразделяют на две группы: для записи и восстановления голограмм. Причем если к первой относится лазеры непрерывного действия и импульсные различных типов, то ко второй наряду с лазерами непрерывного или квази-непрерывного действия и источники некогерентного света (начиная от ртутных ламп и кончая обычными лампами накаливания).

Ко всем лазерам для записи голограмм предъявляются специальные *требования:*

- необходимая длина волны генерации (одна или несколько),
- достаточная мощность и
- высокая степень когерентности излучения.

Первые два требования достаточно очевидны и определяются условиями эксперимента.

Степень когерентности лазера определяется постоянством разности фаз излучаемого света в двух фиксированных точках пространства в течение некоторого периода времени.

Разность фаз в двух точках вдоль направления распространения света за время Δt определяет *временную*, или продольную, когерентность лазерного источника, а в плоскости, перпендикулярной направлению распространению света (т.е. по фронту волны) - *пространственную* или поперечную когерентность.

Когерентные свойства лазерного пучка тесно связаны с его модовой структурой. Лазер может генерировать большое число разного вида продольных и поперечных световых колебаний, которые называются модами, имеют очень близкие друг другу значения длины волны и отличаются фазовыми соотношениями.

В голографии излучение лазера, в любой одной переменной моде, можно считать пространственно-когерентным. Моды обозначают тремя индексами (m,n,q), каждое из них целое положительное число: 0,1,2,... Два первых числа (m,n) характеризуют различие световых колебаний для поперечных направлений по отношению к оптической оси резонатора, а третье число (q) определяет различие световых колебаний в продольном направлении. Важнейшим колебательным процессом, соответствующим основному излучению лазера, является одномодовый, отвечающий значениям чисел m = 0, n = 0. Излучение при этом также называется *одномодовым* и обозначается ТЕМоо (от английских слов: поперечное, электромагнитное). Ясно, что в этом случае можно получить большую равномерность освещения, чем при генерации лазером поперечных мод высших порядков. В последнем случае генерация также менее стабильна, так как существует тенденция к одновременной генерации двух или более мод (моды «скачут»). Для получения равномерного освещения объекта приходится использовать фильтрующую диафрагму, существенно теряя в интенсивности излучения. Почти все промышленно изготовляемые лазеры для голографии моду наинизшего порядка или могут быть настроены на такой режим.

Излучение лазера называют *одночастотным,* если колебательный процесс в резонаторе характеризуется числом q = 0.
Одномодовый, одночастотный режим работы лазера - оптимальный для изготовления голограмм.

Временная когерентность излучения полностью определяется его спектральным составом и характеризуется длиной когерентности - расстоянием, на котором еще не происходит недопустимых фазовых нарушений. При этом $L \leq \lambda^2/\Delta\lambda$, $\Delta\nu = c\Delta\lambda/\lambda^2$, где λ - длина волны света; $\Delta\lambda$ - спектральная ширина линии излучения лазера, L - длина когерентности, которая должна превышать разность хода объектного и опорного пучков до максимально удаленных по глубине точек объекта; c - скорость света, $\Delta\nu$ - полоса частот линии излучения лазера.

Если лазер работает в режиме генерации одной аксиальной, или продольной моды (и, разумеется, одной поперечной моды), то для голографии

временную когерентность его излучения можно считать абсолютной. Большинство выпускаемых лазеров можно настроить на генерацию одной поперечной моды самого низкого порядка, но они обычно не расчитаны на одночастотный режим генерации.

Обычный лазерный резонатор - это два сферических зеркала, помещенных на расстоянии L друг от друга. Собственная частота n-ой моды определяется формулой $f_n = nc/2L$, где n - целое число. Генерация возникает на всех частотах f_n, находящихся внутри частотного интервала Δf_G, для которого коэффициент усиления активной среды превышает потери света в резонаторе, включая потери на выходе. Спектральная ширина каждой моды определяется потерями в резонаторе и стабильностью в резонатора. Типичная величина спектральной ширины моды ≈ 105 Гц.

Наиболее очевидный метод получения одночастотного режима генерации состоит в уменьшении длины резонатора до величины, удовлетворяющей условию $f_{n+1} - f_n = c/2L = \Delta f_G$.

В этом случае достаточно усиления, которое обеспечивало бы возникновение генерации в полосе частот Δf_G, равной расстоянию между модами. В результате будет поддерживаться генерация только на одной моде. Приняв полосу Δf_G равной доплеровской ширине линии $\Delta f_D = 1{,}5 \cdot 10^9$ Гц, для He-Ne лазера в одночастотном режиме длина резонатора должна составлять $L = c/2\Delta f_D = 10$см. В таком коротком резонаторе объем активной среды очень мал, и выходная мощность лазера составляет лишь доли милливатта. Для аргонового ионного лазера длина резонатора и вовсе около 2см.

Более эффективный метод получения одночастотной генерации состоит в использовании двух связанных резонаторов, при этом только для одной моды, общей для обоих резонаторов, усиление имеет достаточную величину, необходимую для генерации. Чтобы увеличить объем активной среды, оптическую длину ℓ_1 одного из резонаторов выбирают большей, а чтобы

разнести как можно дальше общие для резонаторов моды, оптическую длину ℓ_2 другого - малой.

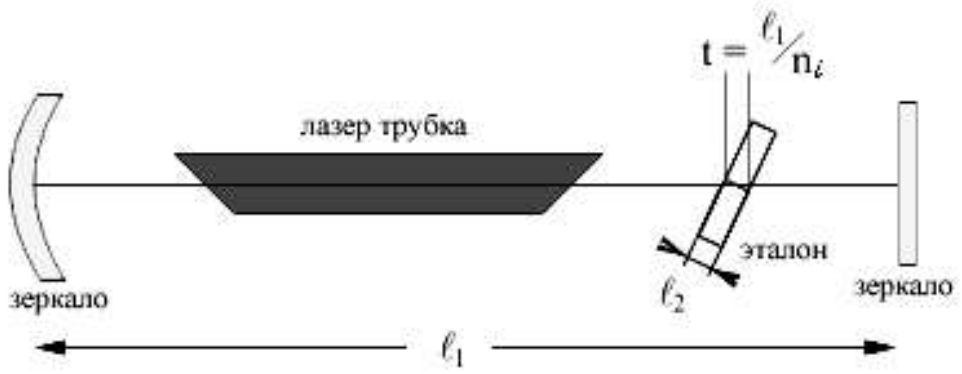


Рис.5.1. Получение одночастотного режима генерации с помощью эталона Фабри - Перо

В качестве второго резонатора, осуществляющего селекцию мод, служит обычная плоскопараллельная пластина из плавленого кварца, играющего роль эталона Фабри-Перо. Геометрическая толщина эталона t связана с его оптической толщиной ℓ_2 соотношением $\ell_2 = t_{n_i}$, где n_i - показатель преломления кварца. Чтобы на длине ℓ_2 укладывалось целое число полуволн, эталон наклоняют на небольшой угол к оптической оси.

Необходимо сказать несколько слов и об импульсных лазерах, применяемых для съемок живых объектов, нестационарных быстро проскакивающих процессов (взрыв и т.д.). Для восстановления же все равно используются лазеры непрерывного действия. Типичная схема импульсного лазера (в частности, рубинового) приводится ниже. Внутрирезонаторная диафрагма служит для селекции поперечных мод. Для селекции продольных мод используют пассивный затвор, служащий для модуляции добротности. Пока рубин подвергается оптической накачки для создания инверсной заселенности уровней ионов Cr^{3+}, краситель поглощает излучение, испускаемое при этом рубином, и препятствует возникновению генерации. При достаточно высокой интенсивности излучения рубина энергетические уровни красителя, участвующие в поглощении, обедняются и краситель «просветляется». Теперь он прозрачен для излучения, и лазер генерирует короткий импульс. Уровень

накачки можно выбрать так, чтобы усиление превышало пороговое значение только для одной моды. И вся запасенная в рубине энергия высветится на одной частоте.

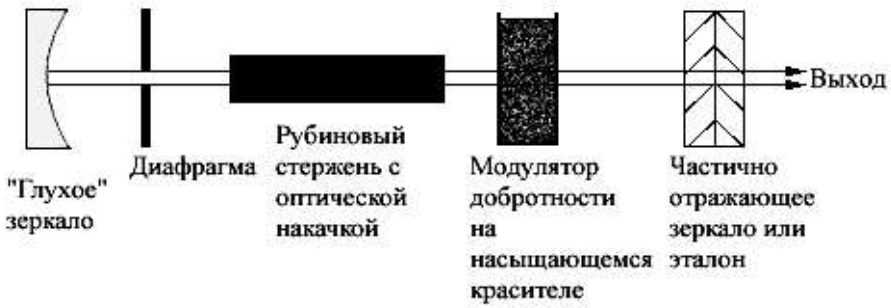


Рис.5.2. Импульсный лазер с модулятором добротности

Реально достигнутая на импульсном лазере длина когерентности составляет не менее 1,5м.

Глава 6. Материалы для записи голограмм.

Для практической реализации внеосевой схемы голографии требуется регистрирующие материалы с высокой разрешающей способностью. Сама природа голографического процесса приводит к необходимости использования “необычных” регистрирующих материалов. Фотоматериалы, модулирующие амплитуду светового потока, пригодны для регистрации, как обычных фотоснимков, так и голограмм. С другой стороны, регистрирующие материалы с фазовой модуляцией, не предоставляющие интерес для обычной фотографии, являются идеальным для голограммы.

6.1. Требования к регистрирующим средам.

Экспозиция и чувствительность. Критерии чувствительности материалов для регистрации голограмм может служить величина экспозиции, необходимая для достижения определенной дифракционной эффективности голограммы при нормированных условиях освещения.

Экспозиция - произведение потока излучения (интенсивности или освещенности), падающего на единицу площади пленки, на время экспозиции t: $E=I\cdot t$.

Чувствительность (S) - величина, обратная экспозиции, требуемой для получения некоторого заранее определенного уровня выходного сигнала: S=1/E. Таким образом, чем меньше экспозиция (оптимальная), тем выше чувствительность.

Возьмем освещенность, создаваемую экспонирующим световым потоком, и усредним ее по площади, содержащей большое число интерференционных полос. Средняя величина экспозиции определяется, как $E_0 = \frac{\eta_t \tau_e p}{A}$, где η_t - эффективный коэффициент передачи энергии от лазера к регистрирующему материалу, P- выходная мощность излучения лазера, τ_e - длительность экспонирования, A - площадь сечения пучка.

В обычных условиях от 35 до 50% мощности теряется из-за необходимости обеспечить равномерность освещения предмета и голограммы, диффузный предмет только около 10% падающей на него мощности отражает в сторону голограммы, около 4% потока теряется при отражении от каждой поверхности раздела воздух - стекло (линзы, светоделители и т.д.). Поэтому η_t на практике не превосходит 5%.

Тогда, принимая предельную длительность экспонирования (с учетом механических нестабильностей воздушных потоков) в пределах τ_e- 300с, при A=100 см^2 находим

E_0/P=0,15 мДж/см^2 на 1мВт выходной мощности лазера.

Исходя из этого значения и следует оценивать пригодность фотоматериала для работы с определенным лазером.

<u>Разрешающая способность.</u> Разрешающая способность регистрирующего материала, используемого для регистрации голограммы, должна быть достаточна для раздельной передачи интерференционных полос.

В пропускающей голограмме регистрируются следы пересечения системы интерференционных плоскостей с плоскостью голограммы (для тонких) или сами плоскости пучностей. И расстояние между этими следами:

$d_y = \dfrac{\lambda}{\sin\Psi_S - \sin\Psi_R} = \dfrac{\lambda_a}{\sin\Omega_S - \sin\Omega_R}$, Ω_S и Ω_R- углы между направлениями распространения волн и нормалью к голограмме на воздухе, Ψ_S и Ψ_R - то же в среде. Граничные значения $\Omega_S=\Omega_R$ и $\Omega_S=-\Omega_R=\pi/2$ дают оценку для разрешающей способности пропускающей голограммы: $0<\nu<2/\lambda_a$ и при λ_a=0,5 мкм $0<\nu<4000$ мм$^{-1}$.

Для отражательных голограмм расстояние между поверхностями пучностей:

$$d_z = \frac{\lambda_a}{2\left(n_0^2 - \sin^2\Omega\right)^{1/2}} \qquad (6.1.1)$$

и с учетом $\nu_z=1/d_z$ оценка выглядит так:

$$\frac{\lambda_0}{2\left(n_0^2 - 1\right)^{1/2}} \langle \nu_z \langle \frac{\lambda_0}{2n_0} \qquad (6.1.2)$$

Принимая λ_a=0,5мкм и n_0=1,5 (для желатина) 4500 мм$^{-1}$ $<\nu_z<$6000 мм$^{-1}$.

Сохраняемость и стирание голограммной записи. Голограмма должна сохранятся только в течение промежутка времени, необходимого для восстановления изображения. Голограммы на растворах просветляющихся красителей существует лишь во время экспозиции. Наоборот, в фотослоях образуется постоянная запись, но их уже нельзя использовать повторно. Голограммы на фотохромных материалах или на кристаллах сегнетоэлектриков имеют лишь промежуточную степень устойчивости, поскольку исчезает за сравнительно короткое время из-за тепловой релаксации или при восстановлении.

