

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования



**Пермский национальный исследовательский
политехнический университет**

Перминов А.В., Файзрахманова И.С.

ПРИКЛАДНАЯ ГОЛОГРАФИЯ

Курс лекций

ПЕРМЬ 2017

Перминов Анатолий Викторович, Файзрахманова Ирина Сергеевна

Прикладная голография. Курс лекций. Учеб. пособие.

Учебное пособие написано по лекциям, читаемым Перминовым Анатолием Викторовичем студентам Пермского национального исследовательского университета. Пособие знакомит читателя с основными разделами голографии.

В конце приведен список дополнительной литературы для самостоятельной подготовки. Для студентов технических специальностей.

Содержание

Лекция 1	4
Лекция 2	11
Лекция 3	16
Лекция 4	28
Лекция 5	38
Лекция 6	51
Лекция 7	63
Лекция 8	72
Лекция 9	82
Библиографический список	89

Лекция 1

Основы голографического метода записи и воспроизведения информации с точки зрения волновой и физической оптики.

Тема 1 . Исторические сведения. Голограмма как носитель информации.

Цель:

- Дать представление о голографии как о разделе физики.

Задачи:

- ознакомить с историей развития голографии;
- дать основные понятия о голограмме как носителе информации;
- изучить простейшие типы голограмм.

Голография как раздел физики. Основные этапы становления голографии: Д.Габор, Ю.Н.Денисюк, Э.Лейт и Ю.Упатниекс. Этапы развития голографии: поляризационная голография; голографическая регистрация изменений параметров волнового поля во времени, динамическая голография. Ю.Н.Денисюк – основоположник русской школы голографии.

Голография раздел физики, в котором изучаются процессы преобразования волновых полей интерференционными структурами, формируемыми когерентными волновыми полями при их взаимодействии в веществе.

Основой голографии является наиболее общий метод записи и восстановления произвольного волнового поля:

- запись осуществляется путем регистрации в светочувствительной среде результата когерентного сложения (интерференции) исходного волнового поля с другой (опорной) волной;
- восстановление (воспроизведение, преобразование) происходит вследствие дифракции излучения на зарегистрированной интерференционной структуре.

Основные свойства и особенности голограмм связаны с возможностью восстановления волны, неотличимой от исходной объектной волны, т.е. волны, сформированной объектом.

Идентичность исходной объектной волны и волны, полученной при освещении голограммы, позволяет получить объективную информацию о форме и структуре объектов.

Голограмма представляет собой оптическую копию объекта. С точки зрения наблюдателя «голографическое» изображение объекта при определенных условиях наблюдения неотличимо от оригинала.

Голографический метод применим к волнам любой природы, но наибольшее развитие получила оптическая голография.

Оптическая голография рассматривает спектральный диапазон электромагнитного излучения, включающий **видимое излучение (свет), а также ультрафиолетовое и инфракрасное излучения.** Диапазон частот оптического излучения принято определять в интервале $3 \cdot 10^{11} \div 3 \cdot 10^{17}$ Гц.

При изучении голографических процессов будем ориентироваться на **видимый диапазон излучения.**

Видимое излучение (свет) – электромагнитное излучение, которое может непосредственно вызывать зрительное ощущение человека.

Границы спектральной области видимого излучения:

- нижняя граница $380 \div 400$ нм,
- верхняя граница $760 \div 780$ нм.

Видимое излучение содержит следующие основные составляющие с длинами волн: красную $760 \div 620$ нм, оранжевую $620 \div 590$ нм, желтую $590 \div 560$ нм, зеленую $560 \div 500$ нм, голубую $500 \div 480$ нм, синюю $480 \div 450$ нм и фиолетовую $450 \div 400$ нм.

Применение лазеров и разработка высокоразрешающих регистрирующих сред стимулировали расцвет голографии и ее приложений в таких областях как

- оптическая обработка информации,
- оптическое приборостроение,
- изобразительная техника,
- интерферометрия,
- лазерная техника,
- регистрация быстротекающих процессов,
- неразрушающий контроль изделий .

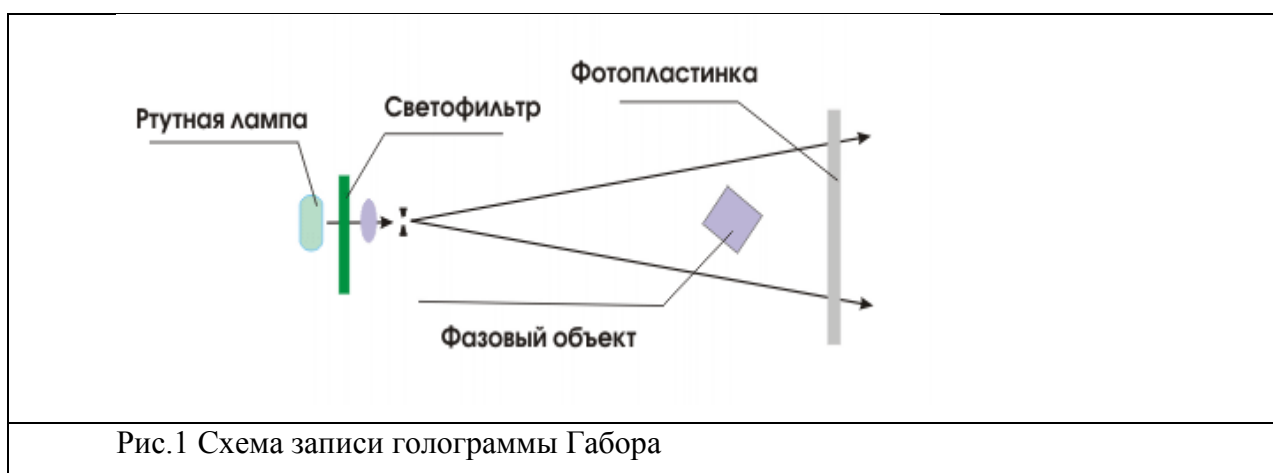
Основные этапы становления голографии: Д. Габор, Ю.Н. Денисюк, Э. Лейт и Ю. Упатниекс.

Впервые идею голографии с полной определенностью сформулировал **Д. Габор** в **1947** году. Он теоретически и экспериментально обосновал возможность записи и последующего восстановления амплитуды и фазы волны при использовании двумерной (плоской) регистрирующей среды.

Помимо Нобелевской премии, Габор был удостоен многих научных почестей и наград. Был почетным членом Венгерской академии наук, Лондонского королевского общества, Национальной академии наук США; был награжден медалями Юза (1967), Юнга (1967), Майкельсона (1968), Румфорда (1968) и др.

Умер Габор в Лондоне 9 февраля 1979

Схема Габора



При записи голограммы Габор фиксировал интерференцию волн монохроматического источника света и света, рассеянного фазовым объектом, помещенным перед фотопластинкой. Для получения высокого контраста интерференционной картины использовалась самая яркая линия спектра излучения ртутной лампы. После проявления и отбеливания фотопластинка восстанавливала трехмерное изображение этого объекта. На голограмме можно было видеть и мнимое, и действительное изображения, и восстанавливающий источник света одновременно, что мешало комфортному восприятию трехмерного изображения.

Следующим этапом в развитии голографии явились работы **Ю.Н. Денисюка**, **который в 1962** году показал возможность восстановления голограммой, зарегистрированной в трехмерной среде, не только амплитуды и фазы волны, но также и ее спектрального состава. Эти работы стали фундаментом трехмерной голографии (голографии в объемных средах) и ее приложений.

Схема записи Денисюка

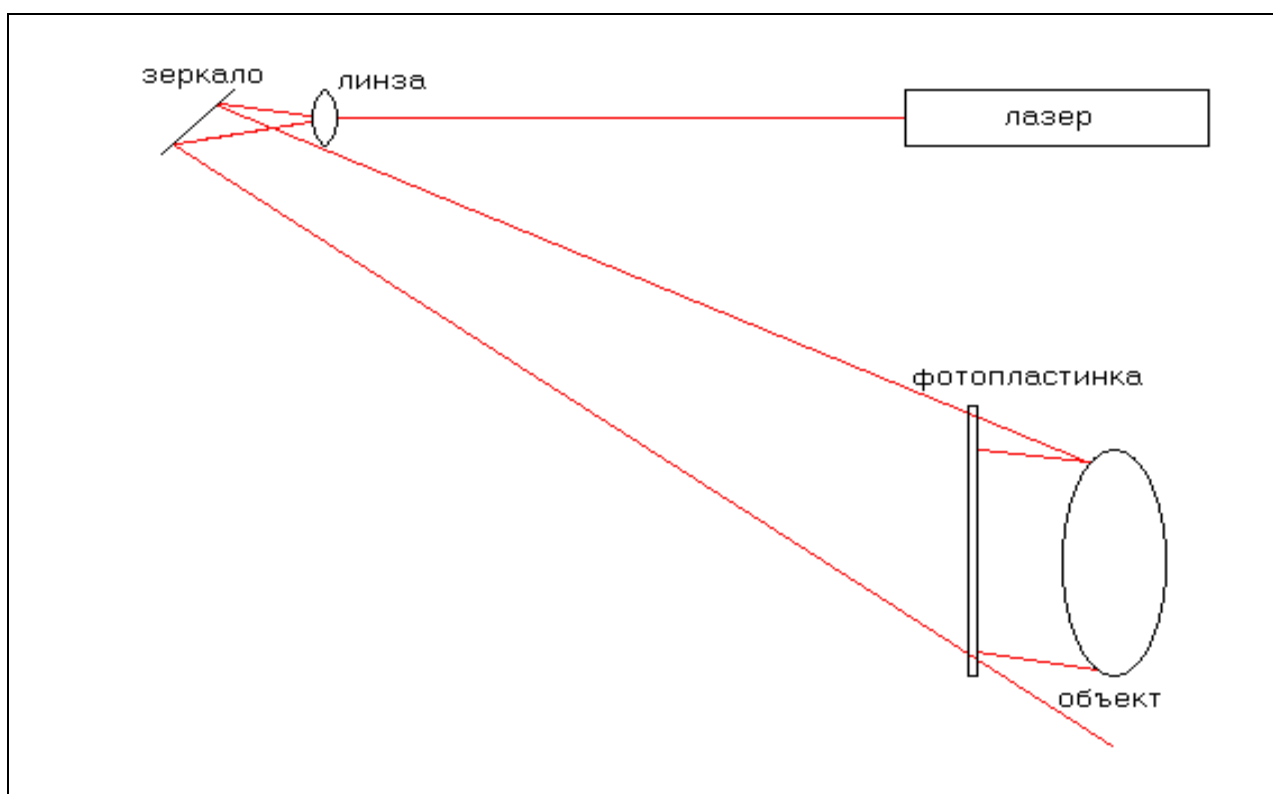
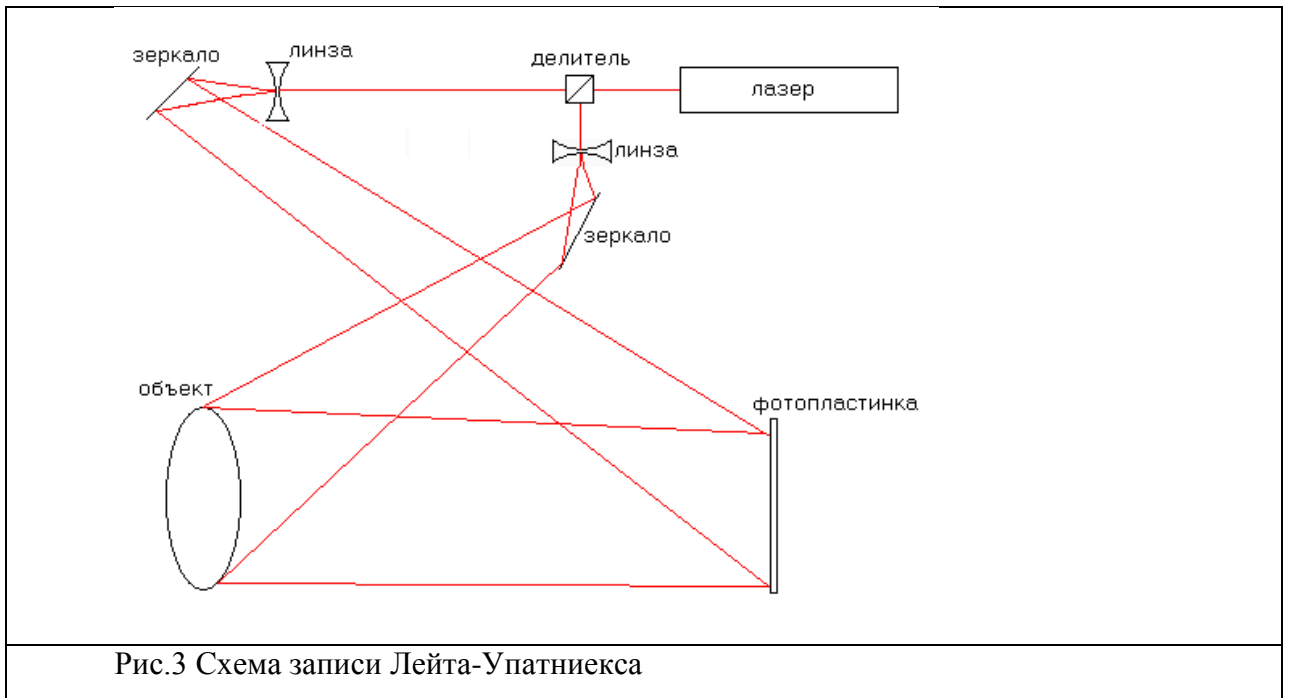


Рис.2. Схема Денисюка

Луч лазера расширяется линзой и направляется зеркалом на фотопластинку. Часть луча, прошедшая через фотопластинку, освещает объект. Отраженный от объекта свет формирует объектную волну. Объектная и опорная волны падают на пластинку с разных сторон.

Записывается отражающая голограмма, изображение которой видно в обычном белом свете солнца или лампы.

Значительный вклад в развитие практических приложений голографии внесли **Э. Лейт и Ю. Упатниекс**, которые предложили внеосевую схему записи голограмм и впервые использовали лазер в качестве источника излучения при получении голограмм (1962-1964гг).



Луч лазера делится специальным устройством, делителем на два. После этого лучи с помощью линз расширяются и с помощью зеркал направляются на объект и регистрирующую среду. Обе волны (объектная и опорная) падают на пластинку с одной стороны. При такой схеме записи формируется пропускающая голограмма, требующая для своего восстановления источника света с той же длиной волны, на которой производилась запись.

Поляризационная голография

Важными этапами дальнейшего развития голографии явилось доказательство возможности записи и воспроизведения состояния поляризации излучения путем регистрации голограмм в средах с фотоиндуцированной анизотропией (Ш.Д. Какичашвили - 1972-1978 г.г.)

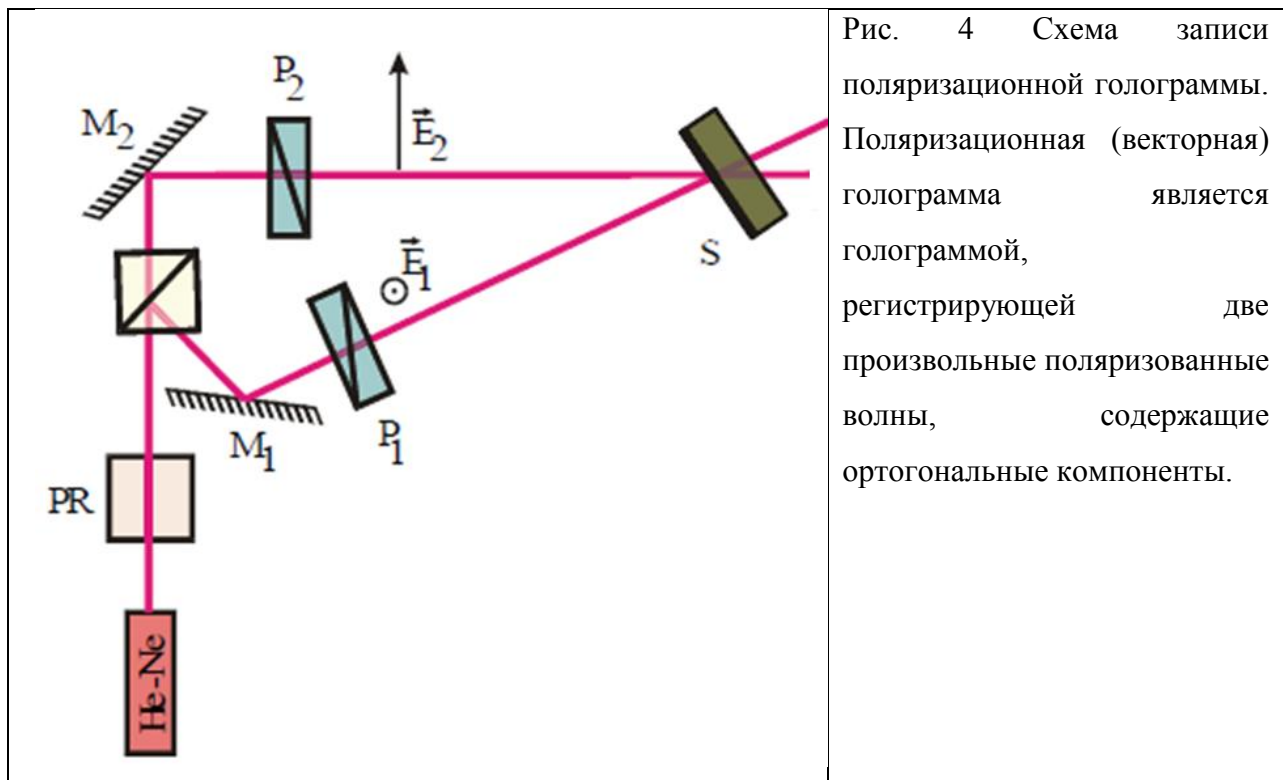


Рис. 4 Схема записи поляризационной голограммы. Поляризационная (векторная) голограмма является голограммой, регистрирующей две произвольные поляризованные волны, содержащие ортогональные компоненты.

Динамическая и резонансная голография

В **динамической голографии** в качестве регистрирующих сред используются вещества, в которых запись изображения происходит непосредственно под воздействием записываемого пучка без проявления. Записывающие пучки испытывают изменения, вызванные создаваемой ими же голограммой. Процессы записи и считывания происходят одновременно и взаимосвязано, что обуславливает преобразование первичных волн.

Динамическая голограмма основана на взаимодействии нескольких когерентных волн при их прохождении через нелинейную среду из-за обратной связи между записывающими волнами и записываемой ими голограммой.

Оптически нелинейная среда это среда, в которой происходит изменение оптических свойств, например показателя преломления n и (или) коэффициента поглощения, в соответствии с распределением интенсивности интерференционной картины

Время образования динамической голограммы определяется быстротой отклика регистрирующей среды и интенсивностью записывающих пучков. Обратная связь является запаздывающей.

Информация, содержащаяся в падающем излучении в виде распределения интенсивности в интерференционной картине, определяет структуру голограммы, от которой зависят изменения волн в последующие моменты времени.

Использование различных регистрирующих сред и схем записи позволяет реализовать разнообразные преобразования волн.

Одним из видов динамической голографии является **резонансная голография**.

Толчком к развитию **резонансной голографии** послужило открытие американскими исследователями **Абелом, Курнитом и Хартманом фотонного эха**.

Эффект **фотонного эха** наблюдается в **резонансных средах**, в которых длина волны линии испускания (поглощения) при переходах атомов на нижний энергетический уровень совпадает с длиной волны экспонирующего голограмму излучения. Если на резонансную среду послать последовательно два импульса света, разделенные интервалом времени Δt , то через следующий интервал времени Δt после второго импульса появится эхо, т.е. среда испустит добавочный третий импульс.

Появление эха можно интерпретировать как способность среды запоминать и воспроизводить временные параметры электромагнитного поля, в данном случае это интервал между последовательными импульсами. Также отметим, что среда «помнит» пространственное распределение фаз первого импульса.

Советские исследователи **Штырков и Самарцев** предложили записывать **резонансные динамические голограммы** импульсами объектного и опорного излучения, не перекрывающимися во времени.

На резонансную среду в момент времени $t = 0$ направляется импульс объектной волны I_1 , который переводит часть атомов среды из основного состояния в возбужденное. В возбужденном состоянии фазы колебаний атомов среды согласованы с фазой колебаний объектной волны при ее взаимодействии со средой.

Запись голограммы, совпадающая с ее считыванием, осуществляется импульсом плоской опорной волны I_2 , который попадает в среду после окончания воздействия волны I_1 в момент времени $t = \Delta t$. Импульс I_2 обращает фазы колебаний всех атомов среды на π , т.е. колебания в среде начинают развиваться во времени в обратном направлении. В момент времени $2\Delta t$ среда испустит импульс эха I_3 . Волновой фронт волны I_3 будет обращен по отношению к волновому фронту волны I_1 .

Голография с записью в резонансных средах, в которой пространственная память голограммы объединена с временной памятью фотонного эха, **открывает принципиально новую возможность запоминать, а затем воспроизводить процессы, связанные с изменением состояний во времени и пространстве**.

Ю.Н. Денисюк (основоположник советской голографии):

- предложил и обосновал голографический метод с записью в трёхмерных средах (1962);
- разработал принципы динамической голографии и методы практического применения голографии;
- был признанным лидером развития голографии – одного из научно-технических направлений второй половины XX-го века.

Голограмма Денисюка (1962 г.), полученная на прозрачных галогенидосеребряных фотоматериалах с использованием в качестве источника излучения ртутной лампы, явилась экспериментальным обоснованием метода записи в трехмерной среде голограмм, способных восстанавливать амплитуду, фазу и спектральный состав объектной волны и заложила фундамент нового направления – объемной голографии, или голографии в трехмерных средах.

Лекция № 2

Голографический метод – двухэтапный: запись информации – регистрация голограммы; получение информации – считывание голограммы. Голограмма как носитель информации. Элементарная голограмма – результат взаимодействия двух плоских монохроматических волн. Распределение интенсивности в стоячей волне (интерференционной картине).