Требования к сохраняемости и стираемости записи в различной степени определяются характером задачи. Но при этом необходимо учитывать уменьшение дифракционной эффективности, чувствительности и разрешающей способности материала, сопровождающее увеличение способности к многократной записи.

Шумы и линейность записи. *Шум* - это нежелательный световой поток, дифрагированный или рассеянный голограммой в направлении восстановленной волны.

Обычно выделяют следующие источники шумов:

1. Хаотическое рассеяние сигнального и опорного пучков во времени экспонирования, вызванное зернистостью регистрирующего материала.
2. Хаотическое рассеяние восстанавливающего пучка и восстановленной волны, вызванное зернистой структурой голограммы.
3. Пространственная модуляция опорной волны при записи и восстановлении.
4. Нелинейность записи сигнальной волны.
5. Оптическая неоднородность и деформация поверхности регистрирующего материала.

Влияние первых двух источников мало, если не идет речь о многократном экспонировании (наложении) голограмм. Третий не связан со свойствами регистрирующей среды и всегда приводит к размытию предметной волны. Четвертый источник крайне важен, желательно стремиться обеспечить линейность записи. Пятый источник возникает в процессе изготовления регистрирующего материала или в процессе его обработки после экспонирования (неоднородности среды, неплоскостность, отбеливание и т.д.).

Чтобы обеспечить линейную запись после записи и обработки пробной голограммы строят зависимость $(\eta)^{1/2}$ от V при различных значениях E_0 или $(\eta)^{1/2}$ от E_0 при различных V(η–ДЭ голограммы). Это позволяет проводить сравнительный анализ экспозиционных характеристик различных материалов. Кроме того, такие кривые позволяют получить следующие важные данные:

- диапазон значений видности V или отношений интенсивности R, в котором запись голограммы линейна,
- максимально достижимую величину дифракционной эффективности,
- значение экспозиции, необходимое для получения заданной ДЭ (при постоянном значении V), т.е. меру чувствительности,

- оптимальное значение средней экспозиции, позволяющее достигать наилучшего компромисса между линейностью и дифракционной эффективностью.

Вот с учетом предыдущего общего рассмотрения перейдем к анализу частных свойств и характеристик некоторых наиболее важных регистрирующих материалов. И для начала

6.2. Галоидосеребряные фотографические слои.

Из-за сравнительно высокой чувствительности и общедоступности эти материалы до сих пор применяются чаще всего.

Фото слой в основном состоит из микрокристаллов галогенида серебра, диспергированных (рассеянных) в пластине. В ней содержатся и некоторые сенсибилизаторы (вещества, повышающие фоточувствительность). Фотографическая эмульсия наносится на прозрачную подложку - либо стеклянную пластинку, либо гибкую ацетатную пленку. Первые предпочтительны для записи с лазерами непрерывного действия.

После экспонирования фотослоя в поле интерференции и проявления образуется абсорбционная (амплитудная) голограмма. При проявлении экспонированные микрокристаллы галогенида серебра превращаются в зерна металлического серебра. После проявления иногда производят отбеливание, в результате которого металлическое серебро превращается в прозрачное соединение, а абсорбционная голограмма - в фазовую. Фото слои пригодны для регистрации и пропускающих и отражательных голограмм.

Разрешающая способность (реальная) от 1800мм$^{-1}$ (для пластин ВР-П или ФПР) до почти 10000мм$^{-1}$ (для ПФГ-03). Максимальная ДЭ составляет от 50 до 70% в зависимости от типа материала и схем записи. Большое преимущество - стабильность свойств голограммы при длительном хранении. Основной недостаток - необратимость (нереверсивность) записи.

6.3. Слои хромированного желатина.

Оптические свойства голограмм, зарегистрированных на слоях хромированного желатина, близки к идеальным. Правильно записанная и обработанная голограмма так мало рассеивает и поглощает свет, что при обычном дневном свете она почти неотличима от чистой стеклянной пластинки. Дифракционная эффективность объемных голограмм, записанных на слоях хромированного желатина, может приближаться к теоретическому пределу - 100%. На этом материале могут быть записаны как отражательные, так и пропускающие голограммы, причем ДЭ сочетается с низким уровнем шума.

Достаточно давно известно, что ультрафиолетовое излучение или синий свет может вызвать в присутствии малых количеств бихромата образование перекрестных связей - сшивание молекул желатина. Это сшивание известно так же под названием дубления. Достаточно задубленный желатин не растворяется в воде. И когда желатиновый слой, содержащий небольшое количество бихромата, облучается светом в течение достаточно длительного времени, облученная часть слоя становится нерастворимой в воде, в то время как необлученная может быть легко отмыта водой. Если освещающее световое поле представляет собой голографическую интерференционную картину, то записывается фазовая голограмма.

Существует и другой процесс, дающий лучший результат. Слой хромированного желатина первоначально химически задубливается до такой степени, при которой неэкспонированный слой не растворяется водой. После экспонирования интерференционной картиной голограмма промывается водой, чтобы удалить не прореагировавший бихромат. Вслед за этим голограмма подвергается быстрому обезвоживанию в изопропаноловой ванне с целью завершения проявления. Голограмма записывается как на поверхности, так и в объеме слоя.

Вследствие предварительного задубливания на стадии промывки не происходит растворения и удаления желатина. Вместо этого желатин поглощает

воду, увеличивая объем (разбухая). Последнее происходит неравномерно. Количество воды и разбухание уменьшается с ростом прочности желатинового слоя. Более экспонированный желатин задублен сильнее, а неоднородное распределение интенсивности света соответствует распределению разбухания слоя. Если при быстром обезвоживании в ИПС вода удаляется из желатина со скоростью, превышающей нормальную скорость усадки, то возникшее пространственное неоднородное увеличение объема сохраняется.

Помимо поверхностной голограммы записывается и объемная, за счет образования большого количества пустот в желатине (как в губке) и большого числа поверхностей раздела желатин - воздух.

Голографическая чувствительность имеет максимум около $\lambda=3550A^0$ и спадает до нуля вблизи $5800A^0$. Отношение значений чувствительности при 4880 и $5145A^0$ близко к 5:1.

ДЭ превышает величину 70%, но чувствительность при этом почти в 100 раз хуже, чем у галогенидов серебра. Слой нереверсивен и достаточно чувствителен к условиям хранения. Для длительного хранения следует герметизировать от атмосферной влаги.

6.4. Фотополупроводниково-термопластические слои.

Голограмма может быть зарегистрирована на термопластической пленке. Процесс записи в этом случае основан на деформации поверхности пленки в соответствии с распределением интенсивности света в интерференционной картине. Термопластические пленки обычно не светочувствительны, поэтому их объединяют с фотополупроводниковой пленкой в единую структуру, реагирующую на освещение. Такая комбинированная пленка обладает высокой чувствительностью во всей видимой области спектра и не требует длительной «мокрой» химической обработки.

В зависимости от способа комбинации фотопроводника с термопластическим веществом, Возможны следующие типы структуры слоев:

1. Гомогенная: фотопроводник и термопластик растворены в друг друге или сополимеризованы.
2. Гетерогенная: фотопроводник в виде очень тонкой суспензии диспергирован в слое термопластика.
3. Многослойная: термопластик нанесен поверх фотопроводника.

Как правило, для голографии предпочтительнее последняя.

Голограммы на этом материале характеризуются не очень высокой ДЭ и устойчивы при комнатной температуре. Они могут быть стерты и записаны повторно. Кроме того, записанная голограмма почти идеальная плоская фазовая, брэгговская дифракция отсутствует.

Недостаток: разрешающая способность материала около 1000 мм $^{-1}$, что ограничивает полосу передаваемых пространственных частот.

Остановимся на методике – запись и стирание. Перед экспонированием материал в темноте очувствляется созданием однородного потенциала на поверхности термопластика по отношению к прозрачному проводящему слою. Структура фотопроводник-термопластик показана на рисунке.

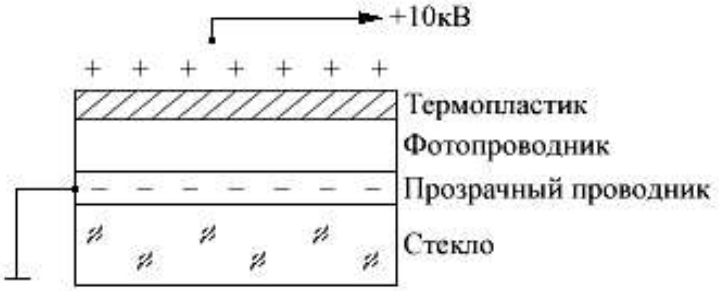


Рис.6.1. Структура фототермопластического материала

Создающее коронный разряд устройство ионизирует воздух вблизи поверхности термопластика. Положительные ионы притягиваются к заземленному прозрачному проводящему слою (окись олова) и осаждаются на поверхности термопластика, где удерживаются отрицательными зарядами, индуцированными на прозрачном проводнике.

Итак, на первом этапе (первая зарядка) на поверхности термопластика описанным способом создается однородный электростатический потенциал.

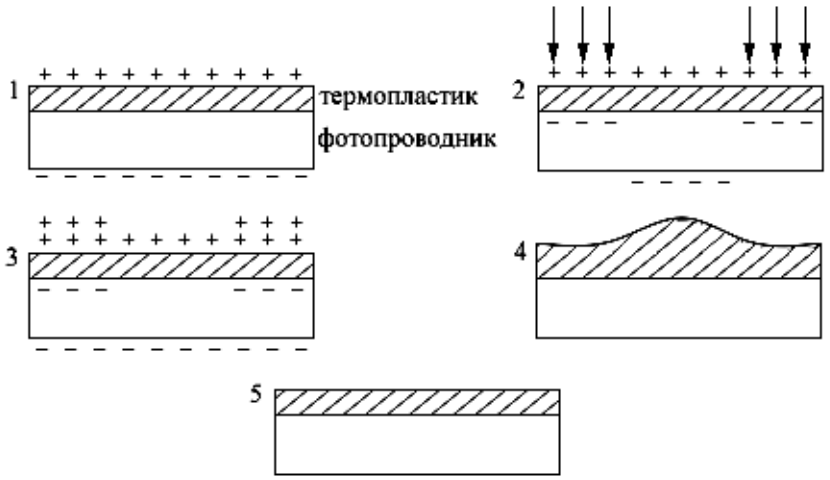


Рис.6.2. Запись голограммы на фототермопласте

На втором этапе (экспонирование) на регистрирующую систему накладывается интерференционная картинка, при этом фотопроводник разряжается в соответствии с пространственным распределением интенсивности света.

На третьем этапе (вторая зарядка) выполняется то же, что и на первом. Потенциал повсеместно на поверхности термопластика возвращается к исходному значению, но в тех участках, где фотопроводник разрядился, электрическое поле возрастает, образуя пространственно меняющееся распределение поля.

На четвертом этапе (проявление) термопластик кратковременно разогревают до температуры, близкой к точке размягчения или плавления. Термопластик деформируется под действием локальных электрических полей, уменьшая толщину в сильно экспонированных участках и увеличивая в слабо экспонированных. При быстром охлаждении деформации «затормаживаются».

На пятом этапе (стирание) слой вновь нагревают до температуры выше стадии проявления более длительное время. Поверхность разглаживается, стирая записанную голограмму, и среда снова готова к работе.

6.5. Фотохромные материалы.

Обратимое изменение цвета регистрирующего материала после экспонирования называется *фотохромизмом* или *фотохромией*. Фотохромные

материалы темнеют после экспонирования ультрафиолетовым излучением или синим цветом. В фотохромном кристалле существует два вида примесных. В исходном состоянии материал поглощает только в коротковолновой части спектра, оставаясь практически прозрачным для видимого света. Поглощение света приводит к переходу электронов от одного класса примесных центров в зону проводимости, после чего они могут быть захвачены другим классом примесных центров. В этом состоянии материал поглощает в видимой области и кажется окрашенным. Возвращение к исходному состоянию осуществляется путем естественной или искусственной тепловой релаксации, или путем оптического обесцвечения при длинноволновом облучении материала в полосе возникшего поглощения, когда процесс полностью обращается. Для записи голограмм можно использовать как процесс потемнения, так и выцветание фотохромного материала.

Материал не обладает зернистостью, так как реакции идут на молекулярном уровне, и разрешающая способность более чем достаточна для практической голографии. Проявление не требуется, так как энергия реакции поставляется непосредственно светом.

Но чувствительность на 3 порядка ниже, чем у галоидов серебра. Материал с затемненной голограммой нестоек, так как остается чувствителен к любому свету, длина волны которого лежит в полосе поглощения. Происходит и стирание при хранении вследствие тепловой релаксации. Ограниченно и число циклов записи из-за явления «усталости».

ДЭ до нескольких процентов. Пример: кристаллы KB_2, CaF_2 с легированием La или Ce и других.

6.6. Сегнетоэлектрические кристаллы.

Сегнетоэлектрики – кристаллы диэлектрики, обладающие в определенном интервале температур самопроизвольной поляризацией, сильно зависящей от внешних воздействий. Показатель преломления некоторых сегнетоэлектрических кристаллов может незначительно изменятся (обычно на

~10^{-5}) после интенсивного светового облучения. В определенной степени явление сходно с фотохроматизмом, под воздействием тепла и света показатель преломления возвращается к исходной величине. Наилучшие результаты получены на кристаллах $LiNbO_3$. Благодаря электрооптическому эффекту локальное электрическое поле, наведенное при поглощении фотонов кристаллом, вызывает локальное изменение показателя преломления.