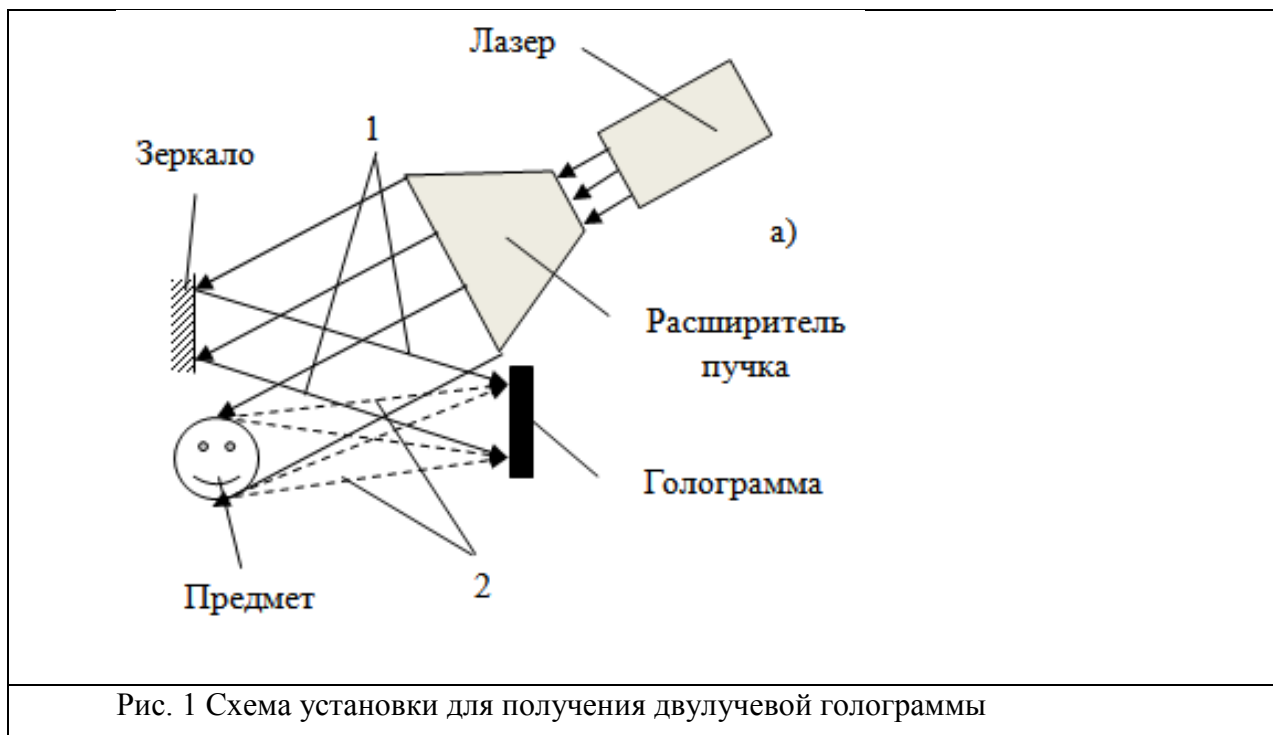
Элементарный метод получения голограмм. Запись информации и считывание голограммы

Для образования голограммы, которая, по сути, является интерференционной картиной, **необходимо существование,** по крайней мере, **двух когерентных волн.**

В голографии эти волны носят название объектной (предметной) и опорной (референтной).

Объектная (предметная) волна - одна из волн, образующих интерференционную картину при получении голограммы. **В объектной волне** содержится информация, предназначенная для воспроизведения или преобразования. Обычно **объектная волна** формируется излучением, прошедшим через объект, либо отраженным от него.

Опорная (референтная) волна - одна из волн, образующих интерференционную картину при получении голограммы. Опорная волна обычно используется для восстановления объектной волны. Как правило, **опорная волна** имеет простую и легко воспроизводимую форму, например, плоскую или сферическую.



Луч лазера расширяется и делится на две части. Одна часть отражается зеркалом к регистрирующей среде (РС), образуя опорный пучок 1 (**опорную волну**). РС – фотопластинка. Вторая часть попадает на РС, отразившись от предмета. Она образует объектный пучок 2 (**объектную волну**).

Опорный и объектный пучки, обладая высокой степенью пространственной когерентности, налагаются друг на друга и образуют интерференционную картину, которая фиксируется РС (фотопластинкой). Экспонированная таким способом РС суть **голограмма**.

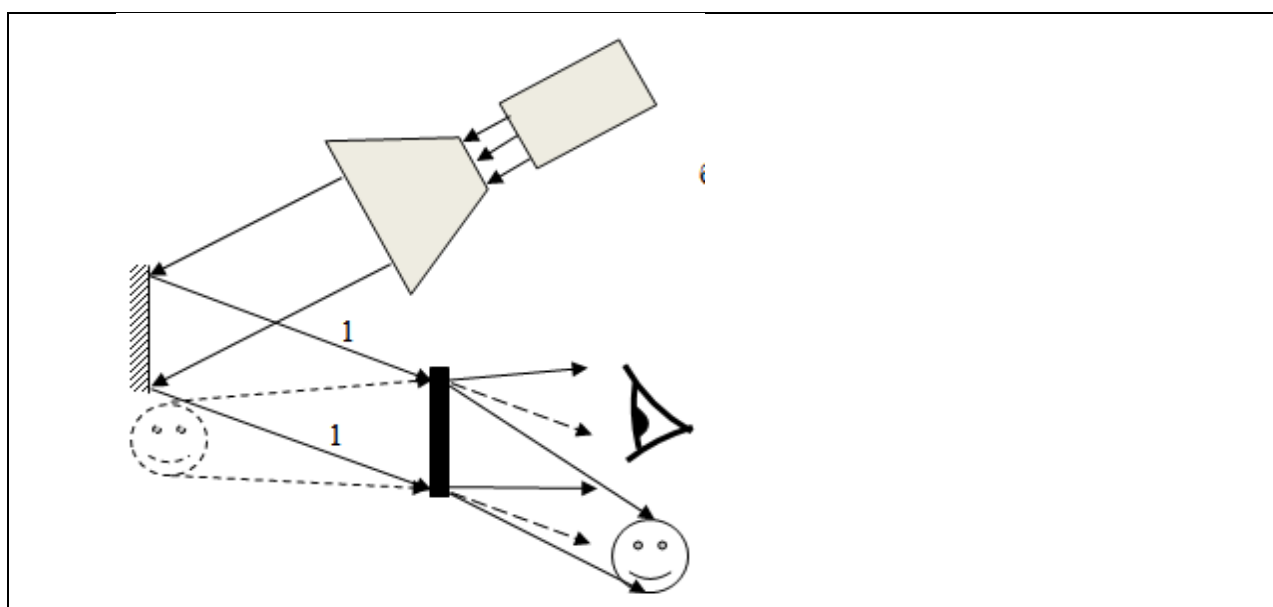


Рис. 2 Схема восстановления изображения

Для восстановления изображения РС располагают относительно источника света так, как она находилась при облучении, и освещают **опорным пучком** света. Опорный пучок дифрагирует на голограмме, в результате чего возникает волна, имеющая точно такую структуру, как волна, отражавшаяся предметом.

Дифрагированная волна дает **мнимое изображение предмета**, которое воспринимается глазом наблюдателя. Наряду с волной, образующей мнимое изображение, возникает еще одна волна, которая дает **действительное изображение предмета**. Действительное изображение зеркально предмету.

Элементарная голограмма – результат взаимодействия двух плоских монохроматических волн.

Рассмотрим РС, на которую падают два когерентных параллельных световых пучка – опорный 1 и объектный 2. Для простоты предположим, что пучок 1 падает на РС нормально, а угол падения пучка 2 равен ψ (рис. 3).

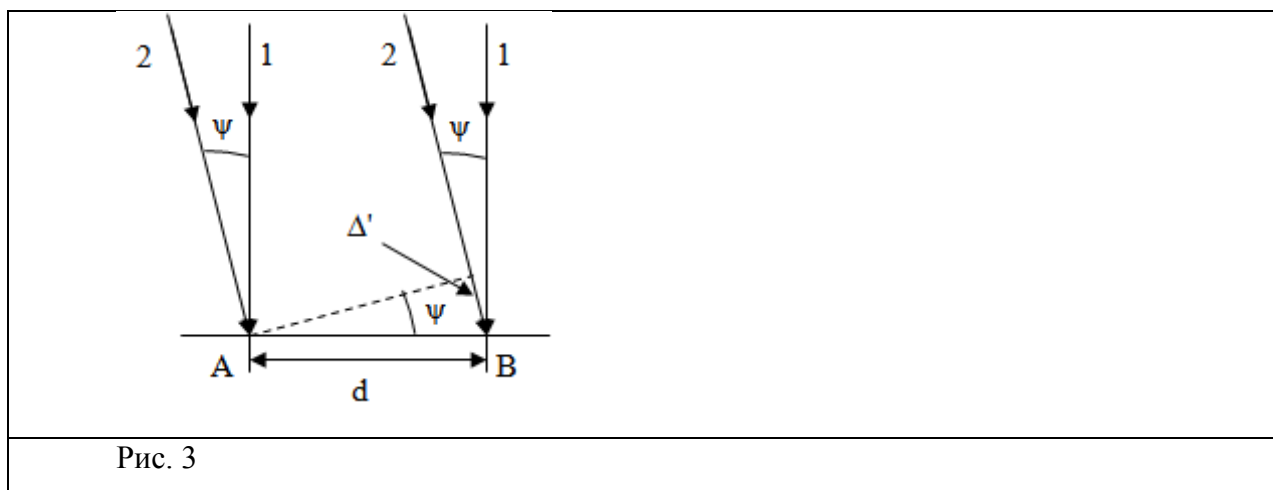


Рис. 3

Вследствие интерференции опорной и объектной волн на пластинке образуется система чередующихся прямолинейных максимумов и минимумов интенсивности. Пусть точки A и B соответствуют серединам соседних интерференционных максимумов. Тогда разность хода волн $\Delta = \lambda$.

Из рис. 3 видно, что $\Delta = d \sin \psi$, следовательно $d \sin \psi = \lambda$.

Зафиксировав на РС интерференционную картину, направим на нее опорный пучок 1. РС для этого пучка играет роль дифракционной решетки с периодом d .

Отличительная особенность решетки – ее **пропускающая способность** **изменяется в направлении, перпендикулярном к «штрихам»**, по закону косинуса. У

обычных дифракционных решеток пропускающая способность изменяется скачком. Такая особенность голограмм приводит к тому, что **интенсивность всех дифракционных максимумов порядка выше первого практически равна нулю.**

При освещении РС опорным пучком 1 (рис. 4) возникает дифракционная картина, максимумы которой образуют с нормалью к пластинке углы φ , определяемые условием:

$$d \sin \varphi = m\lambda, \quad m = -1, 0, +1$$

Максимум $m = 0$ определяется направлением опорного пучка. Максимум $m = +1$ лежит на продолжении объектного пучка 2 (см. лучи 2'). Максимум $m = -1$, лежит в направлении лучей 2".

Полученный результат останется справедливым, когда объектный пучок лучей 2 является расходящимся. Максимум $m = +1$, будет определяться расходящимся пучком лучей 2'. В этом направлении возникнет мнимое изображение предмета. Сходящиеся лучи 2" (им соответствует $m = -1$) дадут действительное изображение предмета, из которого исходили лучи 2.

При получении голографического изображения предмета РС освещается опорным пучком 1 и множеством расходящихся пучков 2, отраженных разными точками предмета. В результате экспонирования в РС возникает сложная интерференционная картина, образованная наложением картин, даваемых каждым пучком 2 в отдельности.

При освещении голограммы опорным пучком в направлении $m = +1$ восстанавливаются все объектные волны, которые исходили от предмета при экспонировании РС.

В направлениях, отвечающих $m = 0$ и $m = -1$, возникают еще две группы волн. Эти волны распространяются в других направлениях и не мешают восприятию волн, дающих мнимое изображение предмета (см. рис. 2).

Голографическое изображение предмета является объемным. На него можно смотреть из разных положений. Можно заглянуть за голографическое изображение и увидеть обратную сторону предмета или скрытые им другие предметы. Сместившись в сторону, мы воспринимаем изображение, восстановленное от периферической части голограммы, на которую при экспонировании падали лучи, отраженные от скрытых предметов. Рассматривая изображения ближних и дальних предметов, приходится, как и при рассматривании самих предметов, по-разному аккомодировать глаз.

Если голограмму разделить на несколько частей, то каждая часть при освещении опорной волной дает такую же картину, что и исходная голограмма. Однако чем меньшая часть голограммы используется для восстановления изображения, тем меньше его

четкость. Этот факт легко объяснить, если вспомнить, что разрешающая сила дифракционной решетки уменьшается при уменьшении числа штрихов.

Распределение интенсивности в стоячей волне (интерференционной картине).

Уравнения Габора

Время регистрации и восстановления голограммы значительно превышает период осцилляции используемого излучения, поэтому при описании процессов получения голограммы и восстановления волнового фронта будем рассматривать только комплексные амплитуды колебаний светового вектора непосредственно вблизи регистрирующей среды.

Комплексная амплитуда **объектной волны**:

$$E(\vec{r}_0) = A(\vec{r}_0) \exp(i\varphi(\vec{r}_0))$$

\vec{r}_0 - радиус-вектор, лежащий в плоскости голограммы.

Комплексная амплитуда плоской **опорной волны** в плоскости голограммы:

$$E_0(\vec{r}_0) = A_0 \exp(i\vec{k}\vec{r}_0)$$

A_0 – амплитуда, сохраняющая постоянное значение в пределах поперечного сечения пучка.

Амплитуда голографического поля в плоскости регистрации голограммы:

$$E(\vec{r}_0) + E_0(\vec{r}_0) = A(\vec{r}_0) \exp(i\varphi(\vec{r}_0)) + A_0 \exp(i\vec{k}\vec{r}_0).$$

Интенсивность голографического поля будет описываться следующим образом:

$$I(\vec{r}_0) = (E + E_0)(E^* + E_0^*),$$

где звездочкой отмечены комплексно сопряженные величины.

Раскрывая выражение, написанное выше, получим:

$$I(\vec{r}_0) = EE^* + E_0E_0^* + EE_0^* + E_0E^* = |E|^2 + |E_0|^2 + EE_0^* + E_0E^*$$

$$I_O \equiv |E|^2 \text{ - - интенсивности объектной волны,}$$

$$I_R \equiv |E_0|^2 \text{ - - интенсивности опорной волны.}$$

РС является линейным детектором интенсивности голографического поля, т.е. амплитудный коэффициент пропускания голограммы пропорционален интенсивности голографического поля

$$T(\vec{r}_0) = T_0 I(\vec{r}_0)$$

Комплексная амплитуда поля формируемого в плоскости голограммы при дифракции на ее структуре восстанавливающего излучения задается выражением

$$E_G(\vec{r}_0) = T(\vec{r}_0)E_0(\vec{r}_0) = T_0 I(\vec{r}_0) E_0(\vec{r})$$

Подставим выражение для $I(\vec{r}_0)$ в данное уравнение. Учтем выражения для амплитуд объектной $E(\vec{r}_0)$ и опорной $E_0(\vec{r}_0)$ волн. После преобразований уравнению для голографического поля можно придать следующую форму:

$$E_G(\vec{r}_0) = E'_G + E''_G + E'''_G,$$

$$E'_G = T_0 \left[|A_0|^2 + |A|^2 \right] E_0,$$

$$E''_G = T_0 |A_0|^2 E,$$

$$E'''_G = T_0 |A_0|^2 E^* \exp(2ik\vec{r}_0)$$

Эти уравнения впервые были получены Д. Габором (1948 г.) и носят название уравнений Габора.

E'_G - описывает комплексную амплитуду волны, распространяющейся в направлении опорной волны (см. рис. 2 и 4). Нулевой порядок дифракции, $m = 0$.

E''_G - описывает волну, идущую в направлении распространения объектной волны. Эта волна формирует восстановленное с помощью голограммы **мнимое изображение предмета** (см. рис. 2 и 4). Минус первый порядок дифракции, $m = -1$.

E'''_G - описывает комплексную амплитуду волны, сходящейся в **действительное изображение предмета** (см. рис. 2 и 4). Плюс первый порядок дифракции, $m = +1$.

Пространственное разделение этих порядков обеспечивается соответствующим выбором углов падения опорной и объектной волн на плоскость регистрации голограммы.

Лекция № 3

Основные типы голографических схем. Пространственная частота, расположение интерферирующих пучков относительно регистрирующей среды, толщина голограммы. Элементарная пропускающая голограмма. Зонная пластинка Френеля и голограмма, образованная плоской и сферической волнами.

Основные типы голографических схем

Основные голографические схемы, используемые для регистрации голограмм, названы, как правило, либо **по имени авторов** - **схема Габора**, **схема Денисюка** и т.д.,

либо по специфическим особенностям геометрии оптической схемы - осевая схема и т.п.

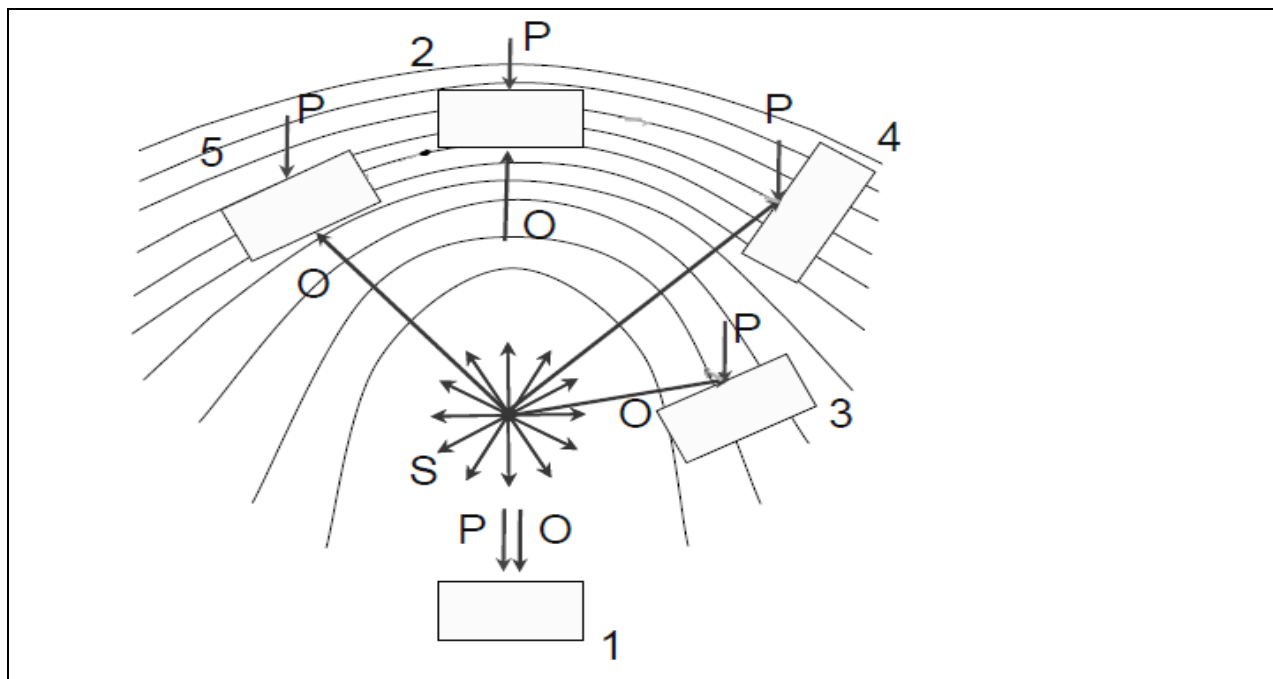


Рис. 1 Геометрия образования голограмм различных типов при использовании плоской опорной волны (P) и объектной волны (O), образованной точечным источником излучения S. 1 – голограмма Габора; 2 – голограмма Денисюка; 3 – голограмма Лейта и Упатниекса; 4 – пропускающая голограмма (внеосевая); 5 – отражательная голограмма (внеосевая)

Положение «1» и «2» РС - голограммы записывают при соосном (коллинеарном) направлении интерферирующих пучков:

- «1» - регистрируется пропускающая голограмма, имеющая максимальный период интерференционной картины (голограмма Габора).
- «2» – отражательная голограмма с минимальным периодом (голограмма Денисюка).

Положение «3», «4» и «5» - регистрация внеосевых голограмм:

- «3» - историческая схема записи пропускающих голограмм Лейта и Упатниекса;
- «4» - схема регистрации пропускающей вне осевой голограммы;
- «5» – схема регистрации отражательной вне осевой голограммы.

В положении РС «4» и «5» регистрируются внеосевые голограммы, период которых одинаков.

Элементарная голограмма

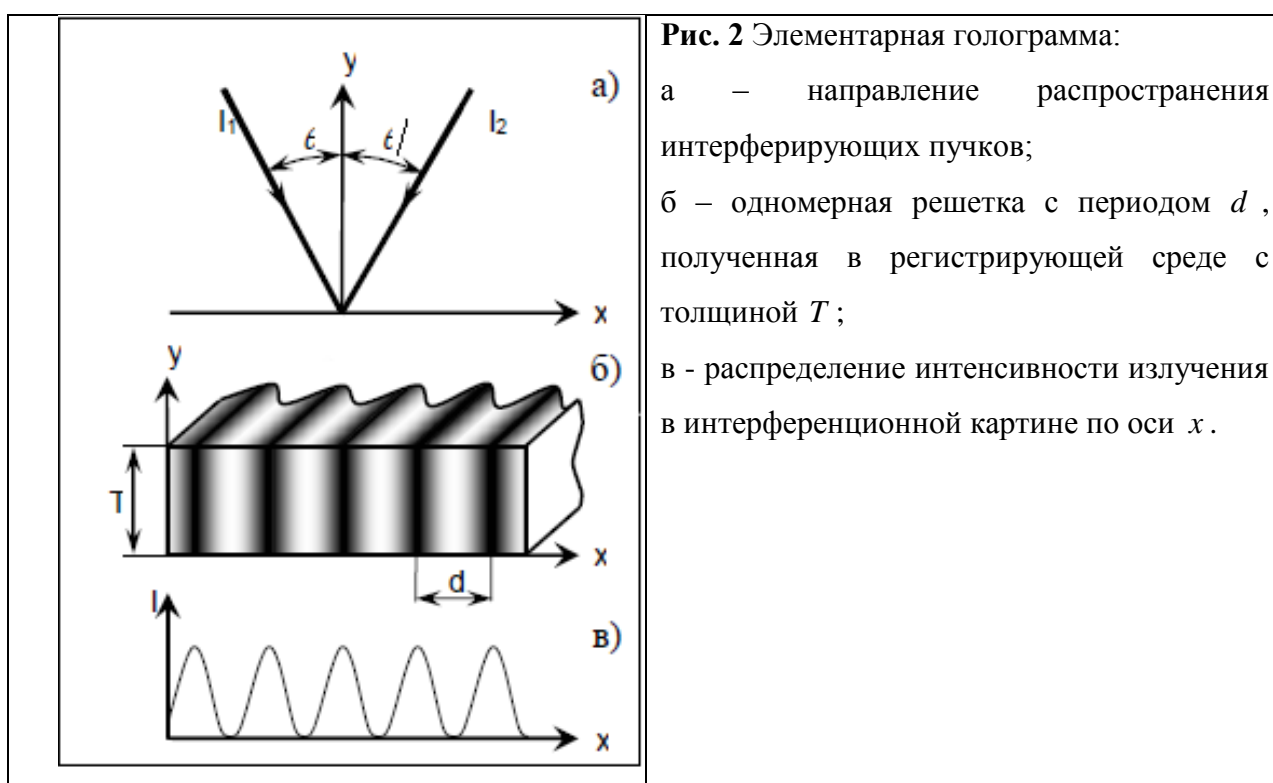
Элементарная голограмма представляет собой одномерную решетку толщины T , в которой изменение параметров среды происходит в строго определенном направлении.