Максимальное ДЭ в $LiNbO_3$ около 42%. Разрешающая способность высока, а эффекта «усталости» не наблюдается. Голограммы – фазовые.

Но голограммы нестабильны, а чувствительность кристаллов почти на 6 порядков ниже галоидов.

6.7. Халькогенидные стеклообразные полупроводники.

Пример – сульфид мышьяка As_2S_3 . Зарегистрированы голограммы с ДЭ больше 90% на длине волны λ=514.5 нм. Столь большая эффективность обусловлена большим фотоиндуцированным изменением показателя преломления, составляющую величину Δn=0.2-0.3, т.е. на три порядка выше, чем для электрооптических кристаллов. Одним из возможных механизмов реализации данного способа записи является гомогенизация пленки, протекающая, в основном, вследствие реакции $As_4S_4+S_2 \rightarrow 2As_2S_3$.

Так как величина показателя преломления исходных веществ меньше, чем у сульфида мышьяка As_2S_3, можно объяснить индуцированное необратимое увеличение показателя преломления свеженапыленных пленок.

На структурах типа As-S возможна и обратимая запись, но количество циклов ограниченно, снижается и ДЭ. Чувствительность при необратимой записи низка (при нормальной температуре ~5-10Дж/см^2 на 1% η). При повышении температуры до 80-120 ^{o}C чувствительность можно повысить до 10^{-2}Дж/см^2 на 1% η.

6.8. Фотополимеры.

Полимеризация – химический процесс, в котором небольшие молекулы или мономеры объединяются, что образовать очень большие молекулы или

полимеры. Фоточувствительность их занимает промежуточное положение между галоидосеребряными эмульсиями и фотохромными материалами. На них записываются фазовые голограммы, образуемые как модуляцией коэффициента преломления вещества слоя, так и модуляцией толщины слоя (образование поверхностного рельефа). Преимущество – сухая и быстрая обработка.

В процесс приготовления фотополимера для регистрации голограмм мономер и синтезированный краситель (определяющий спектральную чувствительность) смешиваются перед употреблением, поскольку их смесь стабильна в течение часа. Для экспонирования голограмм между двумя покровными стеклами закапывают несколько капель смешанного раствора полимера. Слой полимера при этом имеет толщину 5-15 мкм. Экспонирование ведется в видимой области спектра, и любой образующийся полимер увеличивает вязкость материал, способствуя стабильности изображения. Дополнительная засветка УФ-светом в присутствии фиксирующих компонентов закрепляет фотополимер.

Пример – фотополимеры фирмы «DuPont» состоят из мономеров акрилата с полосой поглощения в УФ-области (3300-3600 A^o), фотоинициатора, сдвигающего чувствительность в видимую область (~5500 A^o) и связующего вещества – полимера целлюлозы. Срок хранения не более 3 месяцев с соблюдением строжайших условий. Но ДЭ до 100%. Чувствительность $20*10^{-3}$ – $2*10^{-3}$ Дж/см^2 (другие хуже) при разрешающей способности не менее 3000 мм$^{-1}$.

Глава 7. Компоненты голографических систем.

Для успешной реализации принципов голографии необходима соответствующая аппаратура, комплекс которой и образует голографическую систему.

Выбор элементов голографической системы в первую очередь определяется тем, какие задачи ставит перед собой экспериментатор, его

возможностями и бюджетом. Перечислим главные элементы, необходимые для голографических работ и дадим рекомендацию по их использованию.

Лазер. Любой лазер, применяемый в голографии, должен работать в режиме моды TEM_{00} или в режиме однофазной моды, обеспечивающем классическое гауссово распределение интенсивности по перечному сечению пучка излучения. Особое внимание следует уделять когерентным свойствам лазерного излучения. Для измерения длин путей объектного и опорного пучков удобно пользоваться проводком или шнурком с узелками в качестве точки отсчета. Желательно, чтобы выходное излучение лазера было линейно – поляризованным. Необходимая величина мощности выходного излучения определяется как размерами голографического объекта, так и конечными требованиями к плотности энергии в плоскости голограмм.

Затворы. Для управления длительностью экспонирования пригодны как ручные, так и электронные затворы. Ручные дешевле, и, если измерить интенсивности света при создании системы отследил плотность записанной голограммы, то повторная запись голограммы возможна простым отсчетом времени экспонирования ручным затвором. Электронный затвор дороже, но возможность его для управления экспозициями больше из-за интегрирования (суммирования) значений энергий при экспозиции.

Изолированный стол. В голографии предъявляются высокие требования к механической стабильности элементов голографической системы и всей системы в целом во время экспонирования. Голограмма – интерференционная картина, и если во время экспонирования относительная фаза $\Delta\varphi$ между объектом и опорным пучком изменится на π, то интерференционные линии перекроются и интерференционная картина разрушится. Это эквивалентно требованию, чтобы разность длин оптических путей пучков не превышала $\lambda/2$ за время экспонирования.

Существует большое разнообразие конструкций изолированных столов – от стола в виде ящика с песком до гранитных столов на пневматической изоляции. Различают два класса вибрации: высокочастотные, поглощаемые

деревом, песком и т.п., и низкочастотные, поглощаемые при изоляции стола от окружающей обстановки. Для этого применяется пористый упаковочный материал, пневматические цилиндры и т.д. Для получения простых голограмм достаточно и ящика с песком, тогда как высококачественная голография требует применения специальных поверхностей на пневматических подставках. Для проверки устойчивости любой поверхности, на ней собирается простой интерферометр, и наблюдаются интерференционные линии при различных амплитудах и частотах колебаний.

Зеркала. Требования просты. Отражающая поверхность зеркала всегда должна быть фронтальной и незагрязненной поверхностью хорошего качества, чтобы не вводить в волновой фронт дополнительных интерференционных картин. Необходимость регулировки положения каждой зеркальной поверхности определяется конкретным экспериментом.

Светоделитель. Светоделителем может быть либо поверхность стекла, либо устройство, обладающее изменяющейся в широком диапазоне плотностью. Изменением угла наклона стеклянной пластинки можно в небольших пределах управлять проходящей и отраженной составляющими пучка. Для более тонкой регулировки интенсивности применяют светоделители с полупрозрачным вращающимся зеркалом, у которого коэффициенты пропускания и отражения изменяются по окружности. Хорошее качество пучка дает двулучепреломляющие кристаллы, перед которыми помещают вращаемые полуволновые пластинки, при этом надо следить за поляризацией.

Пространственный фильтр. Он не является обязательным элементом, хотя для получения качественных голограмм необходим.

Пространственный фильтр нужен и для формирования восстановленного изображения хорошего качества и обязателен, при получении количественных характеристик в голографии. ПФ состоит из положительной линзы (обычно объектива микроскопа) и точечной диафрагмы, расположенной в фокусе линзы. Через точечное отверстие пройдет только та часть световой волны, которая распространяется параллельно оптической оси. Всякий идущий параллельно

оптической оси свет (обусловленный рассеянием на пыли, поперечными модами лазерного излучения и т.п.) блокируется и не проходит через точечную диафрагму.

Линзы. Как правило, линзы используются для расширения лазерного пучка. В этом случае, главное требование состоит в том, чтобы как положительные, так и отрицательные линзы имели по возможности малое фокусное расстояние для достижения заданного расширения пучка на кратчайшем расстоянии. Иногда расширение объектного пучка получают за счет рассеивателя.

Регистрирующая среда. Первое требование – высокое разрешение $R=[2\sin(\theta/2)]/\lambda$, где θ - угол между объектным и опорным пучками. Среда с достаточным разрешением «крепится» на жесткой стеклянной или гибкой ацетатной подложке. Стеклянная пластина обеспечивает большую стабильность, но обычно дороже. Пленка дешевле, а жестко закрепить ее можно, зажав между стеклянными пластинками или прижав к металлическому основанию, как в фотоаппарате.

Держатель пленки (пластинки). В зависимости от специфики эксперимента можно применять различные по конструкции и принципу действия держатели, как серийно изготовленные, так и самодельные. Как правило, используются держатели с механическим или вакуумным закреплением. Для точной воспроизводимости голограмм используем держатели с прецизионной регулировкой. Иногда держатель совмещает функцию крепления с проявлением на месте. Для быстрого, повторяющегося считывания информации необходимо иметь устройство транспортировки пленки (лентопротяжный механизм).

Глава 8. Применения голографии.

8.1. Изобразительная голография.

Отличительная особенность изобразительных голограмм – реалистичность воспроизводимых ими трехмерных изображений, которые часто трудно

отличить от реальных объектов. Эта особенность обусловлена тем, что при специальном освещении голограмма не только передает объем предметов с большим диапазоном яркостей, высоким контрастом и четкостью, но также дает возможность четко наблюдать точное изменение бликов и теней при изменении угла наблюдения при рассматривании этих предметов.

Схема изготовления отражательных голограмм по методу Ю.Н. Денисюка, получившая широкое практическое применение в изобразительной голографии приведена на рисунке.

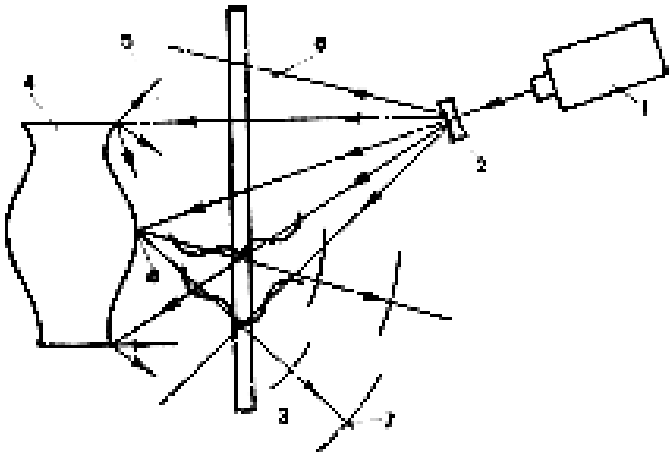


Рис.8.1. Однолучевая схема записи отражательной голограммы

Пучок света лазера 1 проходит через почти прозрачную фотопластинку 2, освещает объект 3 и падает на фотопластинку с противоположной стороны. Таким образом, фотопластинка освещается двумя пучками света: объектным, отраженным от объекта, и опорным, идущим непосредственно от лазера.

На рисунке представлено вертикальное расположение предметов, но не менее часто применяется горизонтальное. Кроме того, для более качественной записи необходим еще один элемент – точечная диафрагма – пластинка с диаметром в несколько мкм, устанавливаемая в фокусе положительной линзы. Для успешного устранения интерференционных помех диаметр диафрагмы следует выбирать по следующей формуле

$$d \cong \frac{2 \cdot l \cdot \lambda_s}{b} 10^{-3}, \qquad (8.1.1)$$

где d – диаметр диафрагмы в мкм; λ_S – длина волны света в мкм; b – поперечный размер фотопластинки в мм; l – расстояние от диафрагмы до фотопластинки в м.

Объект съемки или композицию из ряда предметов размещают вертикально или горизонтально в зависимости от смыслового содержания и жестко закрепляют либо непосредственно на столе, либо на массивной подставке, которая одновременно может служить частью фона. Должен быть предусмотрен жесткий задний план, а боковые стороны в объеме голографируемой композиции могут закрываться темным материалом, либо иметь зеркальные или рассеивающие свойства и создавать дополнительные боковые подсветки.

Освещение объекта определяется, во-первых, оптической схемой съемки, во-вторых, оптическими и художественными особенностями голографируемого объекта (зеркальные и диффузные поверхности, тени, полости и т.д.). Прямое освещение одним пучком часто не передает особенностей композиции, а иногда обуславливает искажение за счет резких теней и отсутствия полутонов. Поэтому для получения художественной голограммы предпочтительны многопучковые схемы.

Двухпучковый вариант приведен на рисунке 8.2.

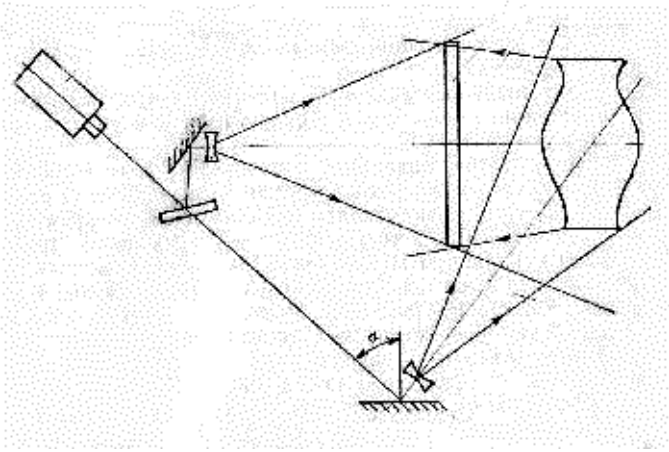


Рис.8.2. Схема записи с разделением пучков

В любом случае, необходимо максимально возможное уравнивание длины путей распространения света в опорном и объектном пучках, даже если их несколько.