Элементарная голограмма результат взаимодействия двух когерентных плоских волн I_1 и I_2 .

Расстояние между соседними максимумами интенсивности в регистрируемой интерференционной картине:

$$d = \frac{\lambda}{\sin \theta_1 + \sin \theta_2},$$

где λ – длина волны регистрируемого излучения, θ_1 и θ_2 – углы падения интерферирующих волн I_1 и I_2 на регистрирующую среду



На рис. 2 приведена симметричная схема записи голограммы, где $\theta_1 = \theta_2 = \theta$. Элементарная голограмма получена в линейной регистрирующей среде и является синусоидальной дифракционной решеткой.

Элементарная голограмма удобная модель для количественных оценок и аналитического описания процессов получения и считывания голограмм.

Произвольную голограмму можно представить в виде суперпозиции элементарных голограмм с различными параметрами.

Характеристики, определяющие свойства голограмм:

- период голограммы – d , или ее пространственная частота – $\nu = 1/d$;
- толщина голограммы – T ;
- характер отклика регистрирующей среды на воздействие излучения (фотоотклик);
- ориентация изофазных поверхностей интерференционной картины относительно границ голограммы.

В зависимости от спектрального состава регистрируемого излучения различают:

монохромные голограммы - полученные при использовании излучения только одной длины волны;

цветные – полученные при использовании излучения, содержащего несколько длин волн.

Пространственная частота голограммы - величина, обратно пропорциональная пространственному периоду изменения оптических параметров голограммы d , измеряется обычно в $мм^{-1}$ либо в $см^{-1}$.

Для элементарной голограммы, полученной при взаимодействии двух плоских волн, $\nu = 1/d$, где d - расстояние между двумя смежными (соседними) максимумами интенсивности в регистрируемой интерференционной картине.

Произвольная голограмма - характеризуется набором (спектром) пространственных частот ориентированных произвольно элементарных голограмм, из которых она состоит.

Пространственные частоты голограммы:

$$\bar{\nu} = \frac{1}{d}, \quad \nu_{\min} = \frac{1}{d_{\max}}, \quad \nu_{\max} = \frac{1}{d_{\min}}$$

Максимальная пространственная частота определяет разрешающую способность регистрирующей среды, необходимую для записи всех пространственных частот голограммы.

Наименьшей ν_{\max} обладают осевые голограммы (схема Габора). В схеме Денисюка ?? $\nu_{\max} \rightarrow 2/\lambda$.

Геометрические размеры среды играют важную роль и определяют многие свойства голограммы, зависящие от степени ее объемности.

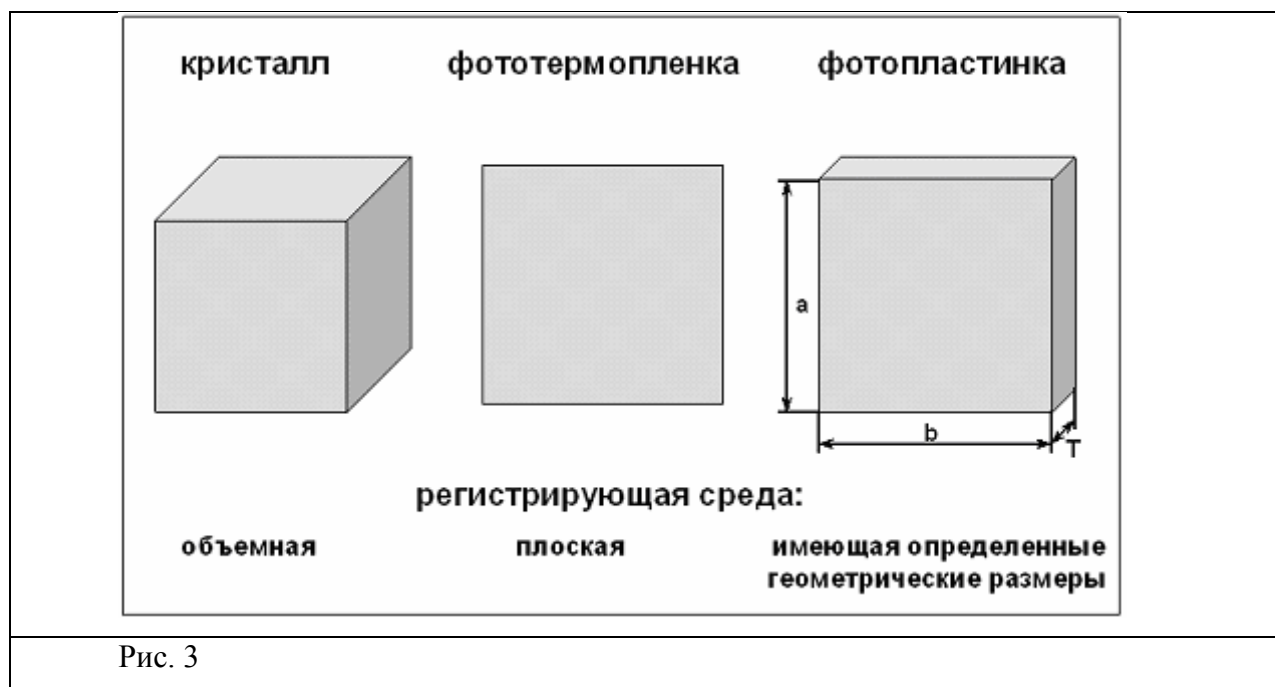


Рис. 3

На рис. 3 приведены примеры регистрирующих сред, которые можно считать объемными (3D) или плоскими (2D).

Реальные образцы используемых регистрирующих сред имеют определенные геометрические размеры – как правило, на практике образцы для записи голограмм характеризуют площадью образца и его толщиной.

Соотношение между пространственной частотой ν и толщиной T определяет меру **объемности голограммы** и ее важнейшие свойства: **угловую и спектральную селективность, дифракционную эффективность и др.**

Двумерная (плоская, 2D) голограмма

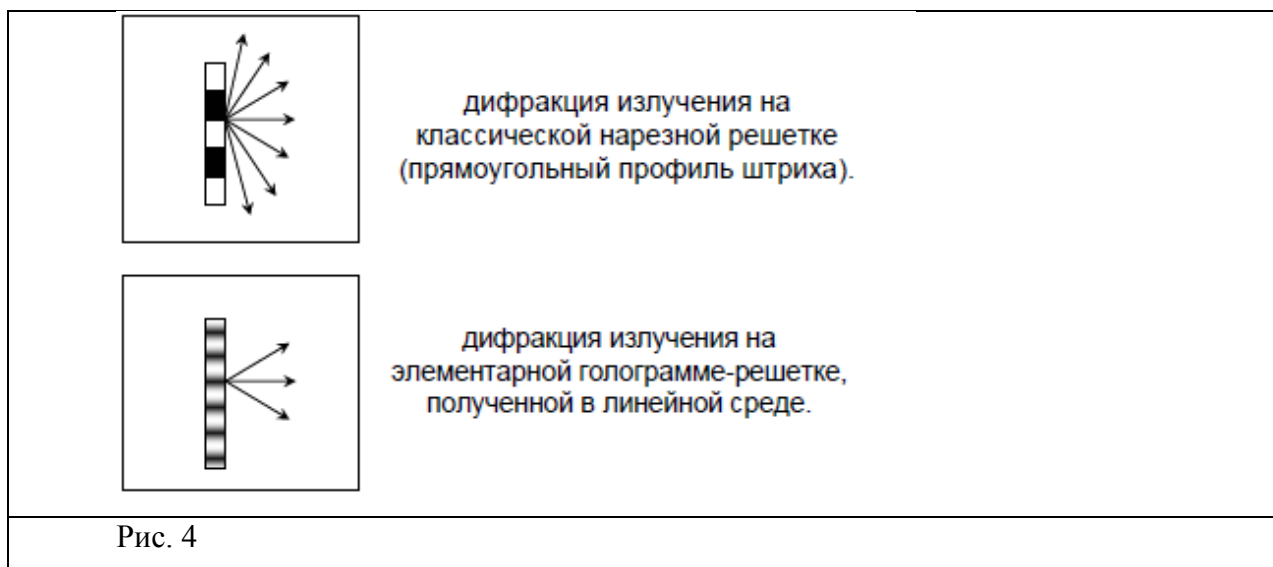
Голограмма является двумерной при $T\nu \rightarrow 0$, т.е. в такой голограмме можно пренебречь эффектами, связанными с ее конечной толщиной.

При считывании двумерной голограммы образуются две волны $+1$ и -1 порядков дифракции, которые формируют действительное изображение объекта при $k = +1$, и мнимое изображение при $k = -1$, а также присутствует волна нулевого порядка дифракции $k = 0$.

В большинстве практических случаев происходит образование большего количества порядков дифракции.

Математический аппарат, разработанный для традиционных (плоских) дифракционных решеток, применим для теоретического анализа двумерных голограмм.

Голографический метод облегчил получение дифракционных решеток с синусоидальным распределением модулируемого оптического параметра (показателя преломления, коэффициента поглощения или оптической толщины среды). Такие решетки позволяют получать только два дифракционных порядка $+1$ и -1 , в отличие от нарезных решеток с прямоугольным профилем штриха.



При восстановлении объектной волны для 2D голограмм существует принципиальная возможность изменения масштабов в изображении объекта путем соответствующего выбора параметров схемы и длины волны излучения при регистрации и считывании голограммы.

Использование излучения различных длин волн при записи и восстановлении объектной волны позволяет применять 2D голограммы в качестве управляемых транспарантов в **системах обработки информации.**

Характер фотоотклика регистрирующей среды определяет **линейный**, либо **нелинейный режим** записи интерференционной картины (ИК).

В **линейном режиме** амплитуда модуляции оптического параметра в голограмме прямо пропорциональна интенсивности излучения в ИК.

В **нелинейном режиме нет** пропорциональности между амплитудой модуляции оптического параметра и распределением интенсивности в ИК. Пространственное распределение оптического параметра в ИК отличается от синусоидального. Появляются высшие порядки дифракции и искажаются амплитуды восстановленных волн первого порядка дифракции.

«Изображения» объекта, образованные дифрагированными волнами высших порядков, имеют мало общего с самим предметом.

В ряде специальных случаев (голограмма сфокусированного изображения, объект-транспарант без рассеивателей) волны высших порядков образуют изображения. Распределение яркости в этих изображениях искажено, а фаза изображения «к»-го порядка отличается в «к» раз от фазы изображения 1-го порядка.

Трехмерная (объемная, 3D) голограмма

Голограмма является трехмерной при $T\nu \rightarrow \infty$ т.е. толщина голограммы намного превышает пространственный период изменения ее оптических параметров.

При освещении **объемной голограммы** формируется только один дифракционный порядок «-1-й». Трехмерная голограмма обладает **угловой и спектральной селективностью**, что обеспечивает возможность воспроизведения в дифрагированной волне не только амплитуды и фазы объектной волны, но также и ее спектрального состава.

Селективность голограммы – свойство голограммы, связанное с уменьшением интенсивности дифрагированной (восстановленной) волны I_d при отклонении условий освещения голограммы от оптимальных, определяемых условием Вульфа-Брэггов.

Эффективность и информационная емкость трехмерных голограмм определяет их широкое практическое применение.

Теоретический анализ трехмерных голограмм достаточно разработан лишь для ограниченного круга объектных волн (модовая теория, теория связанных волн).

Применение трехмерных голограмм определяется прогрессом в области разработки светочувствительных сред для их регистрации.

В зависимости от типа регистрирующей среды различают:

- **тонкослойные трехмерные голограммы** - статические трехмерные голограммы в средах толщиной порядка 10-20 мкм;
- **объемные (глубокие, 3D) голограммы** - статические трехмерные голограммы в средах толщиной порядка 1000 мкм и более;
- **динамические трехмерные голограммы.**

Вопрос о степени объемности голограммы решается экспериментально по наличию +1 и высших порядков дифракции и их эффективности.

Теоретический критерий степени объемности (параметр Клейна) применимый в случае элементарных голограмм:

$$Q = \frac{2\pi\lambda T}{nd^2}$$

λ - длина волны излучения, T - толщина голограммы, n - средний показатель преломления голограммы, d - пространственный период голограммы.

При $Q > 10$ голограмму принято считать трехмерной, высокоселективные трехмерные голограммы имеют $Q > 1000$.

Трехмерные голограммы получили широкое применение в изобразительной голографии, динамической голографии, при получении голограммных оптических элементов.

Благодаря высокой селективности трехмерные голограммы используются в качестве узкополосных спектральных и угловых селекторов: в настоящее время на средах толщиной порядка 1 мм достигнуты значения спектральной селективности – порядка десятых долей нм, а угловой селективности – порядка единиц угловых минут.

Пропускающие и отражательные голограммы

Расположение регистрирующей среды относительно направления распространения интерферирующих пучков (независимо от ее формы и геометрических размеров) определяет тип голограммы: **пропускающая или отражательная**.

Пропускающие голограммы регистрируются, когда интерферирующие пучки падают на поверхность РС с одной стороны.

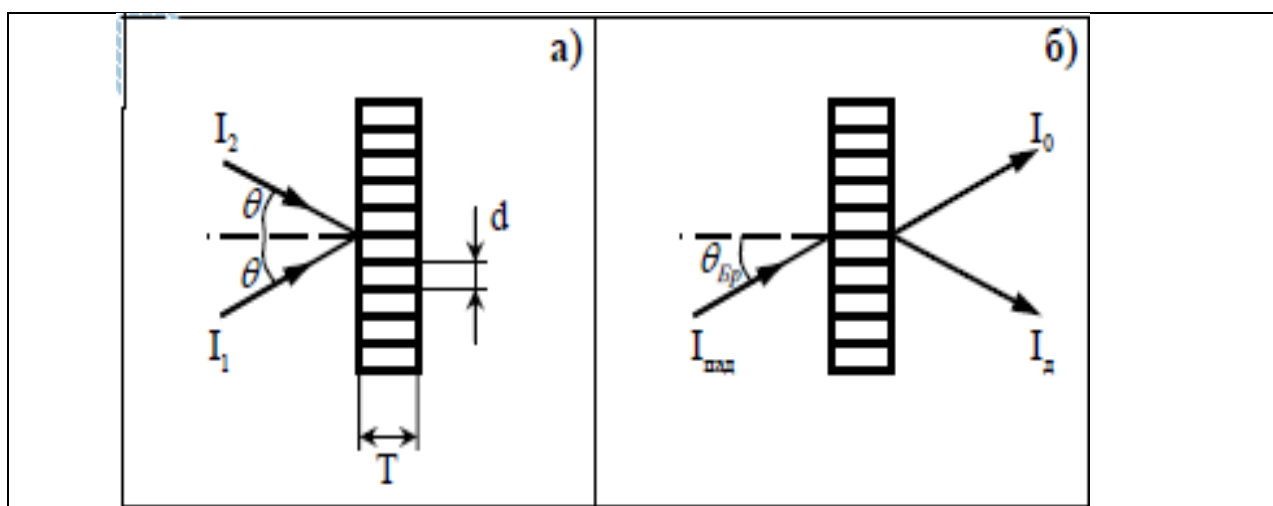


Рис. 5 Схема записи (а) и считывания (б) элементарной пропускающей голограммы. Запись проведена по симметричной схеме. Условия считывания указаны для трехмерной голограммы – единственный дифракционный порядок.

При освещении пропускающей голограммы дифрагированная волна наблюдается в проходящем свете.

Ориентация интерферирующих волн (I_1 и I_2) относительно РС показана на рис. 5а, где θ - угол падения излучения на РС, T - толщина РС, d - расстояние между двумя соседними максимумами интенсивности в регистрируемой ИК.

На рис. 5б показано направление распространения волн при освещении трехмерной пропускающей голограммы в условиях Брэгга, где $\theta = \theta_{Бр}$, $I_{Бр}$ - падающая, или восстанавливающая волна, $I_{д}$ - дифрагированная, или восстановленная волна, I_0 - волна нулевого порядка дифракции, прошедшая голограмму без изменения направления.

Отражательная голограмма регистрируется, когда интерферирующие пучки падают на РС с разных сторон

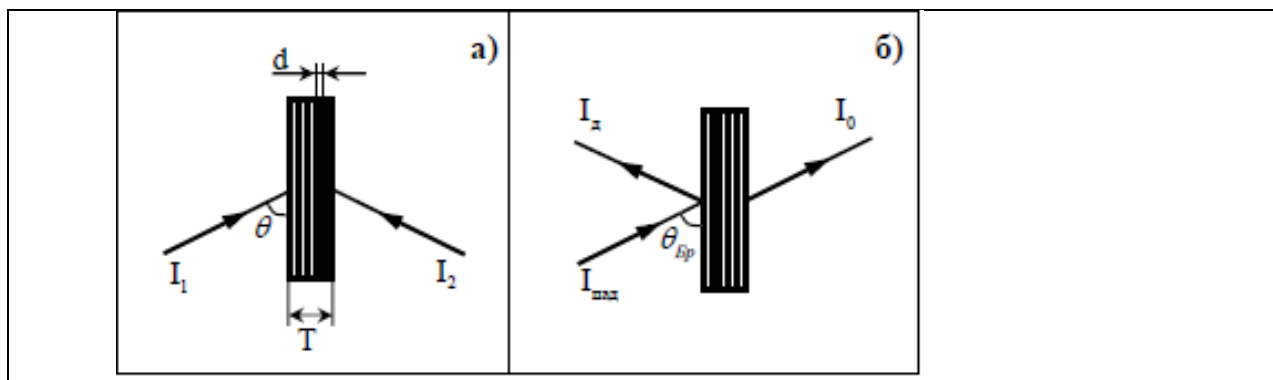


Рис. 6 Схема записи (а) и считывания (б) элементарной отражательной голограммы. Запись проведена по симметричной схеме. Условия считывания указаны для трехмерной голограммы – единственный дифракционный порядок

При освещении отражательной голограммы дифрагированная волна наблюдается в отраженном свете.

На рис. 6а показана ориентация интерферирующих волн I_1 и I_2 относительно РС, где $(\pi/2 - \theta)$ - угол падения излучения на РС, T - толщина РС, d - расстояние между двумя соседними максимумами интенсивности в регистрируемой ИК.

На рис. 6б показано расположение волн при освещении отражательной голограммы, где $\theta = \theta_{Бр}$, $I_{пад}$ - падающая, или восстанавливающая волна; $I_{д}$ - дифрагированная, или восстановленная волна; I_0 - волна нулевого порядка дифракции.

Отражательные голограммы широко применяются в изобразительной голографии, т.к. проявляют объемные свойства при регистрации на традиционных фотоматериалах толщиной 10-15 мкм, что позволяет для восстановления объектной волны использовать источники со сплошным спектром излучения (стандартные лампы накаливания, Солнце) в силу их высокой спектральной селективности.

Зонная пластинка Френеля и голограмма, образованная плоской и сферической волнами

Для исследований изображений, полученных при помощи голографического метода, необходимо иметь достаточно простой объект, с помощью которого можно было бы моделировать ситуации с более сложными объектами.

В качестве такого объекта в оптике, и в голографии в том числе, принято рассматривать **точечный источник излучения (или рассеивающую точку) – объект, размерами которого можно пренебречь.**

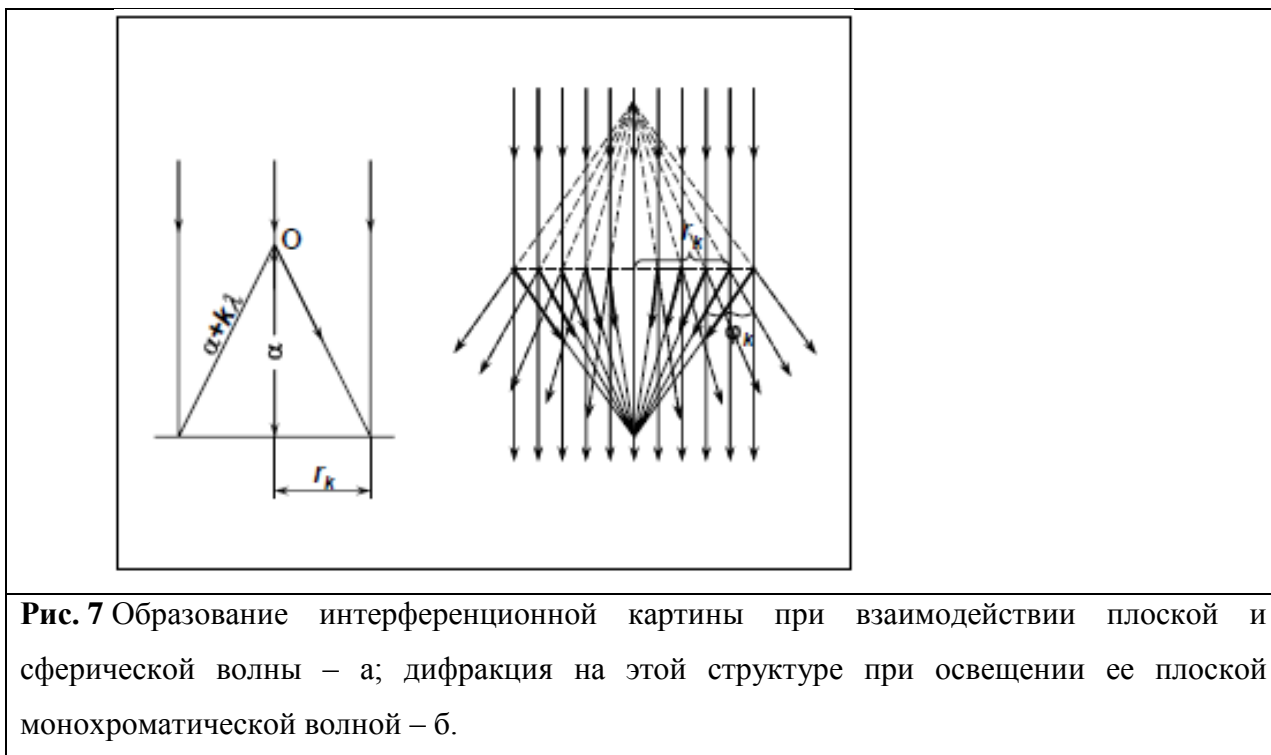


Рис. 7 Образование интерференционной картины при взаимодействии плоской и сферической волны – а; дифракция на этой структуре при освещении ее плоской монохроматической волной – б.

Полученная голограмма с зарегистрированной интерференционной картиной аналогична зонной пластинке Френеля

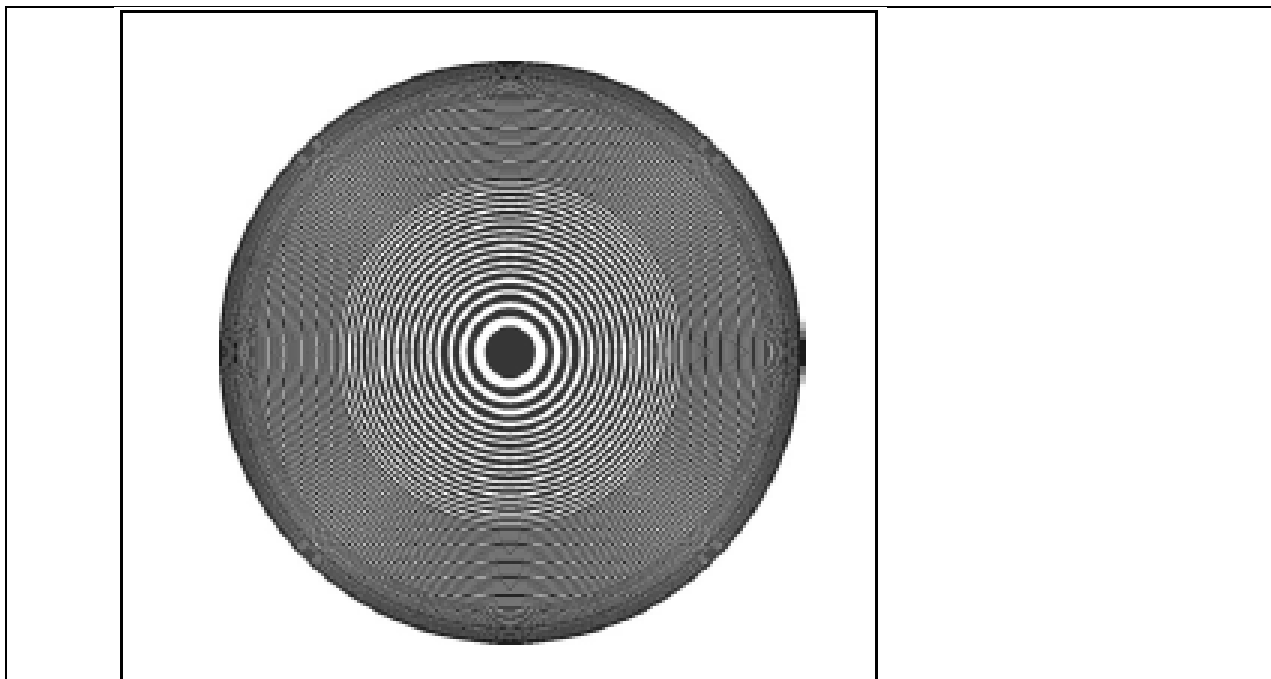


Рис. 8 Вид зонной пластинки Френеля, полученной при взаимодействии плоской и сферической когерентных монохроматических волн.

Брэгговские решетки

Брэгговские решетки - одномерные решетки, полученные в объемной среде, получившие широкое распространение в конце XX века, берут свое начало из исследований кристаллических решеток твердых тел с помощью рентгеновских лучей (рентгеноструктурный анализ).

Дифракция излучения на элементарной трехмерной голограмме суть дифракция на одномерной решетке в объемной среде.

В зависимости от ориентации интерференционных полос относительно границ среды такая решетка может быть либо пропускающей, либо отражательной

Дифракция света на плоской решетке

Условие максимума дифракции плоской волны:

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

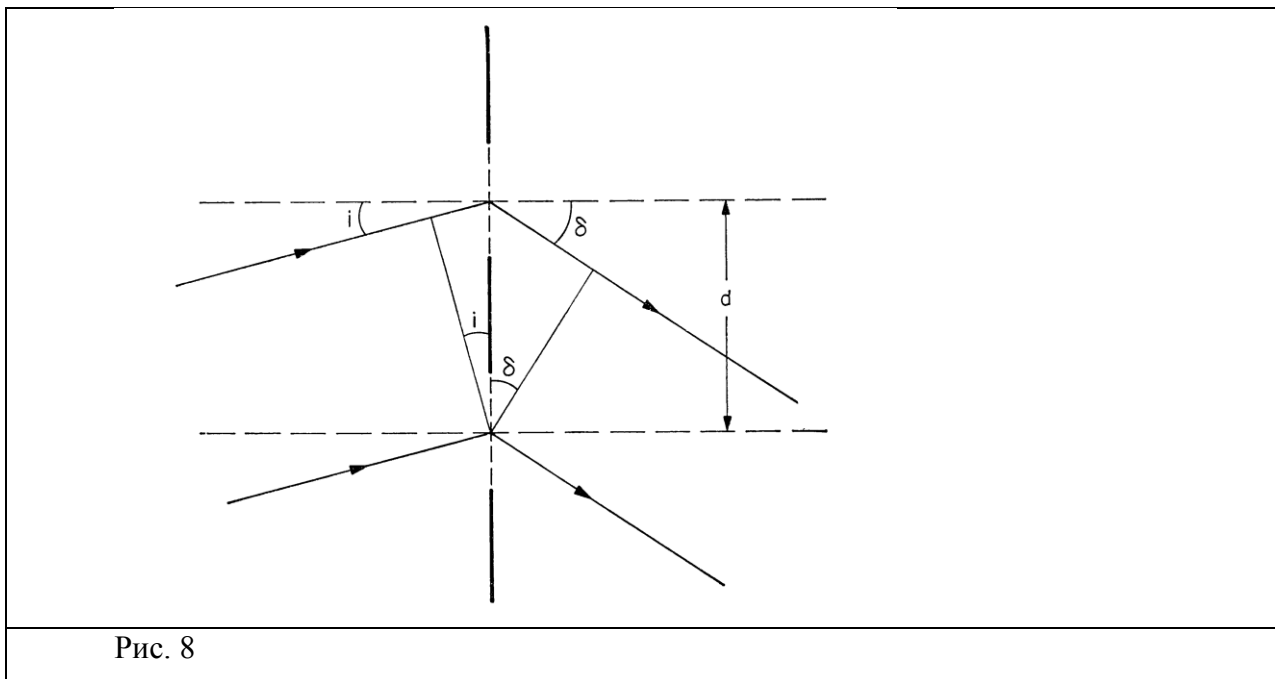


Рис. 8

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

Дифракция света на объемной решетке

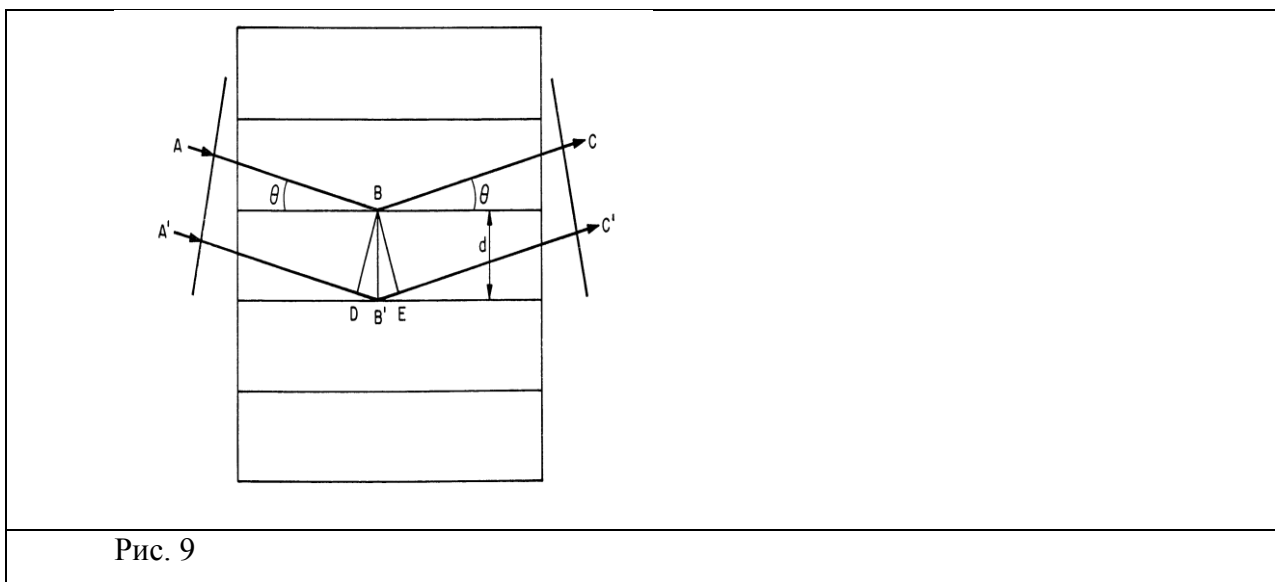


Рис. 9

Объемная дифракционная решетка содержит периодически расположенные рассеивающие плоскости, освещенные плоской волной.

Интенсивность имеет максимальную величину в том направлении, в котором происходит синфазное сложение световых волн, рассеянных последовательными плоскостями

Условие образования главного максимума дифрагированной плоской волны

$$DB' + B'E = 2d \sin \theta_{Br} = \lambda$$

Закон Брэгга по имени Уильяма Брэгга, получившего его для случая дифракции рентгеновских лучей от атомных плоскостей в кристалле.

Дифракция в кристалле обусловлена отражением падающей волны от кристаллических плоскостей. Максимум дифракции возникает, когда углы, образованные падающим и отраженным лучами с кристаллической плоскостью, равны θ_{Br} .

Условие Брегга накладывает более жесткие условия на наблюдение максимума дифракции, в сравнении со случаем плоской решетки. Для объемной решетки выбор угла падения определяет и длину волны и угол дифракции. Для плоских решеток допускается произвольный выбор и угла падения и длины волны.

Лекция 4

Основные характеристики объектов для голографирования. Индикатриса рассеяния диффузного объекта. Селективность элементарных голограмм. Влияние толщины на количество порядков.

Получение изображения объекта с помощью пропускающей голограммы: мнимое и действительное изображение; голограмма сфокусированного изображения; изображение – «фантом»; ассоциативный отклик голограммы.

Основные характеристики объектов для голографирования

Объект для голографирования, его форма и свойства поверхности являются определяющими для получения качественных голограмм различного типа.

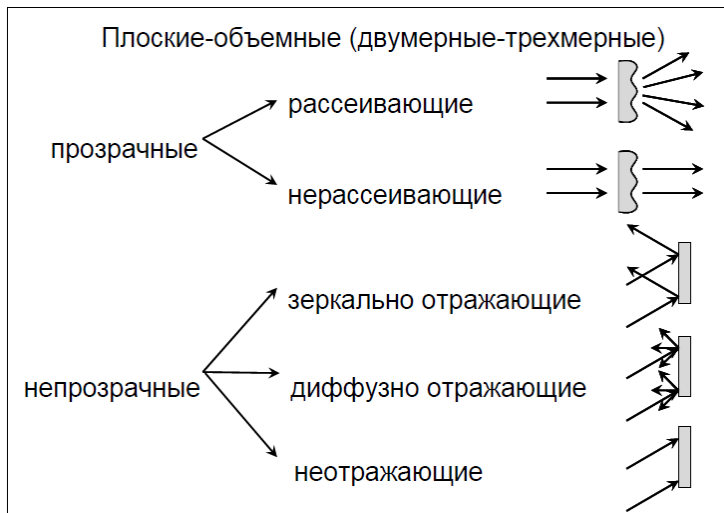
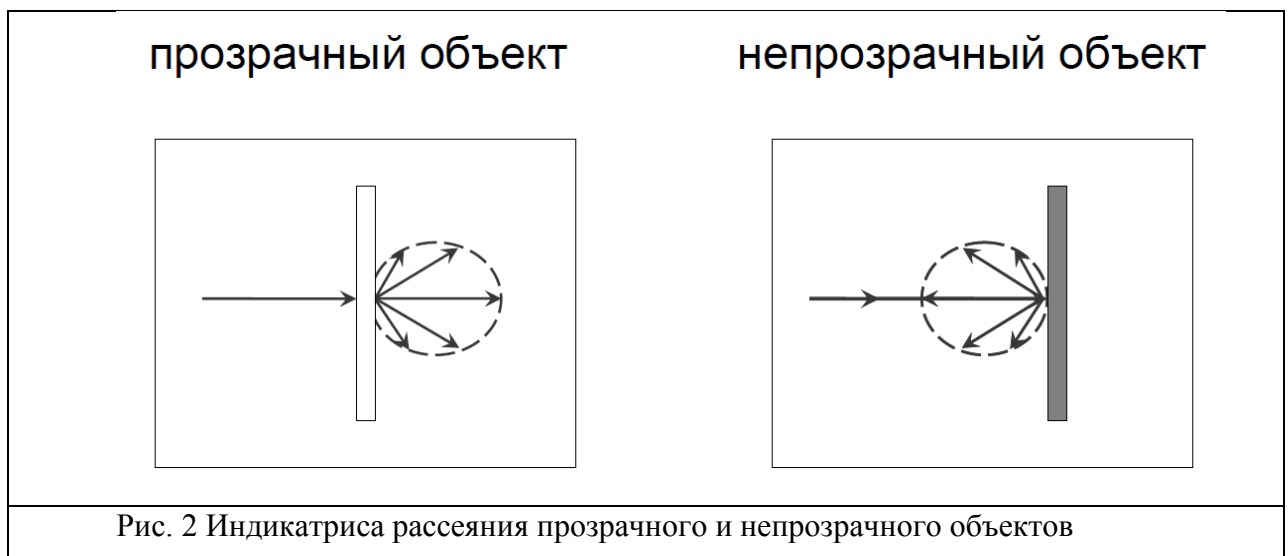


Рис. 1 Основные характеристики объектов для голографирования, которые определяют свойства объектной волны.

Объекты могут быть **точечными и конечных** размеров, что накладывает свои особенности в методы голографирования.

Очень важной характеристикой рассеивающего объекта для голографирования является его **индикатриса рассеяния** – зависимость интенсивности рассеянного света от направления наблюдения.



Диффузное рассеяние

Диффузное рассеяние – это распространение света по всем возможным направлениям (а также в соответствии с определенной индикатрисой рассеяния) при отражении или пропускании – диффузное рассеяние или диффузное пропускание.

Диффузор – оптический элемент, обеспечивающий диффузное пропускание или диффузное отражение падающего излучения независимо от его направления

Селективность элементарных голограмм

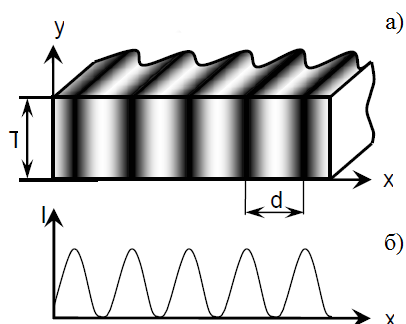


Рис. 3 Элементарная голограмма:

а - Одномерная решетка с периодом d , полученная в регистрирующей среде с толщиной T ,

б - распределение интенсивности излучения в интерференционной картине по оси x (в направлении вектора решетки, который коллинеарен оси x).

Селективность голограммы – свойство голограммы, связанное с уменьшением интенсивности дифрагированной (восстановленной) волны I_D при отклонении условий освещения голограммы от оптимальных, определяемых условием Вульфа-Брэггов

Различают два вида селективности:

- **спектральная селективность** голограммы, связанна с изменением длины волны восстанавливающего излучения;
- **угловая селективность**, обусловлена изменением пространственного спектра восстанавливающей волны.

Спектральная селективность элементарной голограммы количественно определяется как интервал длин волн $\Delta\lambda$ (частот), в котором интенсивность дифрагированной волны превосходит половину ее максимального значения (при этом голограмма должна освещаться плоской полихроматической волной).

Угловая селективность элементарной голограммы количественно определяется интервалом углов падения $\Delta\theta$ плоской монохроматической восстанавливающей волны на голограмму, в пределах которого интенсивность дифрагированной волны превышает половину ее максимального значения.

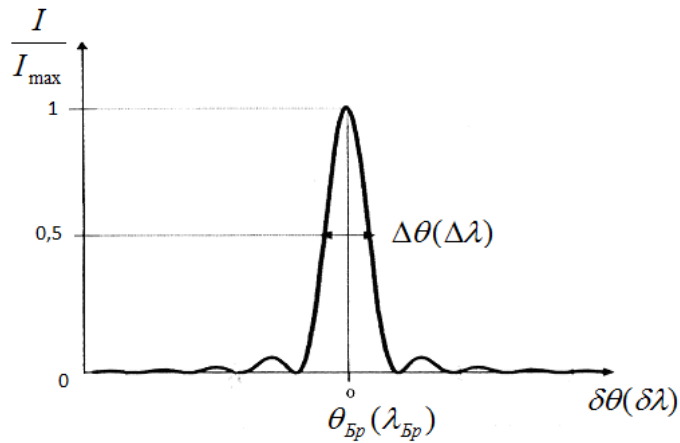


Рис. 4 Зависимость интенсивности дифрагированной волны I_D от угла поворота голограммы относительно падающего излучения $\delta\theta$ (от длины волны $\delta\lambda$)

$\Delta\theta$ - угловая селективность голограммы;

$\Delta\lambda$ - спектральная селективность голограммы.

Селективность голограммы зависит от пространственной частоты голограммы ν и толщины T

$$\Delta\theta, \Delta\lambda \propto T^{-1}, \text{ и } \Delta\theta, \Delta\lambda \propto f(\nu),$$

- $T \cdot \nu \rightarrow \infty$ (объёмная голограмма) селективность максимальна, т.е. $\Delta\theta, \Delta\lambda \rightarrow 0$;
- $T \cdot \nu \rightarrow 0$ (плоская голограмма) отсутствие селективности, т.е. $\Delta\theta, \Delta\lambda \rightarrow \infty$.

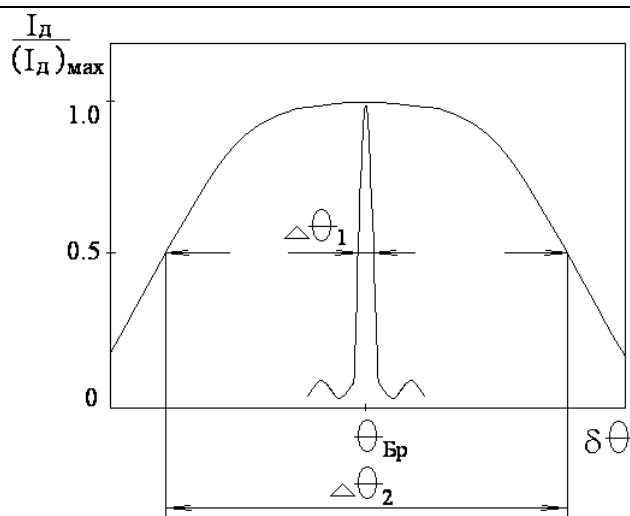
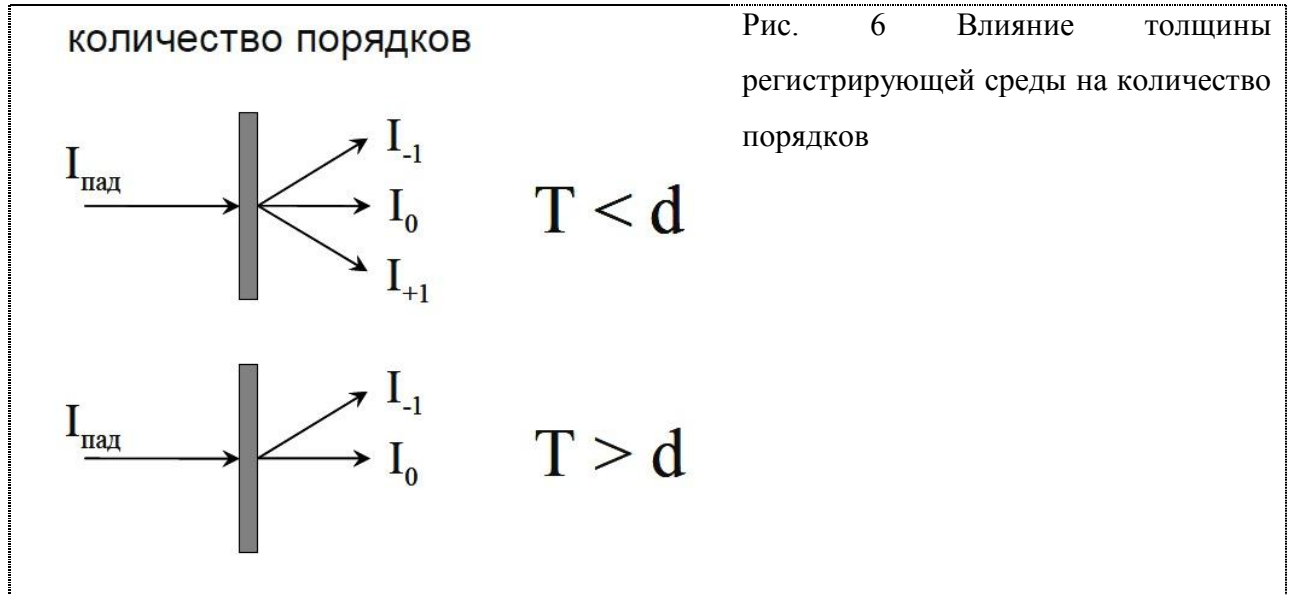


Рис. 5 Контурсы угловой селективности голограмм с различной толщиной и одинаковой пространственной частотой.

$$v_1 = v_2, \Delta\theta_1 < \Delta\theta_2, \text{ соответственно } T_1 > T_2.$$

Более высокой селективностью обладает голограмма №1 по сравнению с голограммой №2

Влияние толщины на количество порядков



Существует два порядка:

+ 1-й порядок формирует действительное изображение объекта, он существует при условии $T < d$ (2D голограмма);

- 1-й порядок формирует мнимое изображение объекта и не зависит от толщины РС.