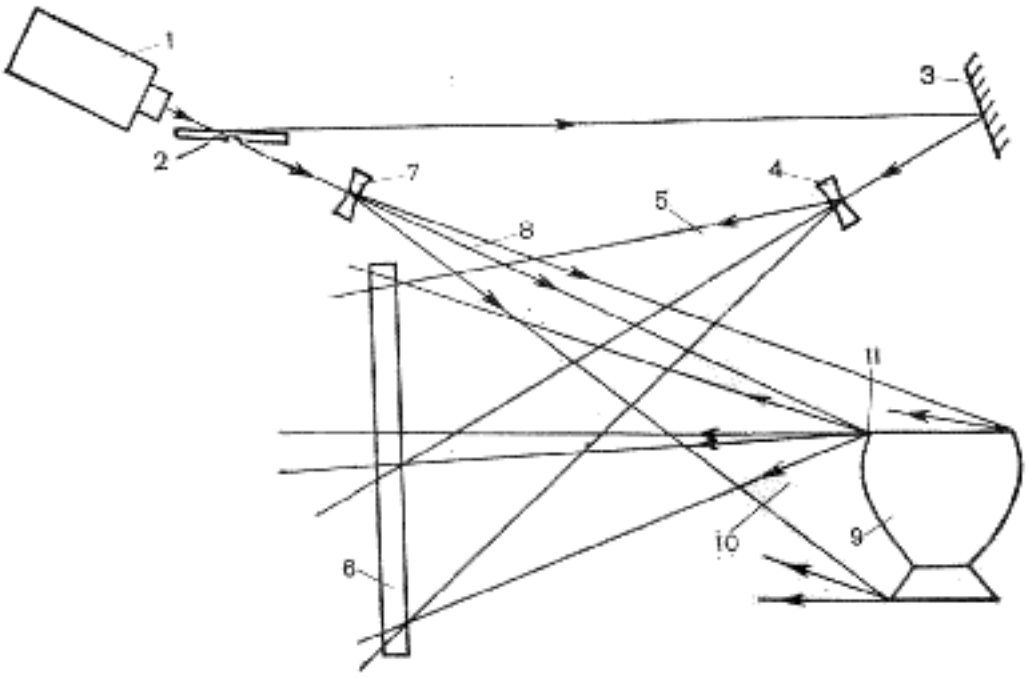


Рис.8.3. Запись пропускающей изобразительной голограммы

Изобразительные голограммы изготавливают и пропускающими, особенно при практической реализации голографического кинематографа и трехмерных дисплеев. В этом случае используется следующая схема, когда опорный и объектный пучки падают на фотопластинку с одной стороны. При этом пучок света лазера 1 после светоделительной пластинки 2 идет по двум каналам. С помощью зеркала 3 и расширительной линзы 4 формируется опорный пучок, падающий на фотопластинку 6. Расширительная линза 7 формирует пучок, освещающий объект 9. Отраженный от объекта пучок падает на фотопластинку 6 с той же стороны, что и опорный.

Пропускающую голограмму можно получить с использованием линзы, формирующей уменьшенное изображение в пространстве. Если фотопластинку поместить в плоскость, сопряженную с любым сечением объекта, например центральным или соответствующим переднему плану, и осветить пластинку опорным пучком, то на ней регистрируется пропускающая голограмма сфокусированного изображения. Так можно изготавливать изобразительные голограммы в виде слайдов. В голографическом кинематографе эта схема является основой для получения голографических кинокадров.

Голограммы, полученные в свете лазера с одной длиной волны, воспроизводят монохромные изображения. Для получения цветных голограмм, правильно воспроизводящих в едином изображении детали объекта разного цвета, необходимо регистрировать и затем воспроизводить в простейшем случае три цветоделенных изображения объекта, например, красное, зеленное и синее.

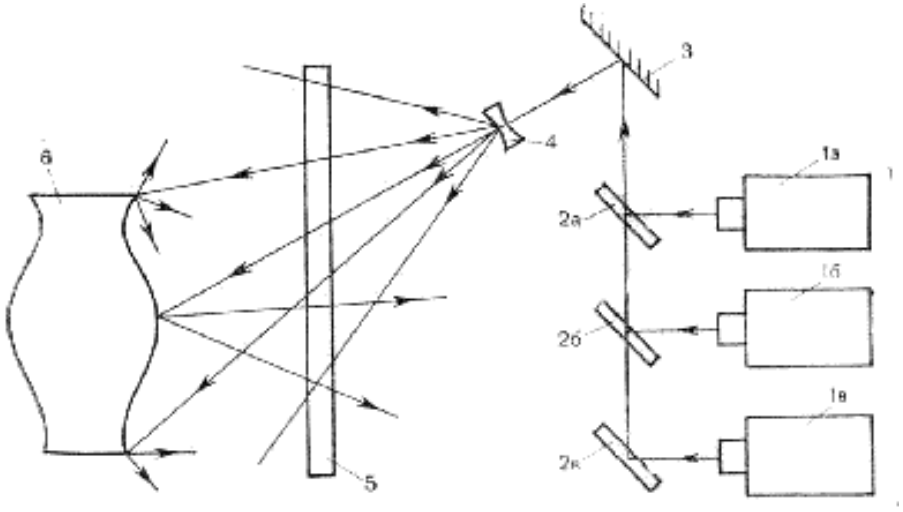


Рис.8.4. Запись отражательной цветной голограммы

Было бы желательно изготавливать цветные голограммы на цветных однослойных полихроматических голографических фотоматериалах. В этом случае экспонирование ведется одновременно в трех длинах волн, как показано на схеме для съемки отражательной голограммы.

Здесь 1 а, б, в – лазеры, излучающие свет в красной, зеленой и синей частях спектра, 2 а, б, в – оптические элементы, позволяющие совместное излучение трех лазеров в одном пучке, 3 – зеркало, 4 – линза, расширяющая суммарный пучок света лазеров, 5 – фотопластина, 6 – объект.

При съемке цветной пропускающей голограммы объект освещается лазерами 1 а, б, в. Далее возможны два случая: во-первых, когда опорные пучки трех цветов суммируются и падают на фотопластину под одним и тем же углом, во-вторых, опорные пучки направляются на фотопластину под разными углами.

В случае однослойного материала независимо от схемы съемки наблюдается существенное снижение дифракционной эффективности и отношения сигнал/шум, что ограничивает их использование.

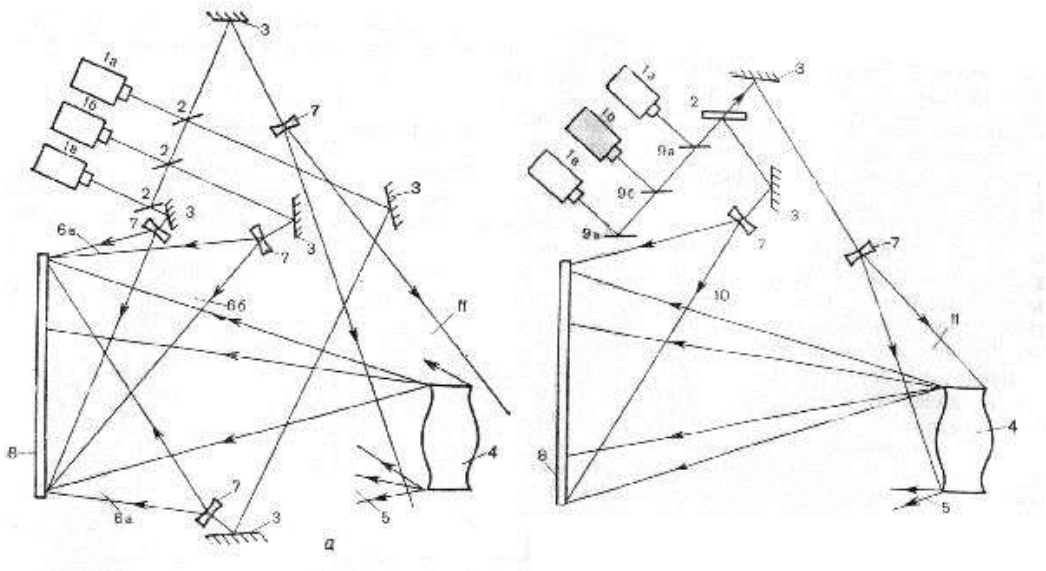


Рис.8.5. Запись пропускающей цветной голограммы без разделения и с разделением опорных пучков в пространстве

Для записи высококачественных цветных голограмм применяют способ последовательного получения трех отдельных цветных голограмм. Для этого по одной из схем последовательно получают частичные голограммы на различных картинках с фотослоями, чувствительными к зеленому, красному и синему свету.

Другой способ - изготовление частичных голограмм в отдельных слоях многослойного фотоматериала на одной подложке. При этом каждый слой сенсибилизируется к одному участку спектра, причем зелено- и красночувствительные слои десенсибилизируется к синей зоне спектра. Последнее относится как к съемке отражательных, так и пропускающих голограмм.

Важно, чтобы при воспроизведении цветного изображения из трех частей не возникло ложных изображений из-за дифракции света разных длин волн на разноименных голограммных структурах.

При восстановлении цветных голограмм на достаточно толстых слоях подавление ложных изображений обеспечивается спектральной селективностью, что позволяет использовать для восстановления изображения источник белого света. В случае пропускающей голограммы нет возможности обеспечить спектральную селективность, поэтому для устранения ложных изображений

используют угловую селективность голограмм (для чего при записи опорные пучки заводятся под разными углами).

Для всех схем получения цветных голограмм имеются следующие *общие требования*:

1. Необходимо точное соблюдение взаимного углового расположения источников света и голограммы в процессах съемки и восстановления
2. Процесс обработки и условия хранения голограммы не должны приводить к изменениям толщины слоев частичных голограмм.

При большой глубине объектов съемки эти требования становятся достаточно жесткими.

Теперь необходимо сказать несколько слов о технике воспроизведении голографических изображений.

Демонстрирование изобразительных голограмм должно обеспечивать комфортность и естественность восприятия зрителем. Качество изображения хорошей голограммы (без видимых дефектов, с высокой яркостью, малым уровнем шумов, с правильно расположенными и освещенными при съемке объектами) определяется параметрами восстанавливающего источника света: длиной волны и спектром излучения, формой пучка, интенсивностью и правильным расположением источника света и голограммы.

На практике даже толстослойная эмульсия не полностью селективна и для устранения хроматизма, проявляющегося, как правило, в виде цветных ореолов, и получения глубоких монохромных изображений применяют светофильтры. Особенно целесообразно использовать ртутные лампы с малым телом свечения, большой яркостью и линейчатым спектром.

Часто используют свет диапроектора.

Для восстановления пропускающей голограммы требуется источник света с высокой монохроматичностью, чаще всего – лазер. Но при использовании последнего приходится либо смириться с присущим лазерному излучению пятнистым шумом (спеклы), либо как-то с ним бороться.

Большинство объектов в естественных условиях освещается сверху. Поэтому при рассматривании голографического изображения объекта он воспринимается так же естественно, когда тени и блики на нем зарегистрированы в процессе освещения при съемке сверху под острым углом. Подходящие углы близки к углу Брюстера. Восстанавливающий источник при этом может быть укреплен на потолке, на стене высоко под потолком, на специальной стойке или в подвесе. Восстанавливающий пучок, падающий на голограмму, не должен перекрываться головой или корпусом зрителя, который может подойти близко к голограмме для рассматривания мелких деталей предметов, особенно произведений исскуства.

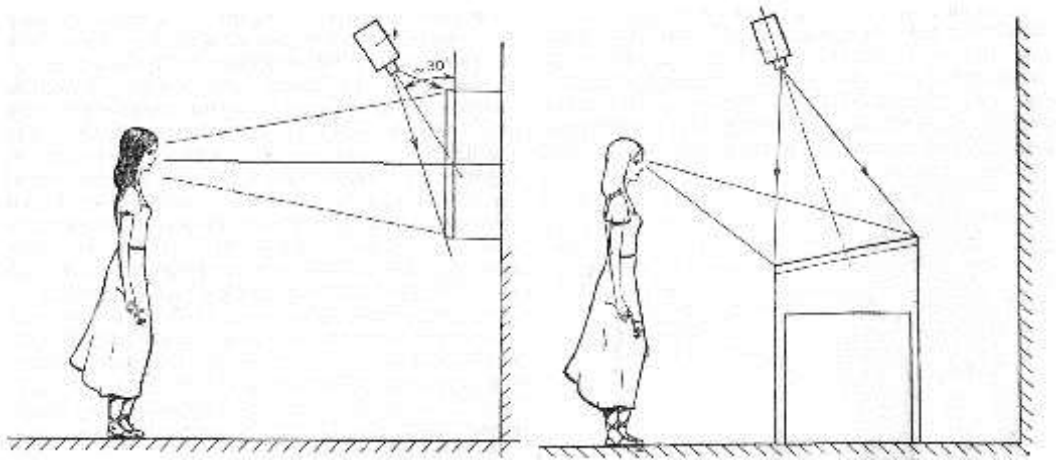


Рис.8.6. Техника воспроизведения при вертикальном и горизонтальном расположении изобразительных голограмм

Горизонтальное или вертикальное положение голограмм определяется ее содержанием и соответствует условиям съемки. При установке света необходимо учесть и блик от стекла.

Изобразительные голограммы все больше находят применения в экспозициях музеев. Есть и еще один аспект изобразительной голографии – голографический портрет, для получения которого помимо выше сказанного приходится учитывать особенности импульсных лазеров и требования техники безопасности, когда предпочтительна схема освещения с рассеивающей пластиной и двустадийная запись, для чего мы сначала рассмотрим следующую тему.

8.2. Копирование голограмм.