Получение изображения объекта с помощью пропускающей голограммы: мнимое и действительное изображение

Голограмма пропускающая – голограмма, при регистрации которой объектная и опорная волны падают на регистрирующую среду (РС) с одной стороны.

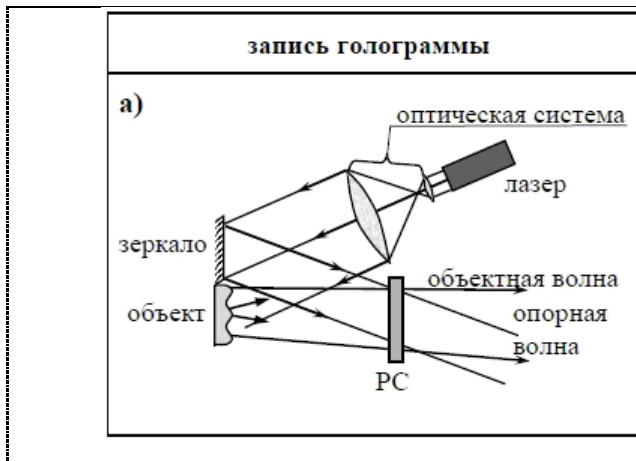


Рис. 7 Схема записи пропускающей голограммы непрозрачного объекта.

Часть лазерного пучка попадает на зеркало и образует опорный пучок, а другая часть падает на объект и при отражении от него образует объектную волну.

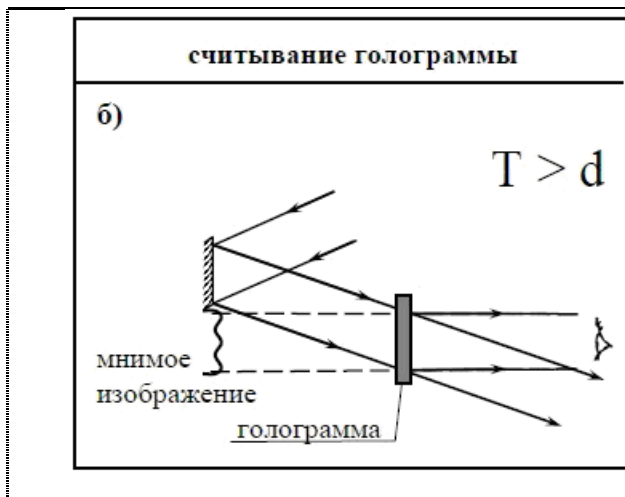


Рис. 8 Схема наблюдения изображения объекта с помощью восстановленной объектной волны при считывании трехмерной ($T \gg d$) голограммы. РС – регистрирующая среда.

Регистрирующая среда (РС) устанавливается в области наложения объектного и опорного пучков

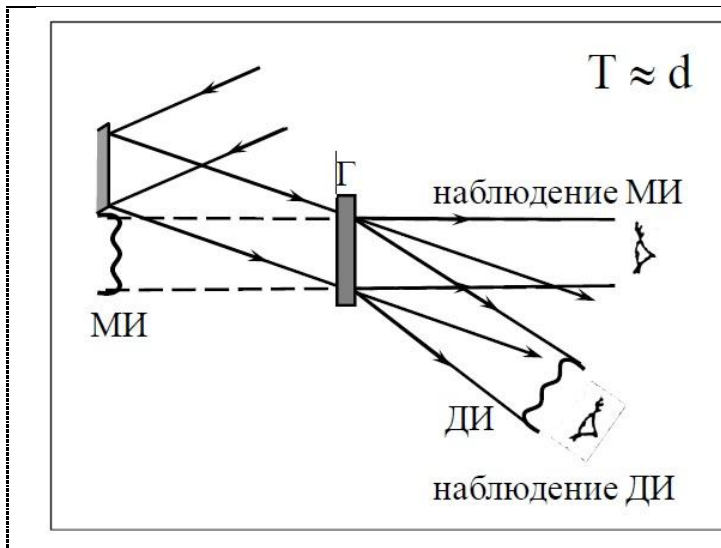


Рис. 9 Наблюдение изображения объекта при считывании двумерной голограммы ($T \sim d$).

МИ – мнимое изображение объекта; ДИ – действительное изображение объекта. Двумерная голограмма зарегистрирована в линейном режиме, что обеспечивает при ее считывании отсутствие высших порядков дифракции

Трехмерная голограмма при ее освещении (считывании) формирует один дифракционный порядок, представляющий собой восстановленную объектную волну, с помощью которой можно наблюдать **мнимое изображение объекта** (рис. 8).

При освещении **двумерной голограммы** наблюдается много порядков дифракции, из которых только два порядка можно использовать для наблюдения изображений объекта:

+1 -й порядок формирует действительное изображение (ДИ) объекта, которое сформировано самой голограммой;

-1 -й порядок формирует мнимое изображение (МИ) объекта, которое сформировано оптической системой, (например глаз) (см. рис. 9).

Определения

Оптическое изображение – картина, получаемая в результате прохождения через оптическую систему лучей, распространяющихся от объекта, и воспроизводящая его контуры и детали.

Основой зрительного восприятия предмета является его оптическое изображение, спроектированное на сетчатку глаза.

Действительное изображение (оптическое) – создается сходящимися пучками лучей в точках их пересечения.

Если в плоскости пересечения лучей поместить экран (фотопленку, регистрирующую среду любого типа), то можно на нем наблюдать действительное оптическое изображение.

При наблюдении действительного изображения объекта с помощью объектной волны, восстановленной голограммой, оно является **псевдоскопическим**.

Псевдоскопическое изображение

Распределение разности фаз на поверхности изображения объекта имеет отрицательный знак по отношению к распределению разности фаз на поверхности

объекта. Наблюдатель видит «необычное» изображение объекта, в котором, например, вместо выпуклостей – вогнутости, и наоборот.

Псевдоскопическое изображение можно наблюдать в голографическом эксперименте при обращении хода лучей через голограмму (явление обращения волнового фронта) и при наблюдении действительного изображения объекта, сформированного восстановленной голограммой волной.

Мнимое изображение (оптическое), формируется лучами, которые при выходе из оптической системы расходятся, но их можно мысленно продолжить в противоположную сторону и они соберутся в точках пересечения. Совокупность таких точек называют **мнимым изображением**, так как оно способно играть роль объекта по отношению к другой оптической системе (например, глазу), преобразующей его в действительное изображение.

Ортоскопическое изображение

При наблюдении мнимого изображения объекта при освещении голограммы оно является **ортоскопическим**.

Изображение, в котором распределение разности фаз на поверхности изображения объекта соответствует распределению разности фаз на поверхности самого объекта называется **ортоскопическим** изображением.

Наблюдатель при этом видит «обычное» изображение объекта .

Голограмма сфокусированного изображения

Голограмма сфокусированного изображения – голограмма, при регистрации которой изображение объекта (либо сам объект), проектируемое обычной оптической системой, располагается в плоскости регистрирующей среды или вблизи нее.

В такой голограмме объектная волна может быть образована не самим объектом, а его изображением, сформированным оптической системой.

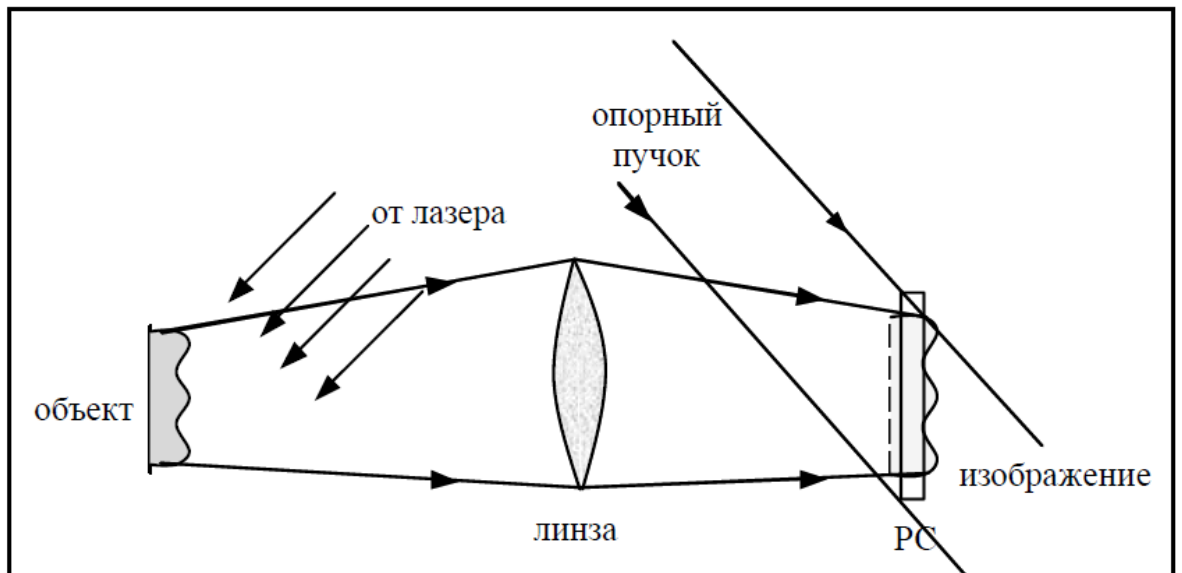


Рис. 10 Принципиальная схема регистрации голограммы сфокусированного изображения

При освещении такой голограммы центральная (или какая-либо другая) плоскость сечения трехмерного изображения объекта совпадает с плоскостью голограммы.

Особенности голограммы сфокусированного изображения:

- угол зрения, в пределах которого можно наблюдать изображение, ограничен апертурой оптической системы, используемой при регистрации голограммы (либо ограничен самой голограммой);
- схема регистрации позволяет снизить требования к размерам, пространственной когерентности и монохроматичности источника излучения при восстановлении объектной волны;
- использование данной схемы позволяет увеличить яркость изображения объекта, благодаря ограничению угла наблюдения.

Схемы регистрации голограмм сфокусированного изображения применяют в изобразительной голографии для создания различных зрелищных эффектов за счет того, что при освещении такой голограммы **изображение объекта может быть сформировано перед поверхностью голограммы – между наблюдателем и голограммой.**

Фантомное изображение объекта в голографии

Фантом – причудливое явление, призрак, привидение (словарь русского языка).

В голографии **фантомным изображением объекта** принято называть изображение, полученное с помощью волны, восстановленной голограммой при ее освещении излучением, сформированным другим объектом, который был использован при записи голограммы.

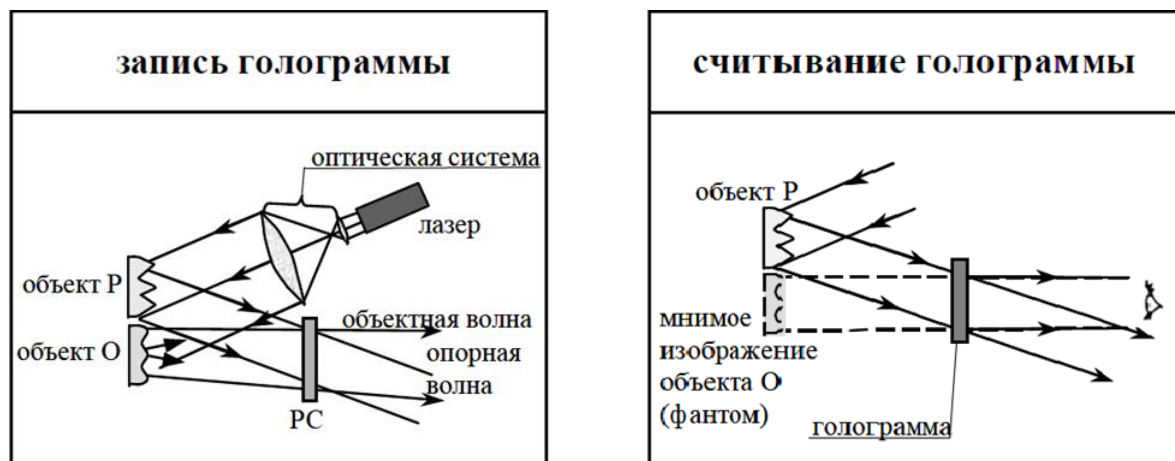


Рис. 11 Запись (а) и считывание (б) голограммы для получения фантомного изображения объекта «О» (изображение – фантом) при освещении голограммы излучением объекта «Р»

Ассоциативный отклик голограммы

Формирование восстановленной волны с помощью **ассоциативного отклика голограммы**

При считывании голограммы используется не опорная, а объектная волна. При этом восстановится использованная при записи опорная волна, появление которой можно детектировать с большой точностью, сфокусировав ее на приемнике излучения.

Если **при считывании голограммы используется только часть объектной волны**, то возникает так называемый **ассоциативный отклик** в форме появления части опорной волны, яркость которой зависит от размеров части объекта, излучением которой сформирована освещающая волна.

При предъявлении системе архивной памяти страницы или части страницы текста, который следует отыскать, такой отклик определяет путь поиска нужной информации.

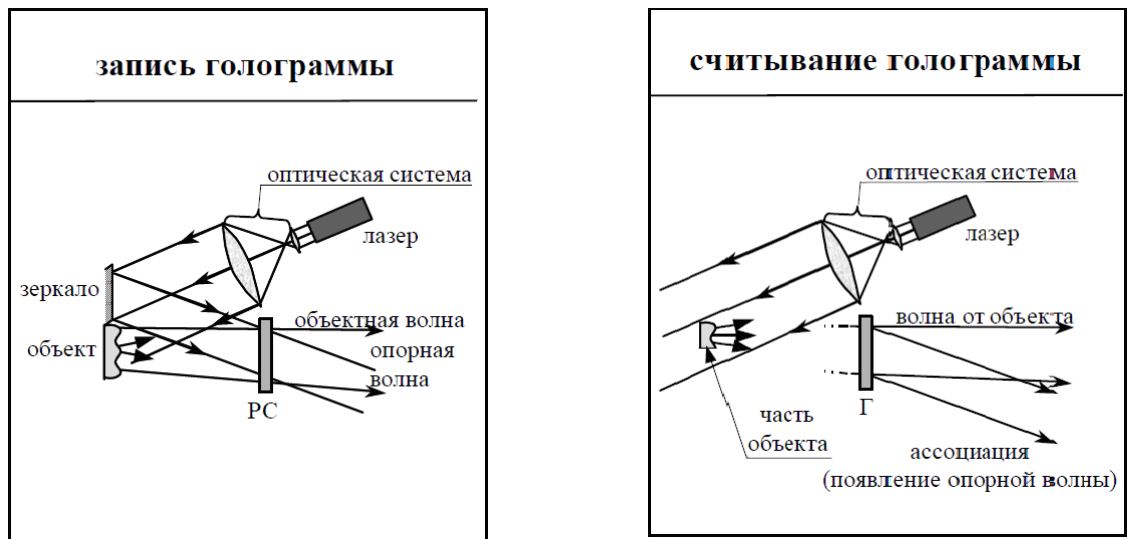
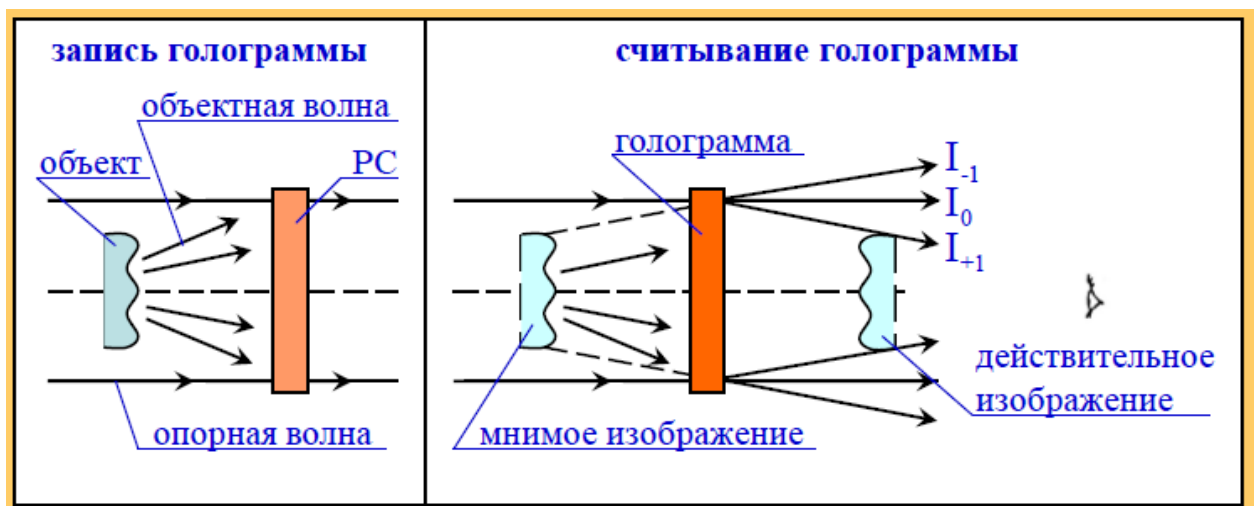


Рис. 12 Принципиальная схема, поясняющая суть ассоциативного отклика: а – запись голограммы; б – появление ассоциативного отклика при считывании голограммы частью объектной волны. РС – регистрирующая среда; Г – голограмма.

Лекция 5

Схема Габора и ее особенности. Схема Денисюка и ее особенности; возможные реализации схемы Денисюка. Схема Лейта и Упатниекса и ее особенности; схемы голографирования прозрачных объектов по Лейту и Упатниексу. Голограмма Бентона – радужная голограмма. Голограмма Френеля, Фраунгофера: схема Томпсона. Голограммы Фурье и их особенности: схема получения голограмм Фурье по Ван дер Люгту.

Схема Габора



К положительным особенностям схемы можно отнести:

- впервые реализована идея «восстановления волн»;
- низкая пространственная частота регистрируемой интерференционной картины.

К минусам схемы относятся:

- при освещении голограммы наблюдаются два изображения, накладываемые друг на друга;
- возможна регистрация только прозрачных объектов;
- необходимость использования монохромных источников излучения при считывании.

Объектная и референтная волны обладают волновым фронтом достаточно простой формы, что обеспечивается, например, использованием точечного источника света, который излучает монохроматическую сферическую волну.

В 1948 г. Д. Габор получил первую голографическую картину в проходящем свете.

В качестве объекта - «транспаранта» он использовал изображение, в котором были только прозрачные и непрозрачные места без плавных переходов оптической плотности. Сквозь прозрачные места проходил когерентный фон.

Источник света - ионный прибор, излучавший отдельные узкие спектральные линии.

Светофильтром выделялась требуемая линия излучения, и сконцентрированный пучок света направлялся через очень маленькое круглое отверстие. Получалась световая волна с достаточно высокой степенью когерентности.

Недостатком является то, что фильтрация заметно снижает интенсивность света и затрудняет проведение опытов.

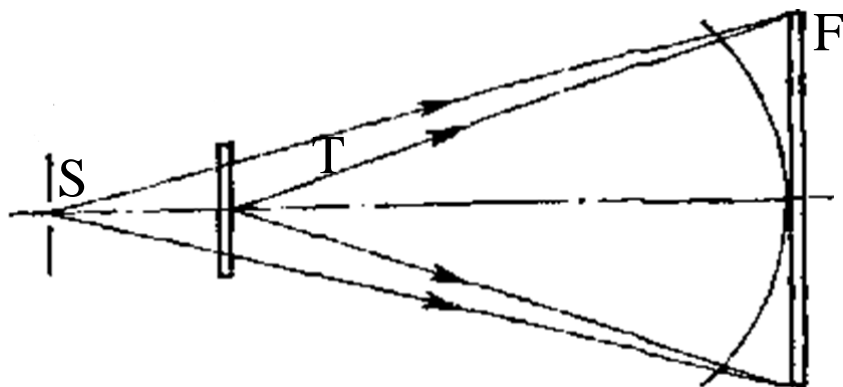


Рис. 2 Принципиальная схема записи голограмм Габора. S –источник когерентного излучения, T – транспарант с изображением объекта, F – фотографическая пластинка

После экспонирования фотопластинку проявляли и устанавливали на прежнее место, а предмет удаляли. Благодаря дифракции света на интерференционной структуре, зарегистрированной фотопластинкой, на месте предмета появлялось его мнимое изображение. Оно было очень слабым. Помимо этого изображения Габор наблюдал еще одно действительное изображение.

Фазу наблюдения изображения Габор назвал реконструкцией, поэтому весь метод называется реконструкцией волнового фронта.

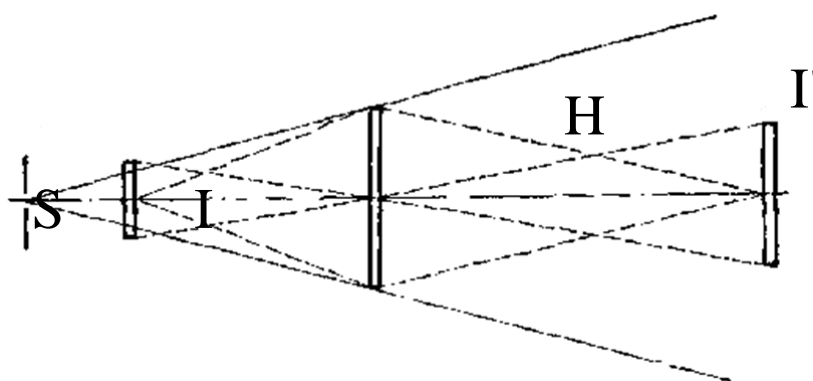


Рис. 3 Оптическая схема при реконструкции объекта. S-точечная диафрагма, I- изображение, H- голограмма, I' - сопряженное изображение

При разглядывании восстанавливающего голограмму источника сквозь голограмму будут видны:

- этот источник;
- мнимое изображение объекта – I;
- сопряженное действительное изображение объекта - I'.

Если наблюдатель сфокусирует глаз на мнимом изображении, то действительное изображение окажется расфокусированным.

Если поместить экран в той плоскости, где создается действительное изображение, на нем будет присутствовать паразитная засветка от расфокусированного мнимого изображения объекта.

Эти взаимные световые помехи от изображения двойника в направлении наблюдения являются основным недостатком осевых голограмм Д. Габор.

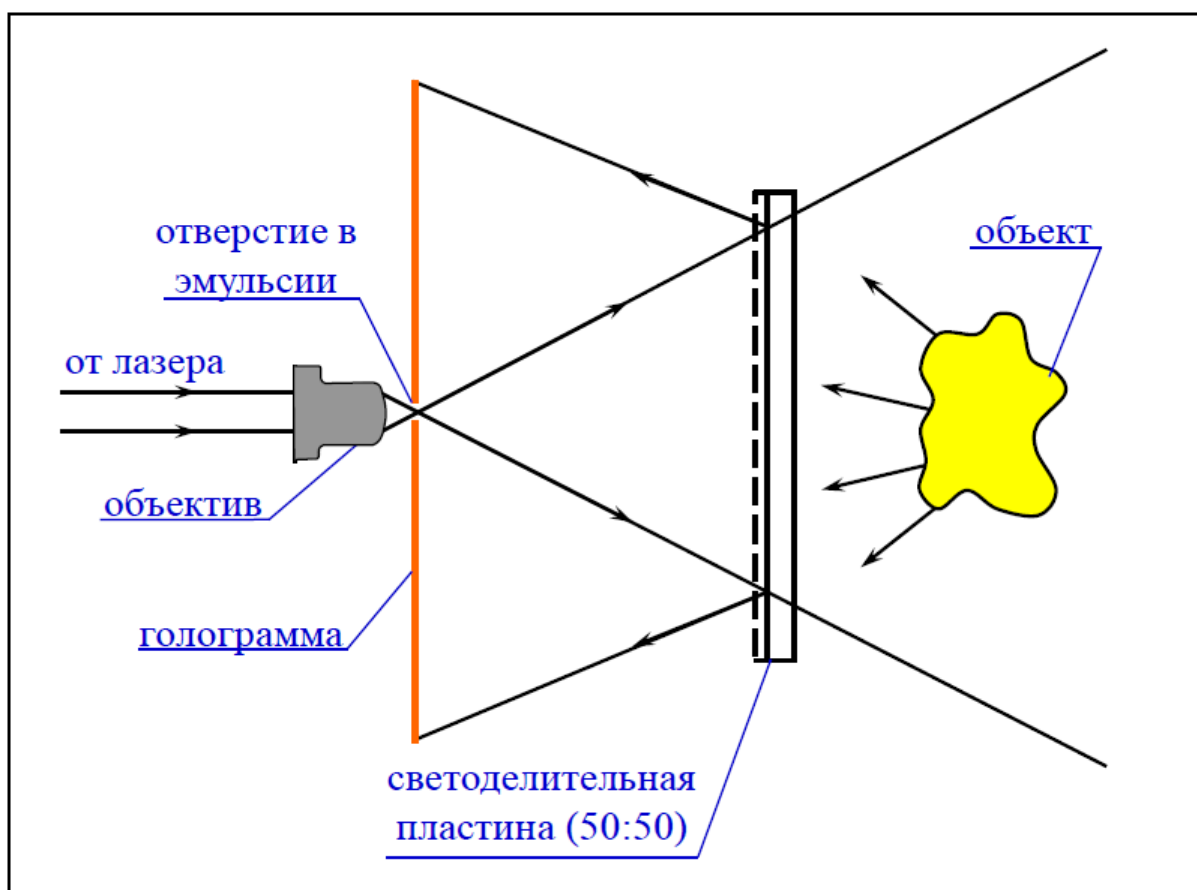


Рис. 4 Практическая реализация схемы Габора для получения голограмм непрозрачных рассеивающих объектов

Схема Денисюка и ее особенности

Голограмма Денисюка - отражательная трехмерная голограмма, впервые получена по однолучевой схеме Ю.Н. Денисюком в 1962г.

Голограмма Денисюка полученная на прозрачных галоидосеребряных фотоматериалах с использованием в качестве источника излучения ртутной лампы, явилась экспериментальным обоснованием метода Денисюка - записи в трехмерной среде голограмм, способных восстанавливать амплитуду, фазу и спектральный состав объектной волны.

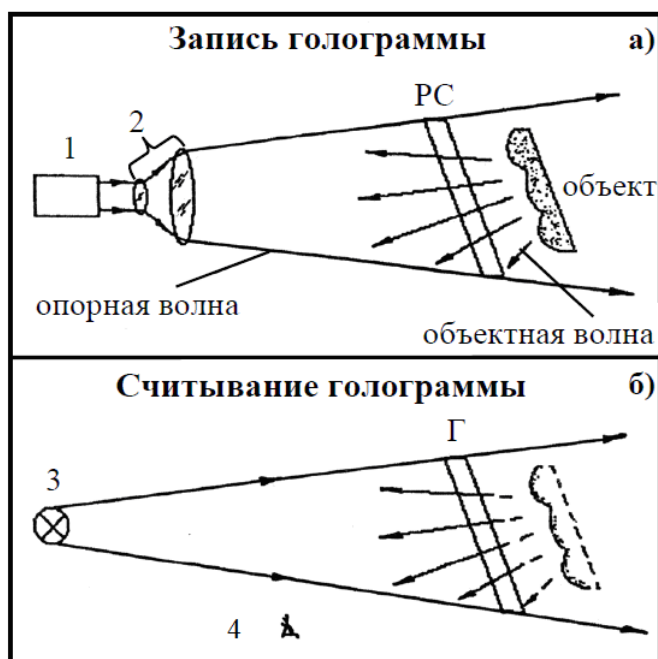


Рис. 5 Схема записи (а) и считывания (б) голограммы Денисюка,
 1 – лазер,
 2 – оптическая система,
 3 – лампа накаливания,
 4 - наблюдатель
 РС – регистрирующая среда,
 Г – голограмма.

При регистрации голограммы Денисюка (рис. 5 а), излучение когерентного источника (1) формируется линзой или оптической системой (2) и падает на прозрачную регистрирующую среду (РС), являясь опорной волной, затем проходит через РС и отражается (рассеивается) объектом (О), создавая объектную волну. Объектная и опорная волны распространяются навстречу друг другу.

Наблюдение качественного изображения объекта в голограмме Денисюка возможно при освещении её источником излучения со сплошным спектром (рис. 5 б , лампа накаливания (3), наблюдатель (4)).

Пространственная частота голограммы Денисюка достигает максимально возможной для излучения данной длины волны λ величины примерно равной $2/\lambda$, поэтому голограммы Денисюка проявляют объемные свойства даже при использовании сравнительно тонкослойных РС (фотоматериалы толщиной менее 20 мкм).

Спектральная селективность голограммы величину 10-20 нм.

Для получения голограмм Денисюка используют прозрачные регистрирующие материалы с высоким разрешением (порядка 5000 мм^{-1}) и методы постэкспозиционной обработки, пригодные для получения фазовых либо амплитудно-фазовых голограмм.

Голограммы Денисюка широко используются для получения изобразительных голограмм и голограммных оптических элементов.

Плюсы:

- положила начало объемной голографии;

- позволяет восстановить амплитуду, фазу и спектральный состав объектной волны;
- позволяет наблюдать изображение объекта при освещении голограммы белым светом;
- нечувствительна к вибрациям элемента «объект - регистрирующая среда»;

Минусы:

- требует высокой разрешающей способности регистрирующей среды.

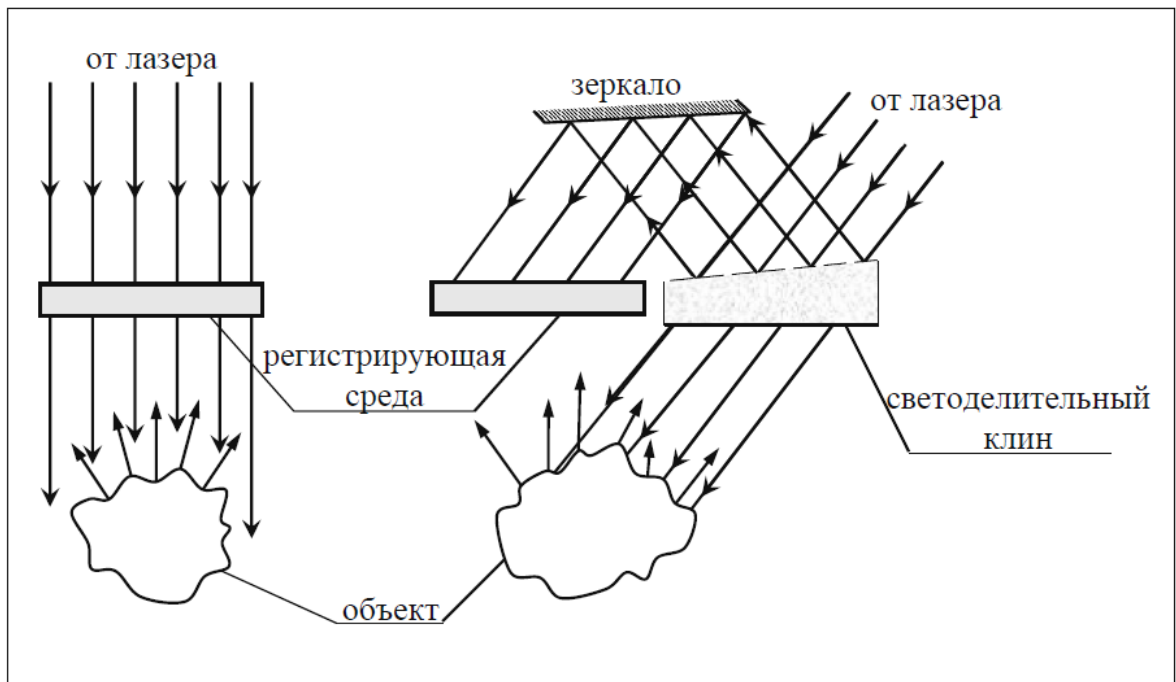


Рис. 6 Возможные практические реализации схемы Денисюка

Излучение падает на прозрачную регистрирующую среду (РС), являясь опорной волной, затем проходит через РС и отражается (рассеивается) объектом, создавая объектную волну. Объектная и опорная волны распространяются навстречу друг другу.

Излучение падает на светоделительный клин, который пропускает часть света в направлении объекта, а часть направляет к зеркалу. Отраженное от зеркала излучение падает на РС, являясь опорной волной. Отраженное (рассеянное) объектом излучение, являющееся объектной волной попадает на РС. Объектная и опорная волны распространяются навстречу друг другу.

Схема Лейта и Упатниекса

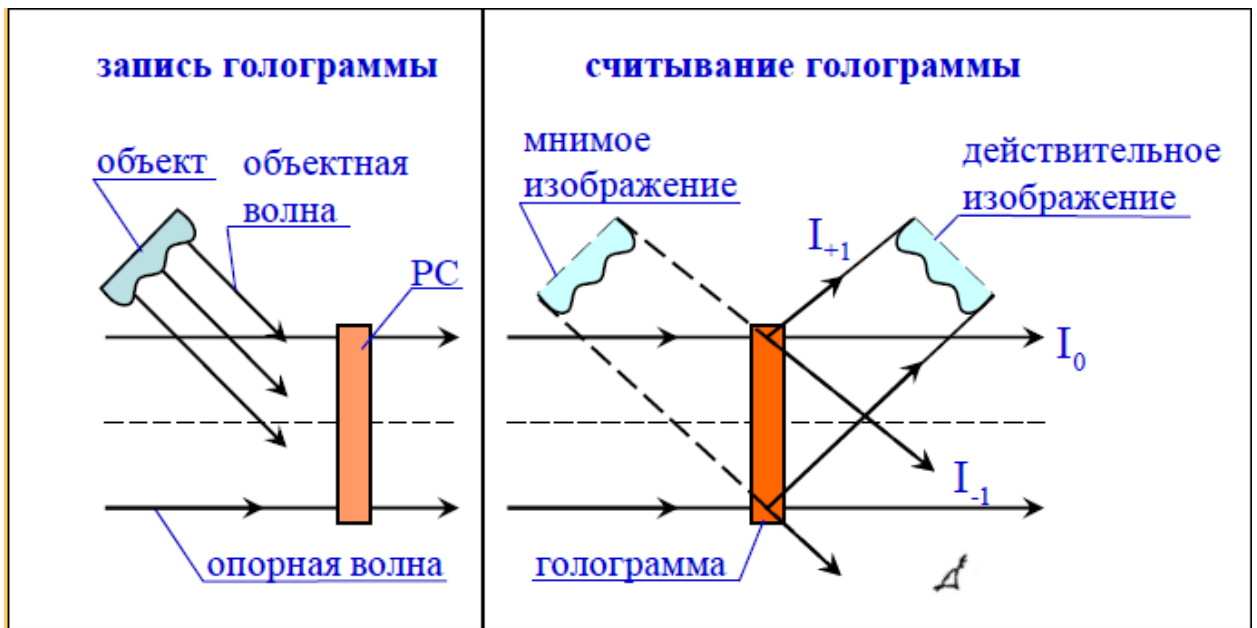


Рис. 7

Положительной стороной данной схемы является возможность наблюдения только одного изображения. К отрицательным относятся:

- использование монохроматических источников излучения при считывании;
- более высокая частота интерференционной картины.

Голограмма Лейта и Упатниекса - пропускающая **внеосевая голограмма** обеспечивающая, в отличие от схемы Габора, пространственное разделение восстановленной (дифрагированной) волны и волны, прошедшей через голограмму без дифракции.

Предложена Лейтом и Упатниексом (E.N. Leith, J. Upatnieks) в 1964 г.

На рис. 7 приведена типичная схема регистрации такой голограммы (рис.7а) и восстановления объектной волны (рис.7б). О – объект, РС – регистрирующая среда, Г – голограмма; I_0 , I_{+1} , I_{-1} – волны соответствующих порядков дифракции.

Рис. 8. Схемы голографирования прозрачных объектов по Лейту и Упатниексу

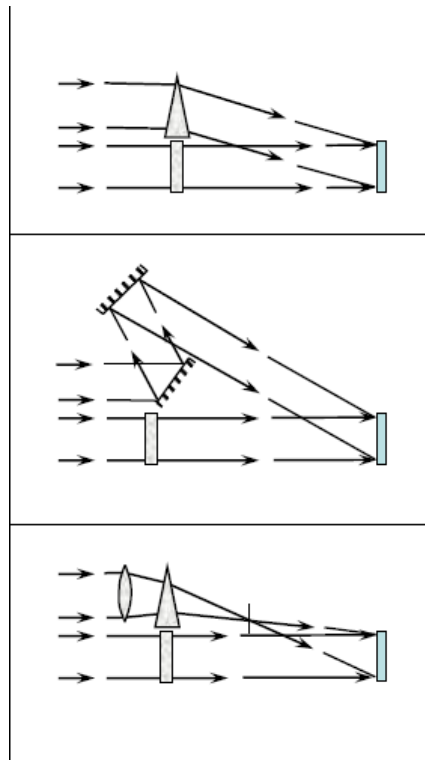


Рис. 9. Схема получения голограмм с двусторонним освещением объекта.

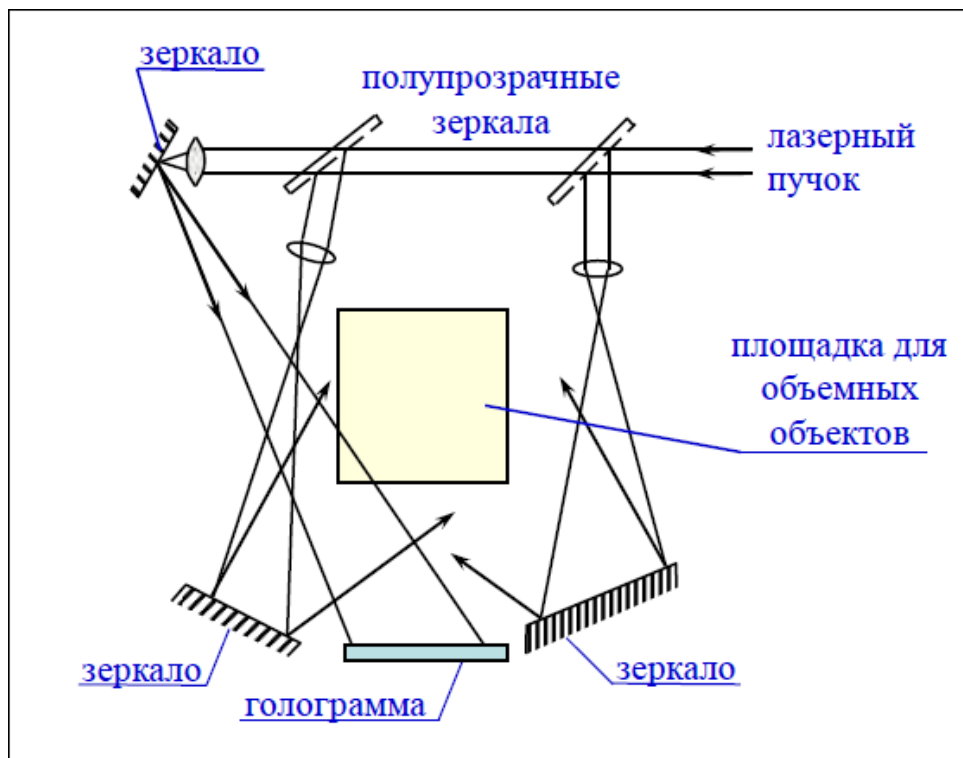
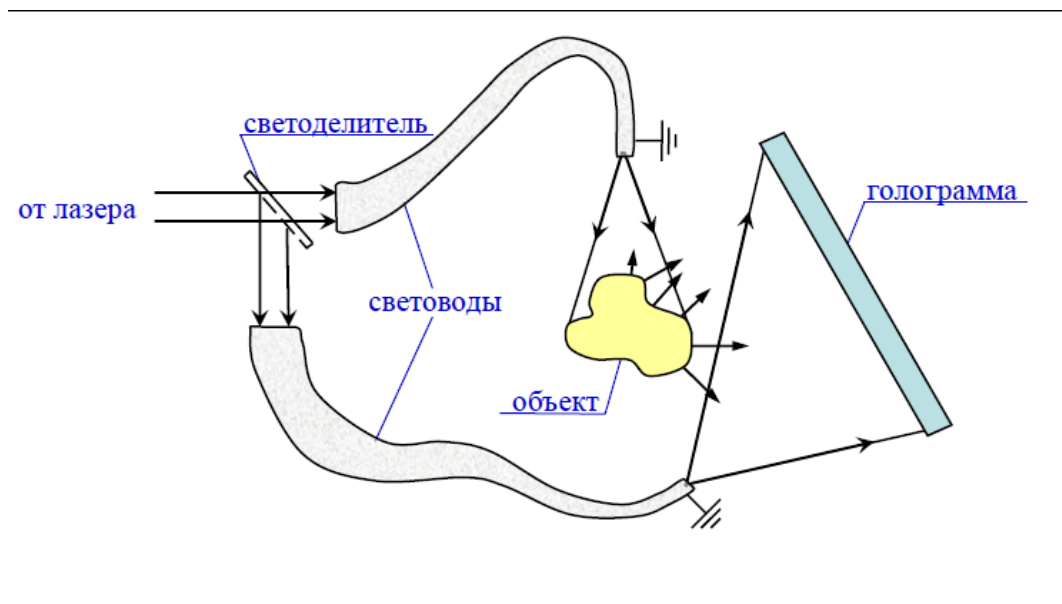


Рис. 10. Использование световодов



Голограмма Бентона

Голограмма Бентона (голограмма радужная) – голограмма сфокусированного изображения, допускающая восстановление объектной волны источником излучения со сплошным спектром (лампа накаливания, Солнце) за счет ограничения пространственного спектра объекта в одном (как правило, вертикальном) направлении.

Метод получения радужных голограмм был предложен С.А. Бентоном (S.A. Benton) в 1976г.

Радужные голограммы - это пропускающие двумерные голограммы, зарегистрированные на тонкослойных светочувствительных материалах (толщиной менее 20 мкм), допускающие восстановление белым светом. Восстановленное изображение объекта меняет цвет при изменении угла наблюдения.

Радужная голограмма позволяет наблюдать четкое цветное изображение объекта. Цвет изображения зависит от положения глаз наблюдателя и не связан с цветом объекта. Для регистрации радужных голограмм можно использовать светочувствительные материалы, образующие поверхностный рельеф (рельефографические материалы), что позволяет получать «защитные» радужные голограммы.

Двумерная голограмма (как и традиционная, плоская дифракционная решетка) при освещении белым светом восстановит изображение, размытое в спектр.

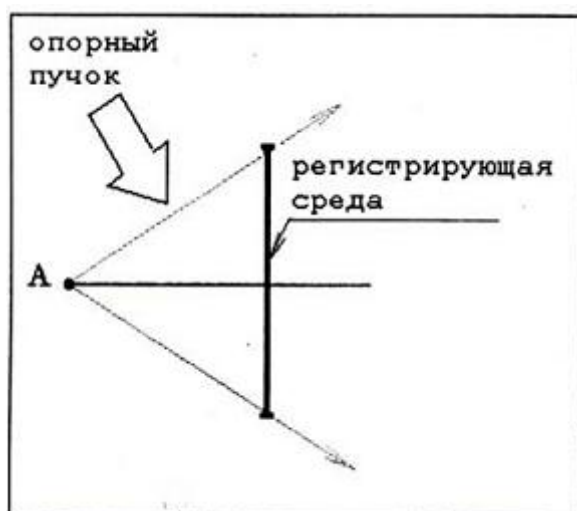


Рис. 11 Схема записи голограммы точечного источника монохроматического излучения «А» с использованием опорного пучка, наклонно падающего на РС в виде стандартной фотопластинки.

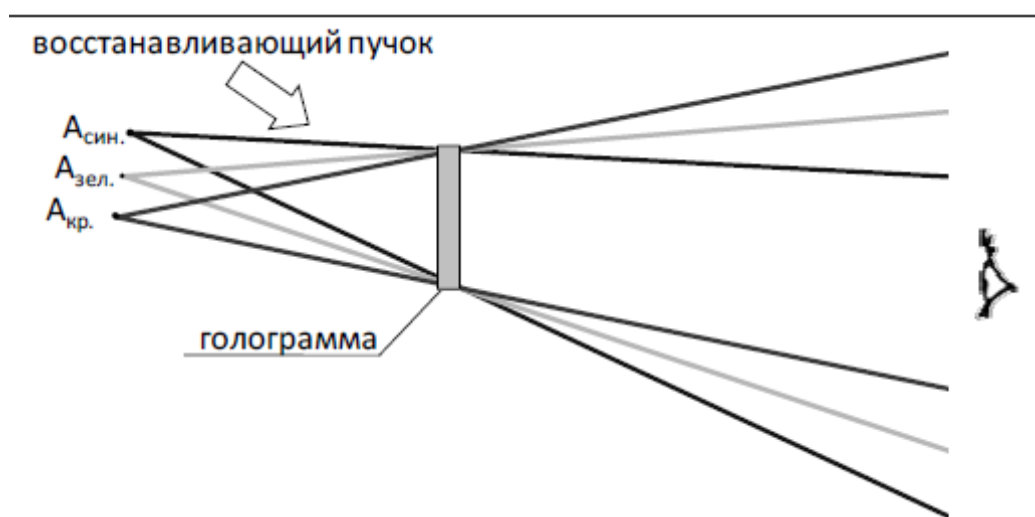


Рис. 12 Восстановление полученной голограммы белым светом. Вместо монохромного точечного источника А будет виден источник А, растянутый в спектр в вертикальном направлении, где A_C , A_3 , A_K – изображения точечного источника различных цветов.