Иногда бывает необходимо получить копию голограммы или размножить ее. Копии могут потребоваться для архивных или коммерческих целей, для научных исследований (когда объект имеет слишком короткое время жизни). Есть два основных типа копирования – контактное или почти контактное и копирование при восстановлении.

Копирование методом контактной печати более легкое и предпочтительно при массовом производстве реплик. В идеальном случае отпечатанную контактным способом реплику голограммы получают как контактный отпечаток с обычного фотообъектива. Голограмма – оригинал прикладывается вплотную к фотоматериалу и засвечивается однородным освещением. Обращение контраста при обработке не влияет на вид изображения. Существенный недостаток: одновременно будут восстанавливаться два изображения – действительное и мнимое.

Предпочтителен другой метод копирования, когда восстанавливают с голограммы изображение и используют его в качестве объекта для записи новой голограммы. Используемая на практике схема копирования позволяет приблизить изображение к голограмме и даже вынести его вперед, расположив частично или полностью перед голограммой.

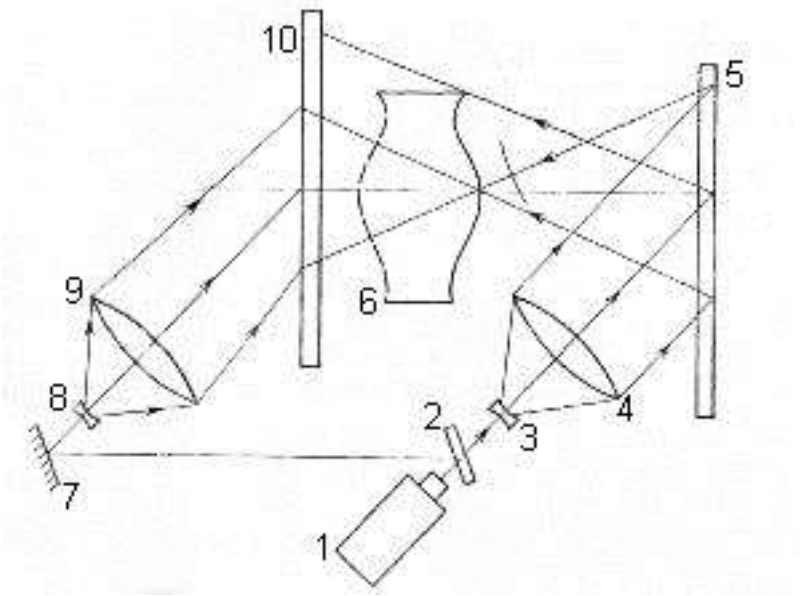


Рис.8.7. Получение пропускающей копии с пропускающего оригинала

Голограмма-оригинал 5 освещается пучком света, прямо противоположным опорному при получении голограммы-оригинала. Дифрагированный пучок формирует в пространстве действительное изображение объекта 6. Воспроизводимое изображение имеет обратный рельеф (псевдоскопично). Опорный пучок для записи голограммы-копии отражательной падает на фотопластину с обратной стороны. Последняя перемещается относительно восстановленного с голограммы-оригинала изображения, при этом можно разместить и записать сюжетно важную часть объекта 6 плоскости голограммы-копии, обеспечивая максимальную резкость при восстановлении.

При восстановлении изображения с копии голограммы сопряженный пучок дает полный эффект наблюдения реального объекта, поскольку теперь нет и «окна» между наблюдателем и объектом.

В ряде случаев целесообразно иметь голограмму-оригинал в виде пропускающей и путем копирования получать с нее отраженные голограммы. Это оправдано, когда объект живой или достаточно велик. Восстановленный с пропускающей голограммы 5 пучок строит действительное изображение 6 перед голограммой-копией 10, с другой стороны на нее падает опорный пучок. При восстановлении изображения с голограммы-копии за счет двукратного обращения именно действительное изображение ортоскопично.

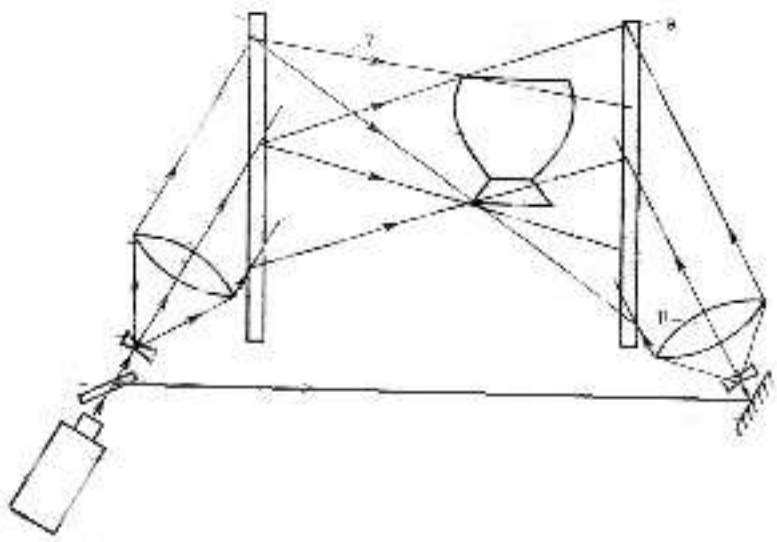


Рис.8.8. Получение отражательной копии с пропускающего оригинала

При копировании с пропускающей голограммы можно использовать несколько меньшую фотопластинку, так как при освещении не образуется тени. При копировании с отражательной голограммы образуются тени от рамы и края стекла, и часть пластинки голограммы-копии оказывается нерабочей.

8.3. Радужная голография.

В 1969 году Бентон, сотрудник фирмы «Polaroid Corporation» предложил свой способ копирования голограмм. Лейта с последующим восстановлением копии полихроматическим светом. Это двухступенчатый процесс. На первом этапе записывается просветная голограмма во внеосевой схеме. Это голограмма служит оригиналом (мастер-голограмма) и восстанавливается сопряженным лазерным пучком с получением действительного изображения. В непосредственной близости от области локализации этого изображения устанавливается светочувствительный материал, на котором регистрируется голограмма-копия. Особенность данного процесса, позволяющая свести к минимуму смещение цветов при восстановление белым светом, состоит в отсутствии вертикального параллакса, для чего на голограмму H_1, записанную на первом этапе, накладывают диафрагму в виде горизонтальной щели, и уже действительное изображение, спроецированное щелевой диафрагмой, используется для регистрации второй голограммы.

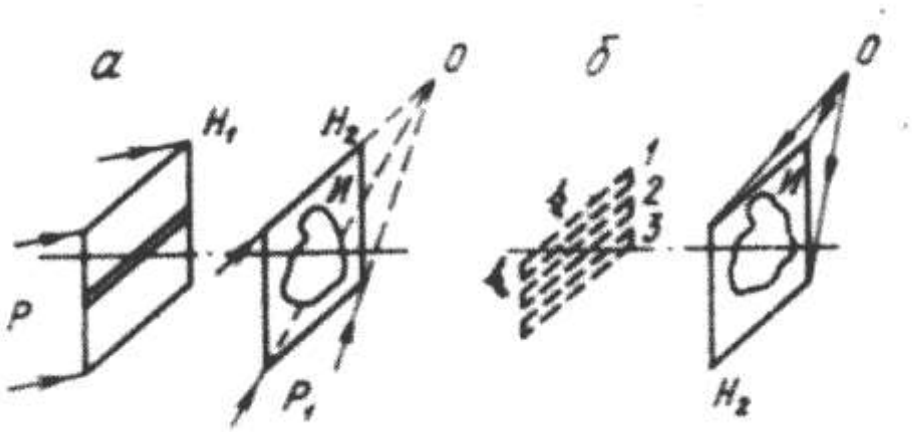


Рис.8.9. Схема записи (а) и восстановления (б) радужной голограммы

То есть, на фотопластине H_2 регистрируется голограмма сфокусированного изображения. При освещении голограммы источником

расходящегося освещения наблюдают изображение, причем источник освещения может быть неточечным и полихроматическим. Каждая спектральная компонента излучения за счет дисперсии голограммы-решетки строит смещенное по вертикали изображение щелевой диафрагмы 1, 2 и 3, которая является окном наблюдения изображения в одном цвете, соответствующим данной спектральной компоненте. Если глаза наблюдателя расположены горизонтально (параллельно щели), то он видит объемное изображение (со всеми его свойствами) в одном цвете, а при смещении глаз по вертикали цвет изображения меняется по радуге (поэтому и «радужная»), но изображение остается резким. Наблюдается разделение, а не смешение цветов в вертикальном направлении, поскольку каждое окрашенное изображение – результат раздельного восстановления информации, содержащейся в узкой щели. Наибольшая резкость имеет место для точек изображения, лежащих в непосредственной близости от голограммы, точки же, находящиеся на некотором расстоянии от голограммы будут относительно нерезкими. Величина нерезкости зависит от размера щелевой диафрагмы.

Ширина щели а определяется по формуле

$$a = \sqrt{\frac{\lambda \cdot r_{12}(r_{12} + r_i)}{r_i}}, \qquad (8.3.1.)$$

где r_{12} – расстояние между щелью и второй голограммой; r_i – расстояние между второй голограммой и объектом (его действительным изображением) – «выход». При $r_{12} >> r_i$

$$a = r_{12}\sqrt{\frac{\lambda}{r_i}} \qquad (8.3.2)$$

Реально же размер щели может быть больше рассчитанного в 2-3 раза.

Если для восстановления щелевой голограммы использовать цилиндрическую линзу, позволяющую использовать весь восстанавливающий пучок, а для улучшения дифракционной эффективности применить отбеливание,

то при освещении голограммы источником белого света можно наблюдать очень яркое изображение.

В отличие от голограмм Денисюка, требующих высокоразрешающих сред, радужные голограммы, также наблюдаемые в белом свете, требуют гораздо более низкоразрешающих фотоматериалов. Поэтому такие голограммы могут быть переведены в рельефно-фазовые путем отбеливания, либо сразу зарегистрированы на фоторезисте с последующим вытравлением экспонированных участков.

В случае использования задубленного фоторезиста реплика (копия) голограммы может быть сделана непосредственно с голограммы. Однако для получения большего количества копий с голограммы делают металлическую матрицу-штамп. Это выполняется методами гальванопластики, аналогичными тем, которые используются при производстве никелевых штампов для грампластинок. Никелевый штамп (или комплект штампов) позволяет формировать реплики на любом термопластичном материале от пленок и ламинированной бумаги до поверхности шоколада. При напылении на пленку зеркального металлического слоя ДЭ голограммы-копии повышается до 35-40% и даже до 85%. В сочетании с дешевым сырьем и огромной производительностью созданного оборудования для тиражирования данный метод копирования может и уже с успехом применяется для получения высококачественного объемного иллюстрированного материала массовых тиражей (журнал «Америка», худ. альбомы, открытки, марки и т.д.).

8.4. Голографические оптические элементы.

Голографические (или голограммные) оптические элементы (ГОЭ) представляют собой голограммы, на которых записаны волновые фронты специальной формы. ГОЭ можно сконструировать для преобразования любого входного волнового фронта в любой другой выходной фронт независимо от параметров материала подложки, например, от кривизны или показателя преломления. С их помощью возможна коррекция аберрации оптических систем,

в таком случае ГОЭ выступает в качестве составных элементов сложных оптических приборов. ГОЭ используют и как самостоятельные оптические элементы в качестве линз, зеркал, дифракционных решеток, мультипликаторов и др.

Далее рассмотрим некоторые случаи применения ГОЭ в оптике и оптическом приборостроении.

8.4.1.Голограмма-линза.

Голограмму можно рассматривать не только как результат записи волнового поля, но также как изображающий оптический элемент. Известно, что свойства линзы проявляют зонные пластинки (решетки). Под этим термином обычно понимают зонную пластинку Френеля, состоящих из чередующихся светлых и темных колец, которые ограничены окружностями с радиусами $\rho_n = \sqrt{n\lambda z_f}$, где n – целое число, λ - длина волны света с плоским волновым фронтом, которая, падая на пластину, фокусируется на расстояние z_f от нее.

Если $n\lambda << z_f$, то совокупность окружностей, которым соответствуют четные n, можно рассматривать как зонную пластину, имеющую двойное фокусное расстояние $2z_f$, совокупность окружностей с n кратным 3 – как пластинку с утроенным фокусным расстоянием и т.д. Такая пластинка Френеля с прямоугольным радиальным распределением почернения может выполнять функцию изображающего оптического элемента. Недостаток ее – возникновение большего числа изображений, расположенных на оси, совпадающей с главным лучом пучка нулевого дифракционного порядка.

Зонную пластинку с косинусоидальным распределением почернения можно получить в виде голограммы, на которой записан результат интерференции плоской и сферической волн по схеме Габора при условии линейности процесса регистрации. В этом случае образуется только ±1-с дифракционные порядки, то есть только два фокуса. В случае схемы Лейта оба изображения пространственно разделены между собой и от пучка нулевого порядка.

При освещении голограммы-линзы плоской волной возникают две сферические волны – одна сходящаяся, другая – расходящаяся. Голографическая линза одновременно выполняет функции двух линз – выпуклой (положительной) и вогнутой (отрицательной). Направления распространения образованных сферических волн зависят от направления восстанавливающей плоской волны.