Лучи разного цвета (красный, зеленый, синий), которые формируют изображения источника A_C , A_3 , A_K , попадая в глаз наблюдателя, восстанавливаются разными участками голограммы и наблюдатель видит размытое в спектр изображение источника А.

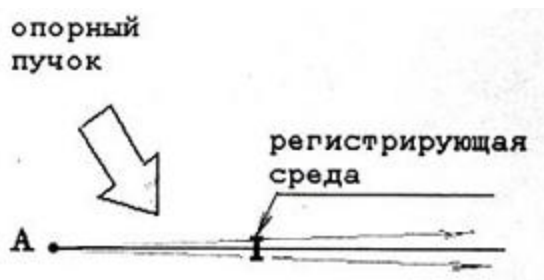


Рис. 13 Угловые размеры объектного пучка уменьшаются в вертикальном направлении. Размеры полученной голограммы также уменьшаться (она станет похожа на щель).

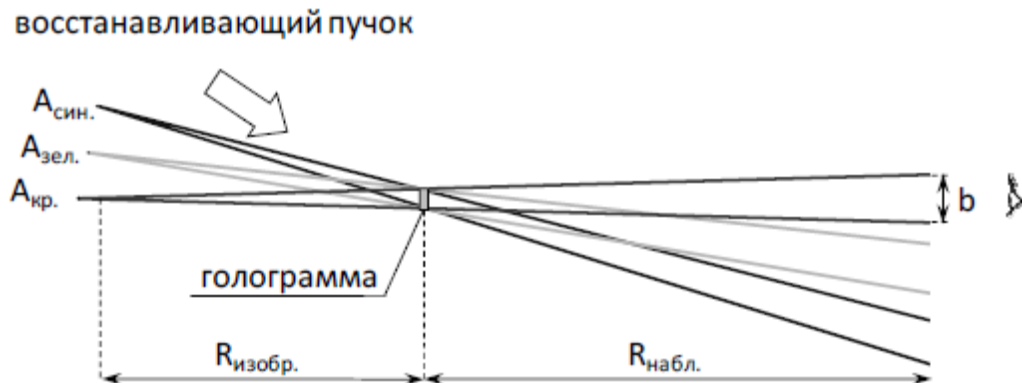


Рис. 13 Реконструкция белым светом.

Наблюдатель, глаза которого расположены в горизонтальной плоскости, видит не спектр, а окрашенное изображение точки, цвет которого зависит от положения глаза наблюдателя. В глаз наблюдателя попадут лучи, прошедшие через один и тот же участок голограммы - либо красный, либо зеленый, либо синий.

Качество наблюдаемого изображения при освещении радужной голограммы зависит от расстояния до голограммы наблюдателя R_H и изображения объекта $R_{И}$, а также от размера окна наблюдения – b , определяемого, например, размером голограммы.

Соотношение между этими параметрами определяется формулой:

$$b = \frac{R_H \lambda}{R_{И}}$$

На практике обычно используют:

$$b = (2-8) \text{ мм}, R_{И} = (2-3) \text{ см}, R_H = (30-50) \text{ см}.$$

Голограмма Френеля, Фраунгофера: схема Томпсона.

Голограмма Френеля – пропускающая голограмма, при регистрации которой РС находится в области дифракции Френеля рассеянного объектом излучения.

Чаще всего голограммы Френеля используется при записи голограмм трехмерных диффузно рассеивающих объектов в изобразительной голографии и при голографическом неразрушающем контроле изделий.

Голограмма Фраунгофера – пропускающая голограмма, при регистрации которой регистрирующая среда находится в области дифракции Фраунгофера рассеянного объектом излучения (объектной волны), а опорная волна является плоской. Схема записи голограмм Фраунгофера была предложена Б.Томпсоном в 1967 г. (она близка к схеме Габора) и оказалась очень удобной для наблюдения и исследования частиц малых размеров

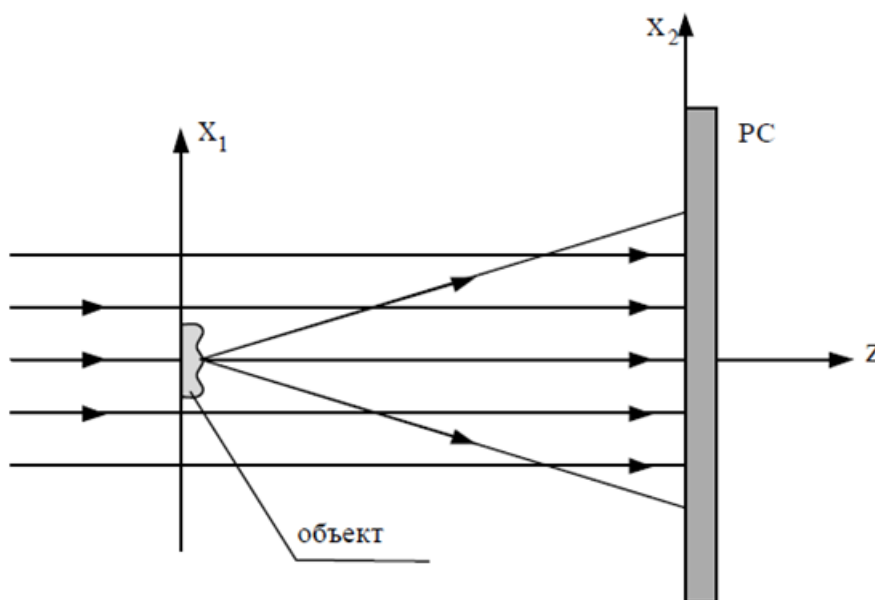


Рис. 14 Практическая реализация голограммы Фраунгофера при исследовании мелкодисперсного распределения частиц.

Объект освещается плоской волной, часть которой, прошедшая без дифракции, служит опорной волной. При восстановлении объектной волны также используется плоская волна.

Томпсоном разработал данный метод для исследования микроструктуры капель тумана. Луч от импульсного лазера падает на частицы вблизи фотографической пластинки. Дифрагированный свет от частиц интерферирует с недифрагированным светом, образуя голограмму.

Голограммы Фурье и их особенности: схема получения голограмм Фурье по Ван дер Люгту

Голограмма Фурье – пропускающая голограмма, полученная в результате взаимодействия двух когерентных волн, комплексные амплитуды которых в плоскости регистрирующей среды являются фурье-образами объекта и источника излучения, формирующего опорную волну.

Термин "**фурье-голограмма**" применяют и в тех случаях, когда распределение амплитуд объектной волны в плоскости регистрирующей среды соответствует произведению фурье-образа объекта на медленно меняющийся фазовый множитель. При этом опорный источник и объект должны располагаться строго в одной плоскости, перпендикулярной оси системы.

Регистрация **голограммы Фурье** возможна и без использования оптических систем – это соответствует **безлинзовой фурье-голограмме**.

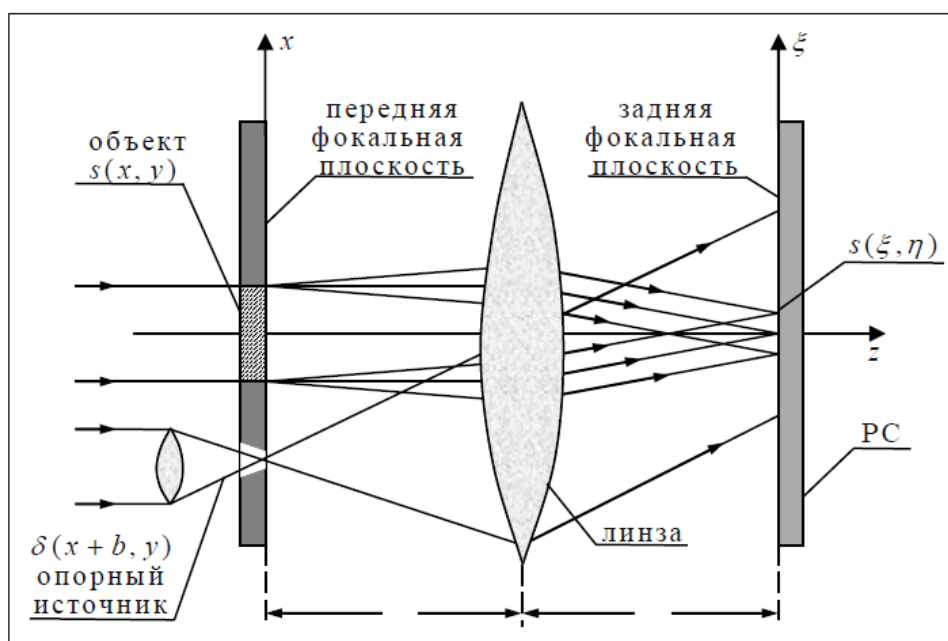


Рис. 15 Схема получения голограмм Фурье, предложенная Ван-дер-Люгтом

На схеме плоскость, в которой размещается пленка с изображениями объектов обозначена буквой x а плоскость в которой формируется голограмма – буквой ξ .

Плоскости x и ξ совпадают с фокальными плоскостями линзы. На плоскость x падает плоская волна когерентного света, создаваемая источником. От этого же источника в плоскости x с помощью линз Л1 формируется опорный источник, создающий опорную

волну. Опорный и предметный пучки собираются линзой. И в плоскости ξ создают интерференционную картину, которая регистрируется помещенной в этой плоскости РС.

Особенности схемы получения голограмм Фурье:

- для записи используются двумерные объекты (транспаранты), позволяющие производить строгое фурье-преобразование;
- обеспечивает нечувствительность положения изображения к поперечному смещению голограммы;
- обеспечивает максимальную плотность записи информации.
- голограммы Фурье применяются в качестве пространственных фильтров для распознавания образов.

Лекция 6

Различные типы голограмм. Деление голограмм по следующим характеристикам:

- в зависимости от схемы регистрации;
- в зависимости от соотношения между толщиной голограммы и ее периодом;
- в зависимости от оптического параметра среды, который промодулирован интерференционной картиной;
- в зависимости от характера изменения параметров регистрирующей среды при записи.

Статические и динамические голограммы: основные свойства, особенности и области применения: нестационарный энергообмен, коррекция формы волнового фронта.

Типы голограмм в зависимости от схемы регистрации, голограммы:

- Габора,
- Денисюка,
- Бентона,
- Френеля,
- Фраунгофера,
- Фурье,
- сфокусированного изображения.

Голограмма Габора - осевая пропускающая двумерная голограмма, при регистрации которой источник света, прозрачный объект (О) и регистрирующая среда (РС) расположены на общей прямой.

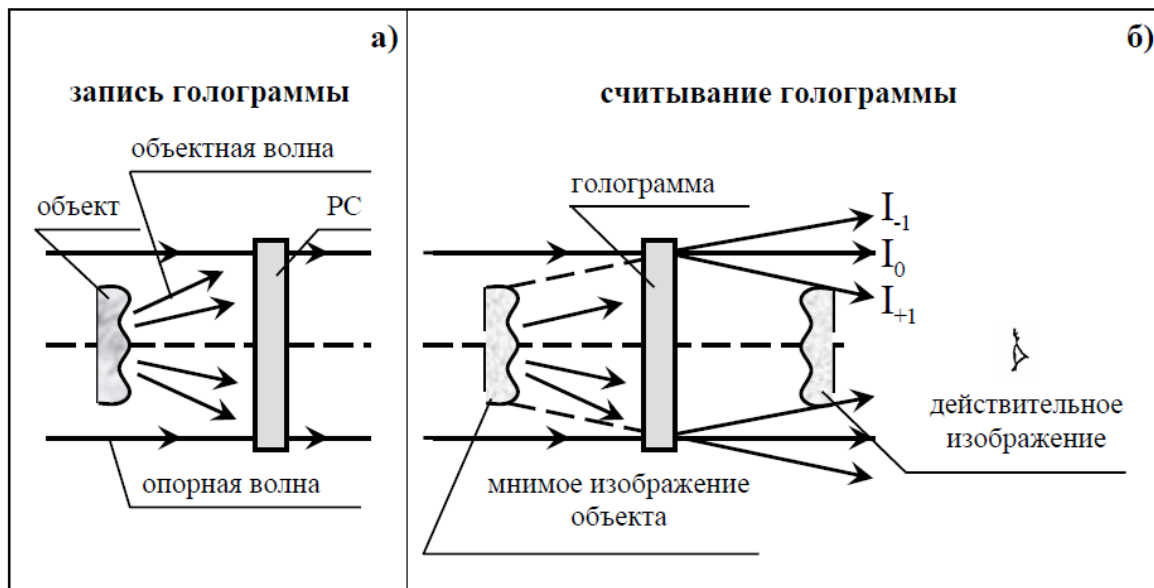


Рис. 1 Схема записи и считывания голограммы Габора

Излучение, рассеянное объектом, создает объектную волну, а опорная волна представляет собой часть излучения, прошедшую через объект без изменения направления.

Голограмма Денисюка - отражательная трехмерная голограмма, способ записи в трехмерной среде голограмм, способных восстанавливать амплитуду, фазу и спектральный состав объектной волны. При регистрации голограммы Денисюка объектная и опорная волны распространяются навстречу друг другу.

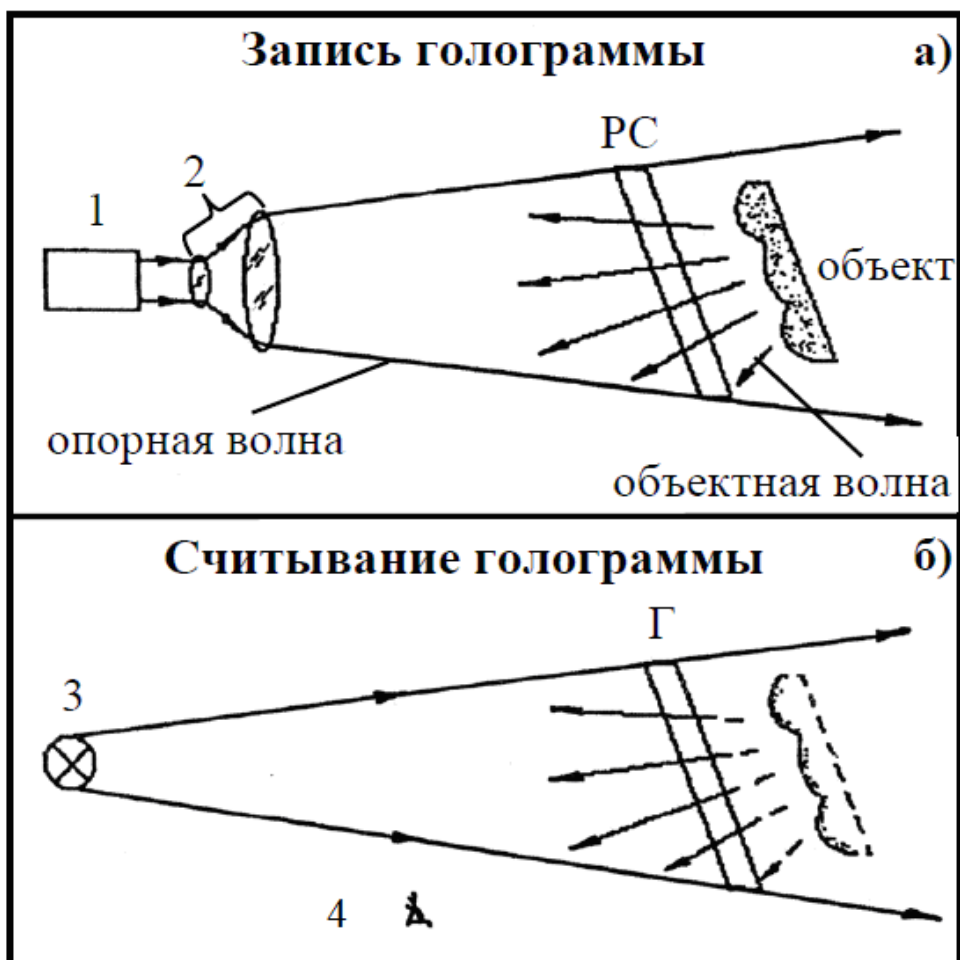


Рис. 2 Схема записи (а) и считывания (б) голограммы Денисюка

Голограмма Бентона – голограмма сфокусированного изображения, допускающая восстановление объектной волны источником излучения со сплошным спектром (лампа накаливания, Солнце) за счет ограничения пространственного спектра объекта в одном (как правило, вертикальном) направлении

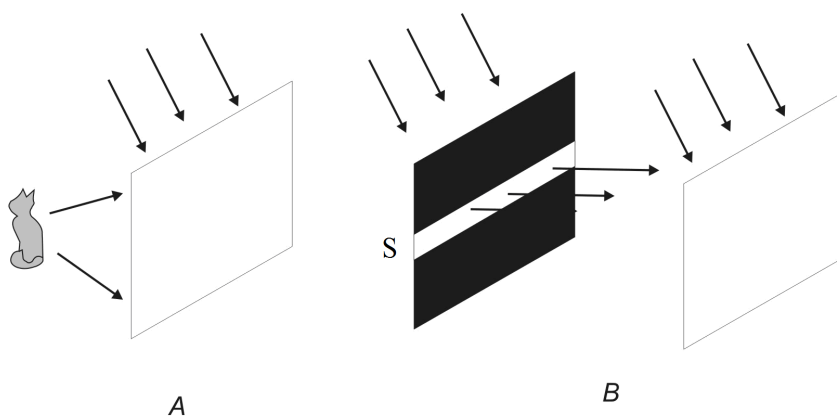


Рис. 3 Схема метода Бентона. На первом этапе (А) записывается голограмма Френеля. На

втором этапе (В) голограмму освещают расходящимся светом через цилиндрическую щель S и фоточувствительную среду одновременно экспонируют плоской опорной волной.

В результате получается голограмма, которая восстанавливает изображение только в плоскости щели. Глаза наблюдателя видят изображение, восстановленное светом определенной длины волны. При повороте голограммы в горизонтальном направлении объект можно рассматривать с разных сторон. При повороте голограммы в вертикальном направлении изменяются условия дифракции, и в глаза наблюдателя попадает свет с другой длиной волны, т.е. последовательно меняется цвет изображения, и поэтому такие голограммы называют радужными.

Голограмма Френеля (Э.Лейт и Ю.Упатниекс) - пропускающая голограмма, при регистрации которой регистрирующая среда находится в области дифракции Френеля рассеянного объектом излучения

Объект освещается отдельным когерентным пучком света. Свет, рассеянный объектом, интерферирует на фотопластинке с опорной волной. Совокупность точек объекта, рассеивающих свет, это совокупность точечных объектов, излучающих сферические волны. На фотопластинке регистрируется беспорядочное распределение светлых и темных областей, которое является результатом сложения индивидуальных зонных решеток.

При восстановлении волны все эти зонные решётки интерферируют независимо: каждая восстанавливает свою точку предмета на том самом месте, где она была при записи голограммы. Если точка более яркая, то соответствующая ей решётка будет более контрастной и при восстановлении она даёт более яркую точку изображения

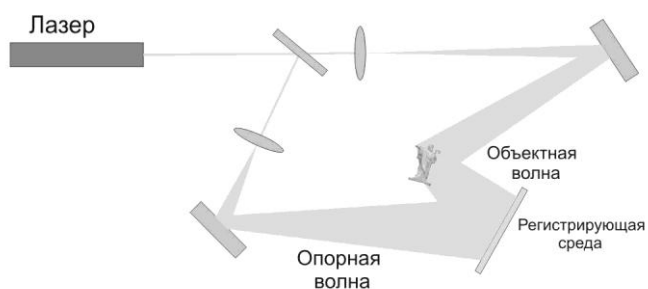


Рис. 4 Схема записи голограммы Френеля

Голограмма Фраунгофера – пропускающая голограмма, при регистрации которой регистрирующая среда находится в области дифракции Фраунгофера рассеянного объектом излучения (объектной волны), а опорная волна является плоской.

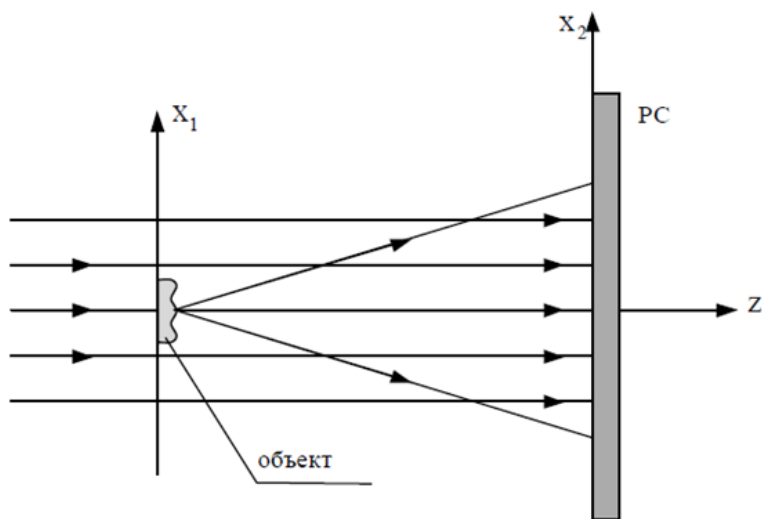


Рис. 5 Объект освещается плоской волной, часть которой, прошедшая без дифракции, служит опорной волной. При восстановлении объектной волны также используется плоская волна

Голограмма Фурье – пропускающая голограмма, полученная в результате взаимодействия двух когерентных волн, комплексные амплитуды которых в плоскости регистрирующей среды являются фурье-образами объекта и источника излучения, формирующего опорную волну.