Схема получения голографической линзы приведена ниже. С помощью линзы Л и микродиафрагмы Д создается точечный источник сферической волны. На заданном расстоянии z_s от точечного источника устанавливают фотопластину Ф, освещаемую также опорной плоской волной Р. Интерференционная картина регистрируется на фотопластине с последующей фотохимической обработкой, предусматривающей, как правило, отбеливание. В результате ДЭ полученной фазовой голограммы достаточно высока (до нескольких десятков %).

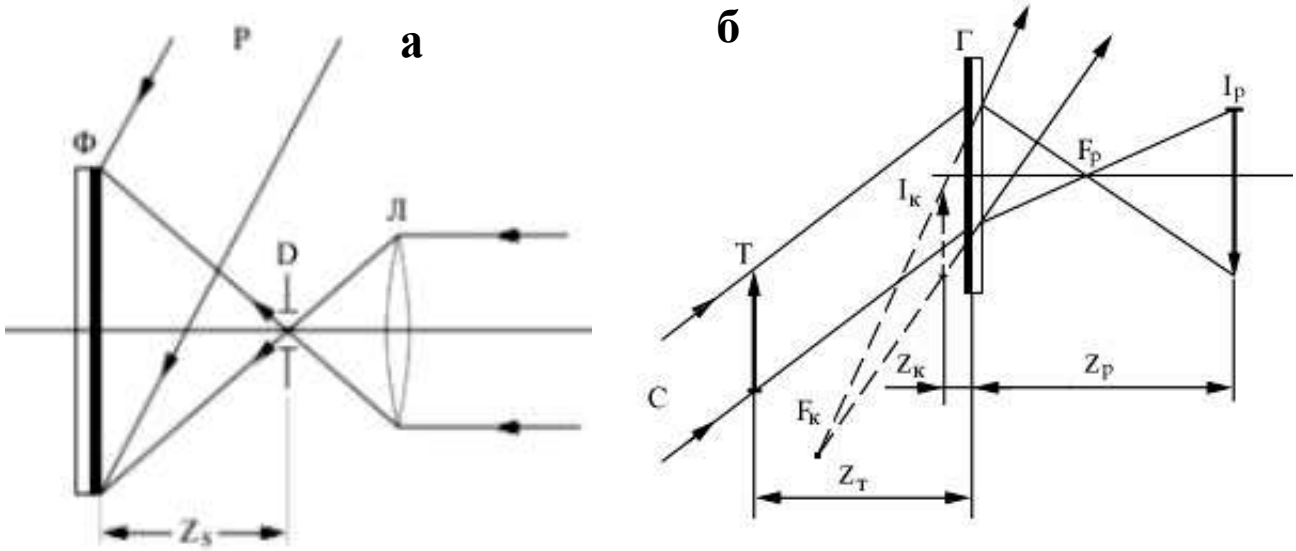


Рис.8.10.Схема получения голографической линзы (а) и построения изображения (б)

При построении изображения предмета Т, помещенного в восстанавливающий пучок С, возникают основное изображение I_p- действительное, и вторичное I_k – мнимое. Если повернуть голограмму на 180°, то характер изображений изменится.

Голографическая линза – это оптический элемент с двумя фокусными расстояниями: для основного (f_p) и сопряженного (f_k) изображений. Положения двух изображений связаны следующей формулой $1/z_p+1/z_k=2/z_T$.

Как видим, это выражение не зависит от положения источника сферической волны при получении и определяется только положением предмета Т относительно голографической линзы.

8.4.2. Голографические дифракционные решетки.

Наиболее распространенный вид ГОЭ – именно голографические дифракционные решетки (ДР), представляющие собой зарегистрированную на светочувствительном материале картину интерференции двух световых пучков. Параметры голографических решеток можно изменить в широком диапазоне с помощью схемы записи и формы поверхности, на которой регистрируется решетка.

Так, при изготовлении голографической решетки ей можно придавать любые фокусирующие свойства, например, получать плоские голограммы, аналогичные по своему действию вогнутой решетке, но лишенные астигматизма последней. Голографический метод позволяет формировать ДР с любым распределением эффективности по дифракционным порядкам. Для этой цели может быть использована оптическая схема пространственной фильтрации.

В случае падения на светочувствительный слой двух параллельных пучков под углами φ друг к другу, расстояние между интерференционными полосами определяется как $d=\lambda/2\sin(\varphi/2)$. При увеличении угла φ и уменьшении длины волны λ расстояние между штрихами уменьшается. В пределе при $\varphi\to\pi$ $d\to\lambda/2$. Есть сообщения о промышленном изготовлении ДР с пространственной частотой до 6000 линий/мм.

Преимущества голографического метода еще и в том, что решетки могут быть изготовлены весьма больших размеров (до 600×400 мм). ДР превосходят обычные, нарезанные механическим способом, по таким параметрам, как максимальная пространственная частота и размеры, отношение сигнал/шум, возможность коррекции аберрации и т.п.

На практике наиболее пригодны голографические ДР на БХЖ, что обусловлено свойствами последней (высокая ДЭ, низкая зернистость и потери и т.д.). Голографические ДР используют в лазерной технике. Будучи введены в лазерный резонатор, они служат хорошими селекторами длин волн излучения.

Две скрещенные голографические ДР делят световой пучок на несколько равных по интенсивности пучков. Таким образом, могут быть созданы мульплицирующие элементы (размножители) с эффективностью до 85%. Такие мультипликаторы обеспечивают любой шаг мультипликации от единиц до десятков мм.

8.4.3. Голографические мультипликаторы.

Мультипликация (размножение) изображений занимает важное место в технологии производства интегральных схем для микроэлектроники. Мультиплицирование требуется при использовании группового метода изготовления изделий, в многоканальных системах обработки информации, а также для системы хранения и размножения информации и др.

Голографические мультипликаторы с пространственным разделением волнового фронта содержат растр голографических элементов, каждый из которых строит изображение предмета (с полем, равным единичному изображению – одному модулю). В них разделение волнового фронта, распространяющегося от объекта, осуществляется входными зрачками этих элементов, причем каждый зрачок попадает только часть волнового фронта. Каждый элемент растра – осевая голографическая линза, концентрические кольца которой образуются в результате интерференции сферического и плоского волновых фронтов. Растр голографических линз может быть получен последовательным получением голограмм одного и того же точечного источника, образованного высококачественным (образцовым) микрообъективом. Преимущества такого мультипликатора – идентичность элементов растра, высокая разрешающая способность (особенно в центре), простота получения больших полей изображений, определяется числом мультиплицирующих элементов.

Голографические мультипликаторы с угловым делением волнового фронта содержат голограмму, представляющую собой единый мультиплицирующий элемент и обеспечивающую формирование множества микроизображений за счет дифракции на структуре голограммы световой волны, распространяющейся от объекта. При этом каждое отдельное микроизображение строится волновым фронтом, образованным всей площадью голограммы. Эти мультипликаторы бывают дух типов: на голограммах Френеля и голограммах Фурье.

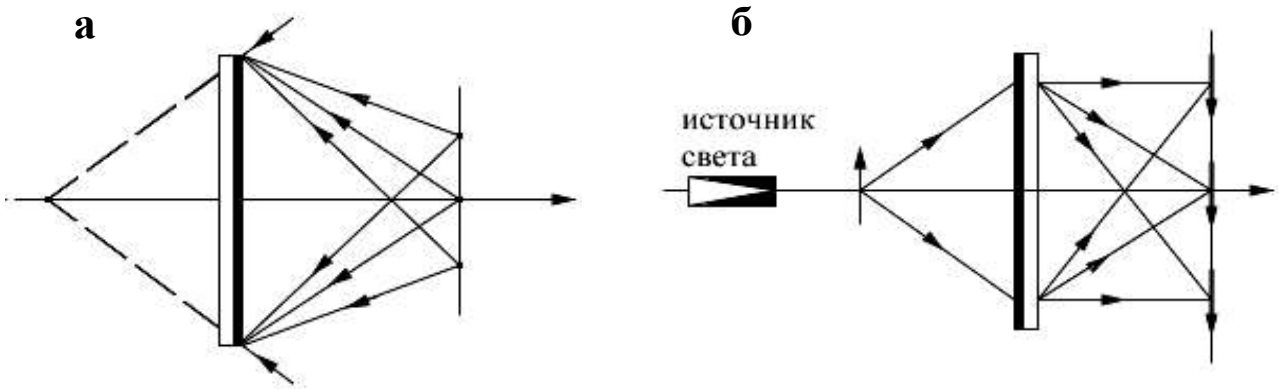


Рис.8.11. Изготовление и работа мультипликатора на голограмме Френеля

При получении голограмм Френеля используют набор когерентных точечных источников и опорный источник. В результате их интерференции на фотопластинке получаем голограмму точечных источников – мультиплицирующий элемент, представляющий собой набор внеосевых голографических линз, «вложенных» в одну апертуру.

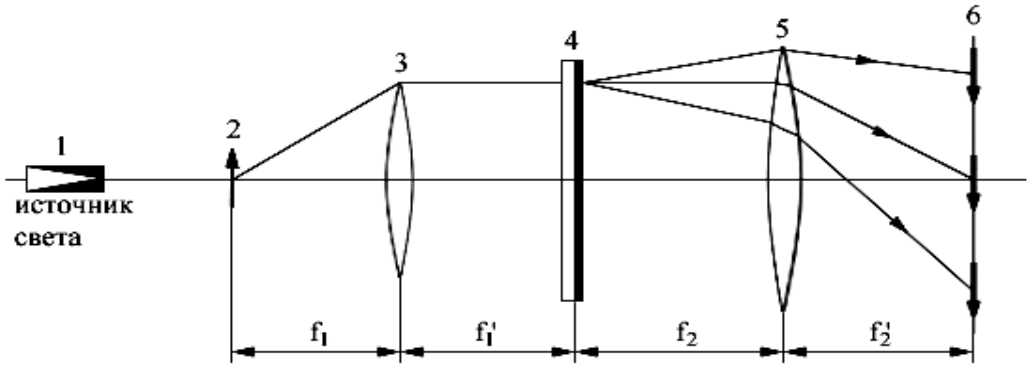


Рис.8.12. Работа голографического мультипликатора на голограмме Фурье

Голографические мультипликаторы Фурье могут быть выполнены по схеме со сходящейся волной и по схеме с мультиплицирующим элементом в плоской волне. Вторая предпочтительней, ее и рассмотрим (рис. 8.12).

Принцип образования изображения в системе может быть рассмотрен как процесс двойной дифракции.

Первая дифракция происходит на объекте 2, освещаемом плоской монохроматической волной, образуемой когерентным источником света 1. Объект 2 расположен в передней фокальной плоскости объектива 3, который образует в своей задней фокальной плоскости 4 пространственный спектр объекта. В плоскости голограммы 4, которая одновременно является передней фокальной плоскостью второго объектива 5, находится мультиплицирующий элемент, представляющий собой голограмму набора точечных источников, число и расположение которых соответствует желаемому числу и расположению размноженных изображений. В плоскости 4 имеем произведение двух спектров Фурье: объекта и набора точечных источников. Второй объектив 5 осуществляет также преобразования Фурье (обратное) объекта в своей фокальной плоскости. Поэтому в плоскости изображения 6 имеем совокупность изображений исходного объекта, причем линейное увеличение системы γ и размер изображений определяются соотношением фокусов объектов системы $\gamma=f_2/f_1$.

В качестве мультиплицирующего элемента 4 могут быть использованы две скрещенные дифракционные решетки, обеспечивающие равенство интенсивности света, дифрагированного в нулевой и несколько боковых порядков.

8.4.4. Голографические компенсаторы.

Данный тип ГОЭ применяют для коррекции оптических изображений. Голографический компенсаторы позволяют реализовать метод коррекции изображений, основанный на использовании сопряженной волны, образующий действительное изображение объекта. При совмещении действительного изображения искажающего элемента с самим этим элементом происходит восстановление первоначальной формы световой волны и получается

искаженной изображение наблюдаемого объекта. Искажающим элементом может быть линза, рассеиватель типа матового стекла или турбулентная атмосфера.

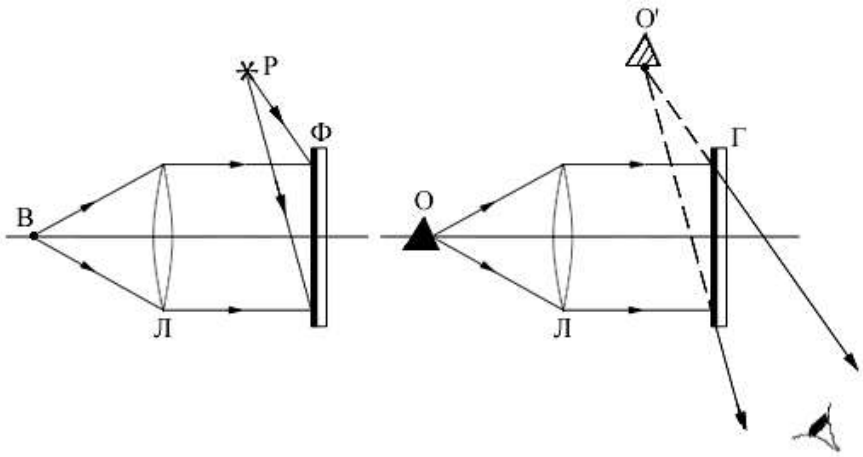


Рис.8.13. Изготовление и работа голографического компенсатора

Поясним суть метода на примере коррекции линзовых аберраций. На этапе изготовления голографического компенсатора на фотопленке Ф получают голограмму искажающего элемента – аберрационной линзы Л. При компенсации аберраций голограмму Г располагают по отношению к линзе в том же положении, как и при регистрации, и через те наблюдают искаженное изображение объекта. Тогда свет от объекта О дифрагирует на голограмме и волна соответствующего порядка формирует свободное от аберраций изображение объекта О! При освещении голограммы объектной волной от монохроматического источника В, искаженной линзой Л, восстановится изображение опорного источника Р. Если же объектная волна дополнительно искажена объектом О, расположенным перед аберрационной линзой Л, то и в восстанавливающую волну вносятся такие же искажения, и наблюдатель увидит изображение объекта О.

Метод компенсирующей голограммы может быть использован для коррекции искажений, создаваемых не только аберрациями линзы, но и оптически неоднородной средой, разделяющей объект и приемную оптику (в том числе волоконно-оптическими жгутами).

8.4.5. Голографические пространственные фильтры.

Во многих областях науки и техники требуется решать задачи из совокупности подобных ему, но имеющих некоторые отличия. Существует общий метод оптимального решения таких задач, называемых *распознаванием образов.* Подход основан на преобразовании сигнала, несущего информацию об объекте, в спектр частот исходного сигнала, который подвергают дальнейшей обработке (фильтрации) с помощью частотных фильтров, пропускающих лишь излучение определенных частот. Оптический сигнал, как распределение амплитуд и фаз объектной волны, может быть разложен на частотные составляющие, но не временные (как в радио), а пространственные, которые можно непосредственно наблюдать на экране.

Операция разложения оптического изображения (транспаранта) в спектр по пространственным частотам осуществляется с помощью линзы Л. Каждая из синусоидальных решеток, на которые можно разложить оптическое изображение, действуют независимо. Причем большей пространственной частоте решетки соответствует больший угол отклонения лучей первых дифракционных порядков: $\sin\varphi=\lambda\xi/2$, где ξ - пространственная частота решетки.

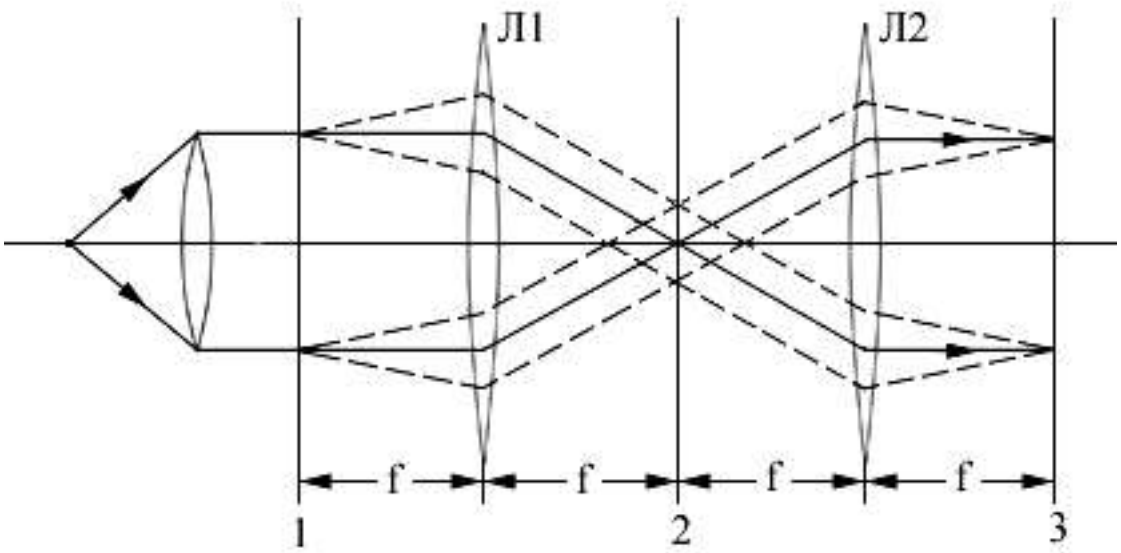


Рис.8.14. Схема согласованной фильтрации оптического сигнала

Эти лучи фокусируются линзой Л2 в точку, удаленную от центра плоскости 2 на соответствующее расстояние, определяемое фокусным

расстоянием линзы f и углом отклонения φ. Линза Л1 осуществляет преобразование Фурье оптического изображения.

При вращении транспаранта вокруг оптической оси вращается спектр в частотной плоскости 2. Изменение масштабов транспаранта также изменяет спектр: он расширяется при уменьшении и сужается при увеличении. Но поступательное движение транспаранта в плоскости 1 на спектр не отражается.

Если теперь за частотной плоскостью 2 на фокусном расстоянии поместить вторую линзу Л2, осуществляющую обратное преобразование Фурье, то в плоскости 3 построится перевернутое изображение транспаранта. Помещая в частотную плоскость 2 пространственные фильтры, можно пропускать (ослабляя или выявляя) для образования изображения те или иные высокие и низкие пространственные частоты спектра транспаранта. В результате можно из всего изображения транспаранта выделить только определенные детали, например, из страницы текста только определенную букву. Для этого в плоскости 1 помещается транспарант анализируемой страницы текста, а в частотной плоскости 2 – фильтр пространственных частот этой буквы. С изображения страницы текста, в плоскости 3 исчезнут все детали, кроме анализируемой буквы.

Голографический способ получения согласованного пространственного фильтра позволяет сохранить фазовую информацию об объекте, с которым он согласован (по которому изготовлен), и резко снизить уровень паразитных световых сигналов. На рисунке приведена схема получения голографического согласованного фильтра пространственных частот. В частотной плоскости 2 образуется Фурье – образ транспаранта и в результате интерференции с когерентным фоном от оптического клипа К образуется голограмма Фурье, являющаяся оптимальным пространственным фильтром. Такой фильтр обладает свойством распознавать тот транспарант, с которого фильтр был изготовлен, создавая в плоскости изображения яркие точки – оптические сигналы опознавания. Для этого транспарант помещается в фокальную плоскость Л1 слева, а в частотной плоскости 2 устанавливается голографический

пространственный фильтр какой либо его части. При освещении транспаранта когерентным сетом в середине фокальной плоскости 3 (в нулевом порядке) можно наблюдать практически неискаженное изображение транспаранта, а в изображении первого порядка (А или В) – яркие пятна опознавания, координаты которых соответствуют распределению по транспаранту тех его деталей, с которых снят голографический фильтр.

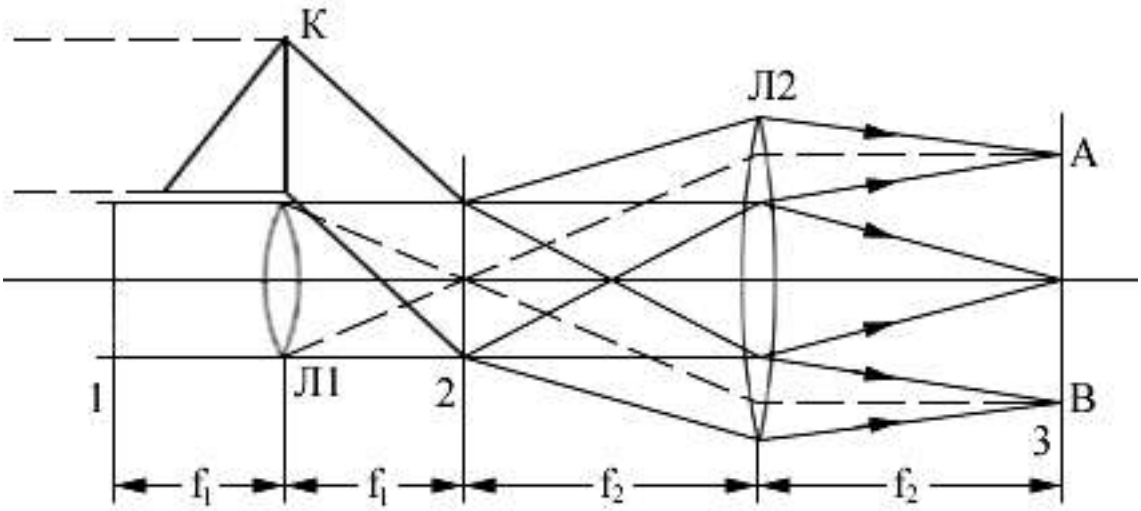


Рис.8.15. Схема получения голографического согласованного фильтра

Подобные фильтры используют в голографических устройствах распознавания образов и в устройствах оптической обработки информации. Данный метод опознавания тем надежнее, чем сложнее распознаваемый объект.

8.4.6. Голографический микроскоп.

Двухступенчатый метод голографии впервые позволял создать микроскоп, регистрирующий не только амплитуду, но и фазу световой волны, рассеянной объектом. Появление такого микроскопа открыло новые возможности исследования микрообъектов, не достижимые известными методами классической микроскопии.

В безлинзовом микроскопе достичь увеличения можно, применяя разные длины волн или разные радиусы кривизны на стадиях получения голограмм и восстановления волнового фронта.

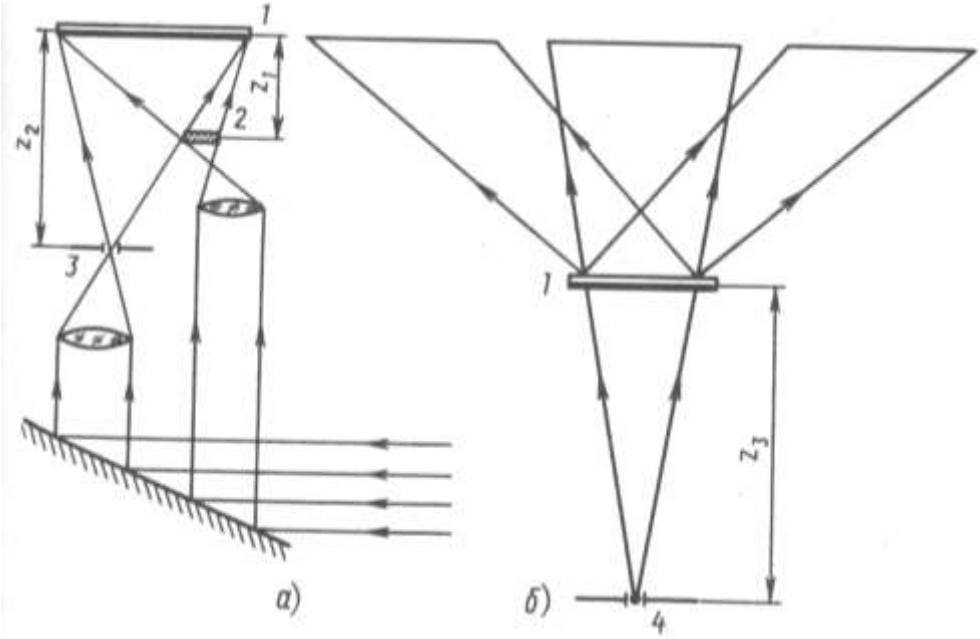


Рис.8.16. Запись и восстановление увеличенного изображения в голографическом микроскопе с прямой записью

Схема голографического микроскопа с прямой голографической записью волновых фронтов приведена на рис.8.16.

Объект 2 помещается в расходящийся лазерный пучок. Полученная дифракционная картина фокусируется вместе с когерентным фоном на фотопластинке на расстоянии Z_1 от объекта.

Увеличение восстановленного изображения определяется выражением:

$$M=[1\pm(z_1\lambda_1/z_3\lambda_2)-(z_1/z_2)]^{-1}, \qquad (8.4.1.)$$

где λ_1,λ_2 – длина волны источников излучения при записи и восстановлении; z_1 – расстояние от исследуемого объекта до плоскости голограммы; z_2, z_3 - расстояние от точечных диафрагм до плоскости голограммы соответственно в схемах записи и восстановление. Знак «-» относится к действительному изображению, знак «+» – к мнимому.

Если используются коллимированные опорный и восстанавливающий пучки ($z_2=z_3=\infty$), то микроскоп работает с единичным увеличением. При использовании коллимированного пучка только на стадии восстановления ($z_3=\infty$) увеличение микроскопа не зависит от соотношения длин волн при записи и восстановления и обусловлено только первой стадией процесса.

При $z_2=\infty$ увеличение $M=[1\pm(z_1\lambda_1/z_3\lambda_2)]^{-1}$ и достигает больших значений для действительного изображения при $z_1\lambda_1=z_3\lambda_2$. При $z_1=z_3$ увеличение $M=[1\pm(\lambda_1/\lambda_2)]^{-1}$ и завесит только от соотношения длин волн при записи и восстановлении. Следовательно, увеличение безлинзового голографического микроскопа определяется соотношением длин волн и кривизной волновых фронтов, используемых при записи и восстановлении, и может легко регулироваться. Однако при этом получаемые изображения сопровождаются значительными аберрациями, что необходимо учитывать в безлинзовой голографической микроскопии. И именно здесь целесообразно применять методы согласованной фильтрации.

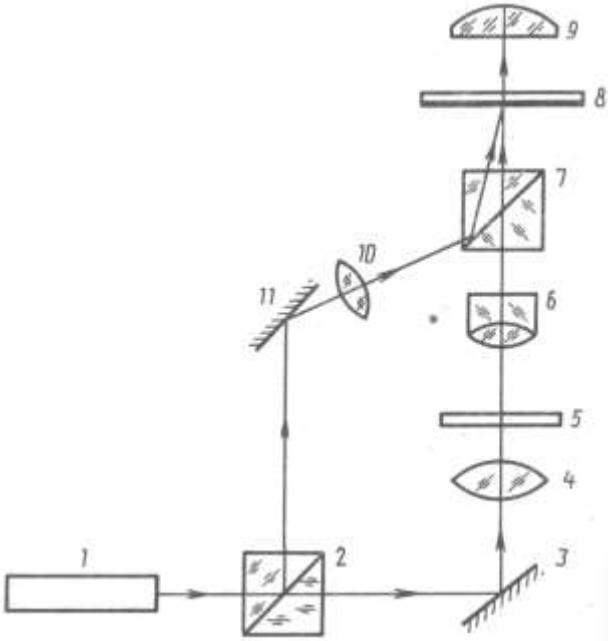


Рис.8.17. Схема голографического микроскопа с предварительным увеличением

Несомненными преимуществами обладает голографический микроскоп с предварительным увеличением. Полупрозрачный объект 5 помещается на предметном стекле и освещается расположенным в плотную к нему конденсором 4 светом лазера 1. Объектив микроскопа 6 создает увеличенное действительное изображение объекта, регистрируемое вместе с опорным пучком на голограмме 8, помещаемой между объективом 6 и окуляром 9.

Объектив 6 фокусирующую линзу 10 подбирают так, чтобы обеспечить максимальное совпадение кривизны создаваемых ими волновых фронтов при

заданном угле падения на голограмму для уменьшения пространственной частоты регистрируемой интерференционной структуры. Угол между опорными и предметными пучками выбирают достаточно малым из тех же соображений. Восстановленное изображение изучается через окуляр 9 микроскопа, который можно перестраивать по глубине и перемещать по полю зарегистрированного изображения. Подобная схема микроскопа обеспечивает достижения разрешения около 1мм.

Можно сравнить две схемы голографического микроскопа. Недостатками схемы прямой регистрации можно назвать высокие требования к разрешающей способности регистрирующей среды и сильное влияние пятнистой структуры на качество изображения. В голографической схеме с использованием микрообъектива для создания увеличенного изображения предмета требования к разрешающей способности минимальны, но поле зрения и глубина регистрирующего пространства определяются свойствами применяемого микрообъектива и весьма малы.

8.5. Голографические запоминающие устройства.

Применение голограмм Фурье как средства хранения информации успешно реализуются в голографических запоминающих устройствах (ГЗУ). При построении последних стандартным тало использование принципа страничной записи информации в виде матрицы голограмм с их адресацией лучом лазера.

Преимущества оптической памяти состоят в большой емкости (и, соответственно, высокой плотности хранения информации) и высоком быстродействии, в возможности параллельной обработки информации, высокой надежности хранения, быстром доступе к массивам информации, отсутствии энергопотреблении в статическом состоянии, а главное – большой помехоустойчивости голограмм.

Все ГЗУ можно разделить на следующие основные типы: оперативные ГЗУ;

а) на двумерных голограммах,

б) на трехмерных голограммах с трехкоординатной адресацией,

- массовые ГЗУ;
- ГЗУ постоянного типа;
- архивные ГЗУ.

Архивные ГЗУ предназначены для записи и хранения документов без предварительного кодирования. Запись позволяет получить уменьшение документов в 100-200 раз и записать страницу формата 210×297мм в виде фурье – голограммы размером 1-2мм. На одном носителе записывается ~10^4 голограмм, но можно довести емкость носителя и до 10^7. Такие ГЗУ обеспечивают длительное хранение (5-10 лет) без перезаписи, что обусловлено устойчивостью к эффектам носителя, пыли и т.д., а также независимостью от действия внешних электромагнитных и радиационных воздействий. Подобной системой могут оснащаться непосредственно читальные залы крупных библиотек.

Массовые ГЗУ сверх большой емкости можно получить, если нанести регистрирующую среду на движущийся носитель типа диска или ленту. В качестве регистрирующей среды для таких систем используют такие магнитооптические пленки. В ГЗУ с движущимся носителем может быть достигнута высокая плотность записи (~10^5бит/мм^2), близкое к теоретическому пределу, что на два порядка превышает плотность хранения, достигнутого в ЗУ на магнитных носителях. Емкость таких ГЗУ можно довести до 10^{13}бит. Чтобы избежать размазывания из-за движения носителя, запись голограмм производится коротким световым импульсом.

ГЗУ постоянного типа не требуют реверсивного регистрирующего материала, обладающего свойством стирания. Наиболее высокое быстродействие среды подобных систем у ГПЗУ со страничной организацией и адресуемым лучом. Запись голограмм на носитель информации производится на автономном устройстве. Емкость одного блока ГПЗУ с адресуемым лучом достигает 10^8бит при скорости выдачи данных порядка Гбит/сек. Перспективно использование в ГПЗУ полупроводниковых лазерах в виде матрицы инжекционных лазеров в интегральном исполнении, когда каждому лазеру

соответствует своя голограмма из матрицы и выборка голограмм осуществляется непосредственно коммутацией излучения лазера.

ГЗУ оперативного типа (ГОЗУ). Основными компонентами ГОЗУ является лазер, дефлектор, матрица линз, устройства набора линз, накопительная пластина (носитель информации), матрица фотоприемников и оптика. Традиционно запоминающей средой в такой ОЗУ являются магнитооптические пленки MnBi, запись информации на которые осуществляется за счет нагрева лучом лазера ее локальных участокв до температуры точки Кюри.

Информацию, предназначенную для введения в ГЗУ, разбивают на страницы, и каждую записывают в виде отдельной голограммы. Страницу в двоичном коде подготавливают в виде транспаранта. Транспарант называют *входной страницей.* Прозрачные участки в узлах регулярной двумерной сетке соответствуют 1, непрозрачные – 0.

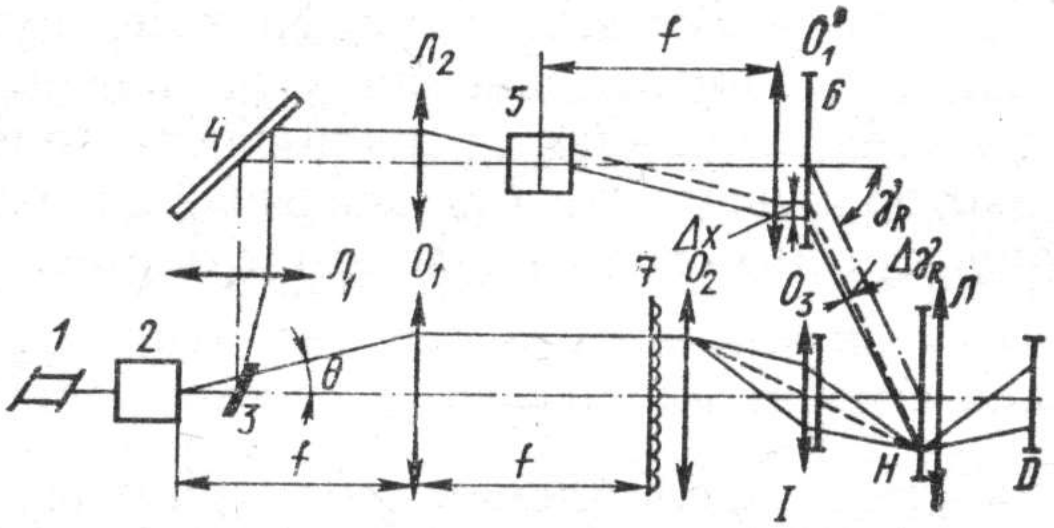


Рис.8.17. Оптическая схема ГОЗУ с трехкоординатной адресацией пучка

Входная страница представляет собой совокупность пространственно разнесенных точечных источников, ее фурье-образ складывается из фурье-образов отдельных информационных точек, отличающихся только фазовыми множителями. Поэтому, фурье-образы всех информационных точек входной страницы попадают на один и тот же участок регистрирующей среды, расположенной в фурье-плоскости.

Оптическая схема ГОЗУ с трехкоординатной выборкой приведена на рисунке 8.17.

Луч лазера 1, отклоненный дефлектором 2, разделяется светоделителем 3. Часть его линзами $Л_1$ и $Л_2$, зеркалом 4, объективом $O_1^{|}$ и голографической дифракционной решеткой 6 (пассивный отклоняющий элемент) направляется в виде опорного пучка в требуемый участок накопительной матрицы голограмм Н. Линзы $Л_1$ и $Л_2$ дают общее увеличение, равное 1.

Вторая часть пучка коллиматором O_1 вводится в одну из ячеек линзового растра 7. Передняя фокальная плоскость объектива O_1 совпадает с выходной плоскостью дефлектора. Линзовый растр (или голографическая линза) увеличивает угловую расходимость предметного пучка, позволяя освещать всю апертуру объектива O_3 , формирующего информационный оптический сигнал. Объектив O_2 направляет луч на матрицу входных данных – устройство набора страниц УНС или транспарант Т. Информация вносится в предметный пучок путем пространственной модуляции при просвечивании матрицы входных данных. После экспонирования матрицы-накопителя и фиксации (в случае необходимости) либо записывают новую голограмму, либо считывают информацию с любой другой голограммы. Для записи новой голограммы в другом участке матрицы-накопителя (двухмерная запись) необходимо дефлектором 2 осуществить параллельный перенос пучка, для чего в состав квадрата 2 в схеме реально вместе с устройством отклонения входят и оптические элементы – телескоп дефлектора. При подаче соответствующих электрических сигналов на вход дефлектора обеспечивается последовательная запись голограмм по всей поверхности накопительной матрицы.

Для реализации же трехмерной записи, т.е. записи новой входной страницы на той же позиции матрицы-накопителя, необходимо изменить только угол падения опорного пучка. В схему вводится дополнительный отклоняющий элемент – дефлектор 5. Раздельная запись голограмм на одной позиции возможна при изменении угла падения опорного пучка.

Таким образом, каждая записанная голограмма характеризуется тремя координатами (x_K, y_S, γ_L), индексы которых образуют адрес голограмм.

Необходимо также отметить, что для разделения процессов записи и считывания (т.е. для перекрытия объектного канала на время считывания) используются поляризатор до дефлектора 2 и пленочный анализатор перед линзой O_1.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р. Кольер, К. Беркхарт. Л. Лин.. Оптическая голография.- М.:Мир,1973.
2. Оптическая голография/под ред. Г. Колфилда. – В 2-х томах.- М.:Мир,1982.
3. М. Милер. Голография. – М.:Машиностроение,1979.
4. М. Франсон. Голография.-М.:Мир,1972.
5. В. Г. Комар, О. Б. Серов. Изобразительная голография и голографический кинематограф.-М.:Исскусство,1987.
6. А. М. Морозов, И. В. Кононов. Оптические голографические приборы.- М.:Машиностроение,1988.
7. Ч. Вест. Голографическая интерферометрия.-М.:Мир,1982.
8. Голографические неразрушающие исследования /под ред. Р.К.Эрфа.- М.:Машиностроение,1979.
9. Ю. Н. Островский. М. М. Бутусов, Г. В. Островская. Голографическая интерферометрия.-М.:Наука,1977.
10. А. Г. Козачок. Голографические методы исследования в экспериментальной механике.-М.:Машиностроение,1984.
11. А. Б. Кудрин, В. Г. Бахтин. Прикладная голография.- М.:Металлургия,1988.
12. А. Г. Козачок, Ю. Н. Солодкин. Голографические методы измерений.- Новосибирск,НЭТИ,1985.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Глава 1. Интерференция колебаний и волн. 1

Глава 2. Голографическая запись и воспроизведение информации. 7

2.1. Принцип записи и восстановления оптических голограмм. 7

2.2. Образование и восстановление голограмм. 11

2.3. Свойства голограммы. 14

Глава 3. Типы голограмм. 15

3.1. Геометрический подход. 15

3.2. Амплитудные и фазовые голограммы. 20

3.3. Голограммы Френеля, Фраунгофера и Фурье. 21

3.3.1. Голограмма Френеля. 22

3.3.2. Голограмма Фраунгофера. 22

3.3.3. Голограммы Фурье. 25

Глава 4. Анализ голограмм. 28

4.1. Дифракционная эффективность. 28

4.2.Видность (контраст) интерференционных полос. 31

4.3. Геометрический анализ голограмм. 34

Глава 5. Источники света для записи и восстановления голограмм 41

Глава 6. Материалы для записи голограмм. 46

6.1. Требования к регистрационным средам. 46

6.2. Галоидосеребряные фотографические слои. 50

6.3. Слои хромированного желатина. 51

6.4. Фотополупроводниково-термопластические слои. 52

6.5. Фотохромные материалы. 54

6.6. Сегнетоэлектрические кристаллы. 55

6.7. Халькогенидные стеклообразные полупроводники. 56

6.8. Фотополимеры. 56

Глава 7. Компоненты голографических систем. 57

Глава 8. Применения голографии. 60

8.1. Изобразительная голография. 60
8.2. Копирование голограмм. 68
8.3. Радужная голография. 70
8.4. Голографические оптические элементы. 72
8.4.1. Голограмма-линза. 73
8.4.2. Голографические дифракционные решетки. 75
8.4.3. Голографические мультипликаторы. 76
8.4.4. Голографические компенсаторы. 78
8.4.5. Голографические пространственные фильтры. 79
8.4.6. Голографический микроскоп. 82
8.5. Голографические запоминающие устройства. 85
Список литературы 89