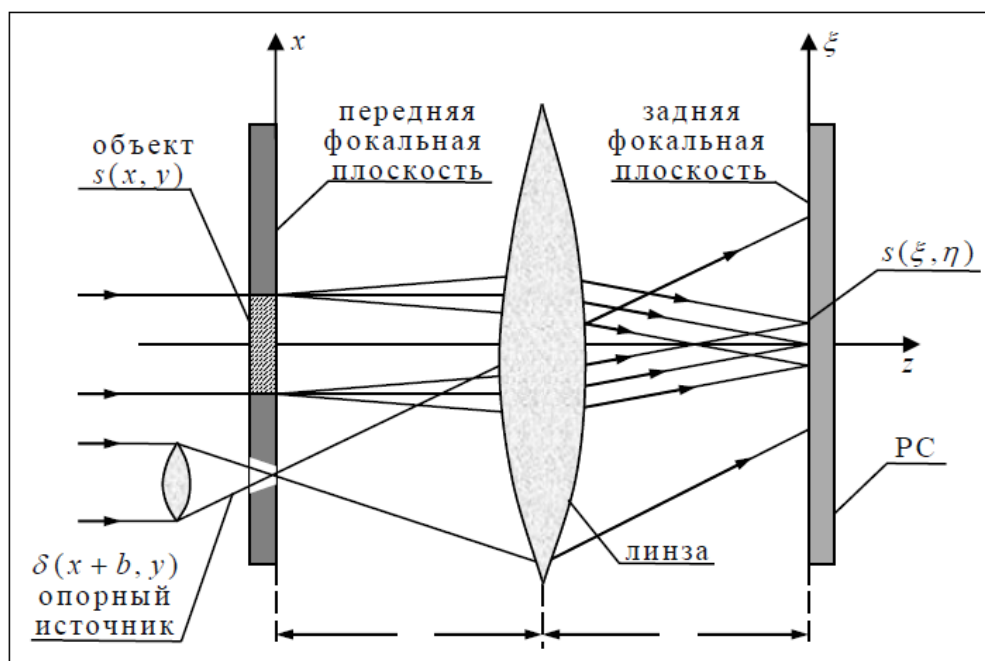


Рис. 6 Схема получения голограмм Фурье, предложенная Ван-дер-Люгтом

Для записи фурье-голограммы формируется фурье-образ объекта. Для этого используется линза, которая осуществляет фурье-преобразование падающей на неё световой волны.

Оптическое фурье-преобразование основано на том, что произвольная световая волна, распространяющаяся в свободном пространстве, может быть представлена в виде суперпозиции плоских волн, каждая из которых характеризуется своей пространственной частотой и комплексной амплитудой.

Плоская волна, направление распространения которой составляет углы α , β , γ относительно осей x , y , z декартовой системы координат, имеет следующие пространственные частоты относительно этих осей

$$f_x = \frac{\cos \alpha}{\lambda}, f_y = \frac{\cos \beta}{\lambda}, f_z = \frac{\cos \gamma}{\lambda},$$

где λ - длина волны света.

Пространственная частота показывает насколько быстро изменяется фаза волны при изменении координат.

Голограмма сфокусированного изображения – голограмма, при регистрации которой изображение объекта (либо сам объект), проектируемое обычно оптической системой, располагается в плоскости регистрирующей среды или вблизи нее.

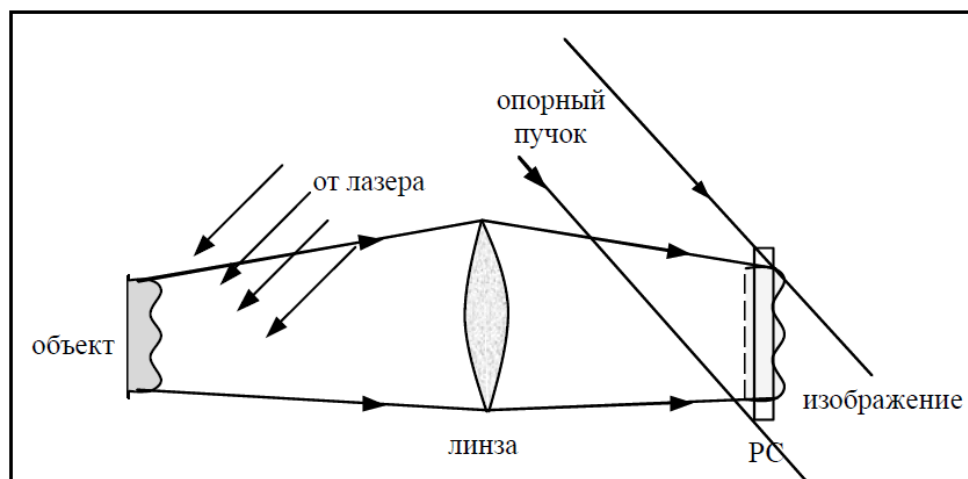


Рис.7 Принципиальная схема регистрации голограммы сфокусированного изображения

Типы голограмм в зависимости от соотношения между толщиной голограммы и ее периодом:

- **двумерные (плоские) голограммы,**
- **трехмерные (объемные).**

Меру объемности голограммы определяет соотношение между пространственной частотой (ν) и толщиной (T) :

- двумерная голограмма – $T\nu \rightarrow 0$;
- трехмерной голограмма – $T\nu \rightarrow \infty$.

Основные свойства 2D голограммы

1. можно пренебречь эффектами, связанными с конечной толщиной РС;
2. при освещении образуются три волны +1, 0, -1 порядков дифракции, которые формируют действительное ($k = +1$) и мнимое ($k = -1$) изображение объекта;
3. при восстановлении существует возможность изменения масштабов в изображении объекта;
4. при регистрации возможны линейный, либо нелинейный режим записи ИК;

5. двумерные голограммы-решетки принципиально не отличаются от нарезных дифракционных решеток, но позволяют получать только три дифракционных порядка (+1, 0, -1).

Основные свойства 3D голограммы

1. толщина голограммы намного превышает пространственный период изменения ее оптических параметров;
2. при освещении голограмма формирует только два -1 и 0 - й дифракционные порядки;
3. обладает угловой и спектральной селективностью, что обеспечивает возможность воспроизведения в дифрагированной волне амплитуды, фазы и спектрального состава объектной волны;

В зависимости от типа РС различают:

- тонкослойные трехмерные голограммы - статические трехмерные голограммы в средах толщиной порядка 10-20 мкм;
- объемные (глубокие, 3D) голограммы - статические трехмерные голограммы в средах толщиной порядка 1000 мкм и более;
- динамические трехмерные голограммы.

Типы голограмм в зависимости от оптического параметра среды, который промодулирован интерференционной картиной:

- амплитудная голограмма,
- фазовая голограмма.

Амплитудная голограмма - голограмма, полученная в РС, в которой под воздействием интерференционного поля произошли изменения коэффициента поглощения. Дифракция излучения на амплитудной голограмме обусловлена модуляцией (периодическим изменением) коэффициента поглощения среды.

Эффективность амплитудных голограмм, как правило, невысока и зависит от типа и характера записи голограммы.

Тип решетки	Двумерная амплитудная голограмма	Трехмерная амплитудная голограмма	
	Пропускающая	Пропускающая	Отражательная
Синусоидальная	6,25%	3,7%	7,2%
Прямоугольная	10%	25%	60%

Таблица 1. Приведены максимально достижимые значения дифракционной эффективности, вычисленные для элементарных амплитудных голограмм

Дифракционная эффективность - отношение потока излучения в дифрагированной волне данного порядка дифракции $(P_D)_n$ к падающему на голограмму потоку излучения $(P_{пад})$. Для характеристики голограмм, имеющих потери (на поглощение, рассеяние, отражение и т.д.), используют приведенные, или нормированные, значения ДЭ, определяемые как отношение $(P_D)_n$ к сумме потоков излучения всех порядков дифракции, включая нулевой. Для объемной голограммы, формирующей один дифракционный порядок имеем

$$ДЭ = \frac{(P_D)_1}{\{(P_D)_1 + (P_D)_0\}}$$

Эффект Бормана

Эффект просветления трехмерных амплитудных голограмм (эффект Бормана), заключается в том, что суммарная интенсивность волн, прошедших голограмму при ее освещении в условиях Брэгга, может существенно превышать интенсивность прошедшей через голограмму волны при ее освещении вне условий Брэгга, когда интенсивность дифрагированной волны можно считать равной нулю.

Эффект возникает за счет того, что существующие одновременно восстанавливающая и дифрагированная волны формируют стоячую волну, максимумы которой совпадают с минимумами амплитудной голограммы, что приводит к уменьшению результирующего поглощения голограммы. *Амплитудные голограммы обычно используют при необходимости воспроизведения объектной волны с минимальными искажениями.*

При прохождении излучения через амплитудную голограмму изменяется амплитуда и фаза:

- амплитуда изменяется за счет модулированного изменения коэффициента поглощения среды,
- фаза изменяется за счет того, что регистрирующая среда имеет показатель преломления, отличный от показателя преломления вакуума.

Пусть имеем плоскую монохроматическую волну (в скалярном приближении), распространяющуюся в направлении z :

$$E = E_0 \cos(\omega t - kz) = E_0 \cos(\omega t - \varphi) = \operatorname{Re} E_0 e^{i\omega t} e^{-ikz}$$

$$\varphi = kz = \frac{2\pi}{\lambda} z, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} - \text{волновой вектор}$$

Изменение амплитуды такой волны при прохождении расстояния «Т» между точками z_1 и z_2 , можно представить в виде

$$\frac{E_2}{E_1} = t e^{-ikT}, \quad t = e^{-\alpha T}$$

t – амплитудное пропускание (не путать с обозначением времени!);

α – амплитудный коэффициент поглощения;

τ – пропускание по интенсивности,

$$\tau = t^2 = e^{-2\alpha T}$$

Оптической плотностью излучения называют величину равную

$$D = -\lg \tau = 2\alpha T \lg e = 0,86 \alpha T$$

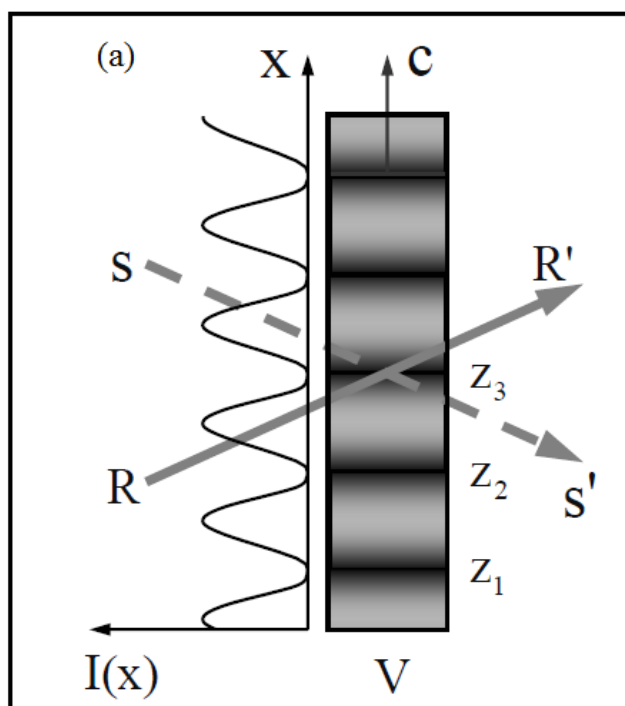


Рис. 8 В амплитудной голограмме, полученной в линейном режиме записи, изменение амплитудного коэффициента поглощения в направлении вектора решетки (коллинеарного оси x) будет определяться выражением

$$\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot \cos(2\pi x/d).$$

α_0 – среднее значение коэффициента поглощения;

α_1 - амплитуда изменения коэффициента поглощения, определяет эффективность голограммы и зависит от условий получения голограммы и параметров РС;

d – период решетки.

Фазовая голограмма - голограмма, полученная в РС, в которой под воздействием интерференционного поля произошли изменения показателя преломления или толщины материала. Дифракция излучения на фазовой голограмме обусловлена модуляцией (периодическим изменением) показателя преломления среды либо модуляцией (периодическим изменением) толщины среды (рельефграфические материалы).

Статические фазовые голограммы получают на основе:

- галогенидосеребряных фотоматериалов (с применением постэкспозиционной обработки, преобразующей проявленное серебро в соли серебра, прозрачные в видимом диапазоне спектра),
- фотоматериалов из бихромированной желатины,
- фотополимеров и других.

Для получения **динамических фазовых голограмм** обычно используют фоторефрактивные РС:

- электрооптические и жидкие кристаллы;
- прозрачные и слабопоглощающие нелинейные оптические среды.

Максимальная (*практически реализованная*) дифракционная эффективность фазовых голограмм :

- двумерных - 33%;
- трехмерных - 100% .

Фазовые голограммы получили широкое распространение в изобразительной голографии, получение голограммных оптических элементов и т.д.

При рассмотрении фазовой голограммы-решетки (рис. 8), полученной в линейном режиме записи, изменение показателя преломления в направлении вектора решетки (коллинеарного оси x) будет определяться выражением

$$n = n_0 + n_1 \cdot \cos(2\pi x/d)$$

n_0 – среднее значение показателя преломления;

n_1 – амплитуда изменения показателя преломления, определяет дифракционную эффективность голограммы и зависит от условий получения голограммы и параметров РС;
 d – период решетки.

Типы голограмм в зависимости от характера изменения параметров регистрирующей среды при записи:

- необратимая запись, статические голограммы;
- обратимая (реверсивная) запись, динамические голограммы.

Статическая голограмма - голограмма, оптические параметры которой после ее получения не изменяются во времени.

Статические голограммы получают в РС, в которых изменения параметров среды, происходящие под воздействием излучения непосредственно в процессе записи информации, являются незначительными и проявляются в результате постэкспозиционной обработки. Такие РС обладают высокой чувствительностью, так как при постэкспозиционной обработке скрытое изображение многократно усиливается.

Динамическая голограмма - регистрируется в реверсивных динамических РС, оптические параметры которых заметно изменяются непосредственно во время действия формирующего голограмму излучения, что приводит к дифракции излучения на голограмме в процессе ее регистрации, обуславливающей изменение характеристик записываемых волн и появление новых волн.

Изменения параметров реверсивной РС, инициированные световым воздействием, носят обратимый характер, что является необходимым условием для получения динамических голограмм.

Для получения динамических голограмм обычно используют два типа фоторефрактивных РС:

- с локальным откликом, где пространственное распределение фотоиндуцированного показателя преломления при записи синусоидальной интерференционной картины синфазно или противофазно распределению интенсивности в регистрируемой интерференционной картине;
- с нелокальным откликом, где пространственное распределение фотоиндуцированного показателя преломления при записи синусоидальной интерференционной картины сдвинуто по фазе по отношению к распределению интенсивности в регистрируемой интерференционной картине.

Фоточувствительность - способность изменять показатель преломления под действием излучения. Полученный после этого измененный показатель преломления называется **фотоиндуцированным**.

Лекция 7

Статические и динамические голограммы: основные свойства, особенности и области применения: нестационарный энергообмен, коррекция формы волнового фронта.

Основное свойство голограмм: восстановление объектной волны. Условия получения максимального голографического эффекта: получение голограммы при освещении малорассеивающего объекта через диффузный экран.

Процесс получения высокоэффективных статических голограмм состоит из двух основных этапов:

1. регистрация голограммы (экспонирование РС), во время которой не происходит заметных изменений оптических параметров РС и образуется скрытое изображение;

2. постэкспозиционная обработка голограмм, которая включает в себя различные химические и физические процессы, усиливающие (преобразующие) скрытое изображение и фиксирующие голограмму.

Для получения статических голограмм используют галогенидосеребряные фотографические материалы, материалы на основе бихромированной желатины, фоторезисты, фототермопластики и т.д.

Области практического применения статических голограмм - голографические оптические элементы, голографическая интерферометрия, изобразительная голография, защитная голография и т.д.

Для получения статических голограмм используют галогенидосеребряные фотографические материалы, материалы на основе бихромированной желатины, фоторезисты, фототермопластики и т.д.

Области практического применения статических голограмм - голографические оптические элементы, голографическая интерферометрия, изобразительная голография, защитная голография и т.д.

Особенности статических голограмм:

- возможность получения голограмм при низкой интенсивности интерферирующих пучков за счет длительного времени экспонирования;
- длительная сохраняемость информации (длительный срок эксплуатации голограмм);
- возможность только однократного использования регистрирующей среды для записи информации;
- широкий спектр научно-технических применений.

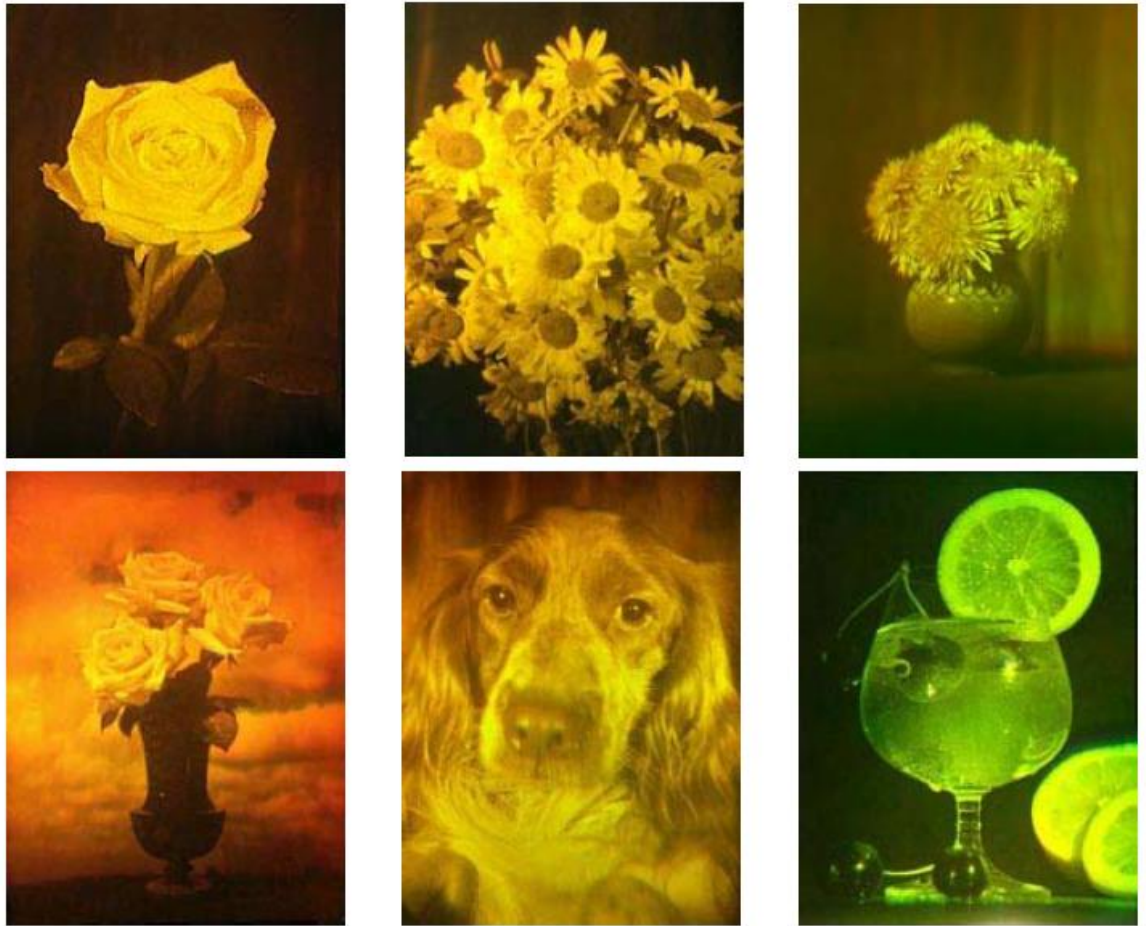


Рис. 1 Применение статических голограмм: изобразительные голограммы различных объектов, полученные по методу Ю.Н.Денисюка.

Динамическая голограмма - регистрируется в реверсивных динамических РС, оптические параметры которых заметно изменяются непосредственно во время действия формирующего голограмму излучения, что приводит к дифракции излучения на голограмме в процессе ее регистрации, обуславливающей изменение характеристик записывающих волн и появление новых волн.

Изменения параметров реверсивной РС, инициированные световым воздействием, носят обратимый характер, что является необходимым условием для получения динамических голограмм.

Стадии формирования и считывания динамической голограммы неразрывно связаны, т.е. процесс запись-считывание является одновременным.

Параметры динамической голограммы определяются:

- характеристиками регистрируемого излучения (длиной волны, шириной спектра, мощностью и длительностью воздействия);
- свойствами РС (нелинейной восприимчивостью и временем релаксации);

- условиями записи (величиной и ориентацией внутренних и внешних электрических полей, геометрией записи, состоянием поляризации взаимодействующих волн и наличием между ними частотного сдвига и т.д.).

Различают **стационарный и нестационарный режимы** записи динамической голограммы.

При **стационарном режиме записи** амплитуда модуляции оптических параметров среды остается неизменной во времени. Такой режим возможен, если **время регистрации голограммы существенно превышает время релаксации среды**.

Важным параметром сред, используемых в нелинейной оптике, является **время релаксации** отклика среды на световое возмущение.

Пример:

Растворы просветляющихся красителей. Под действием света коэффициент поглощения раствора падает (наступает просветление) вследствие перехода молекул красителя в возбужденное состояние. Время релаксации, т.е. время восстановления исходного поглощения определяется временем перехода молекул в основное состояние и для разных красителей попадает в диапазон 10^{-12} - 10^{-4} с.

Нестационарный режим записи реализуется, если время записи голограммы меньше времени ее релаксации (или сравнимо с ним). В нестационарном режиме происходит нестационарное перераспределение энергии между взаимодействующими в объеме РС волнами, в результате которого возможно значительное усиление слабых волн за счет более сильных.

Особенностью динамических голограмм является использование нелинейных РС и более мощных источников излучения, чем используют в оптической голографии для получения статических голограмм

Нелинейные фоторефрактивные РС:

- электрооптические и жидкие кристаллы;
- резонансно поглощающие пары металлов,
- среды, в которых наблюдаются эффекты вынужденного нелинейного рассеяния света.

Динамические голограммы применяются :

- для решение задач оптической обработки информации в реальном времени;
- для управления интенсивностью, формой и направлением распространения волн.

Эффекты, связанные с динамическим характером записи, проявляются при записи статических голограмм на неререверсивных средах. Регистрация голограмм происходит на

светочувствительных материалах, которые не образуют скрытого изображения и не нуждаются в проведении постэкспозиционной обработке.

Такие эффекты свойственны, например, щелочно-галогидным кристаллам, кристаллам ниобата лития, полимерным материалам на основе фенантренхинона, материала реоксан и др.

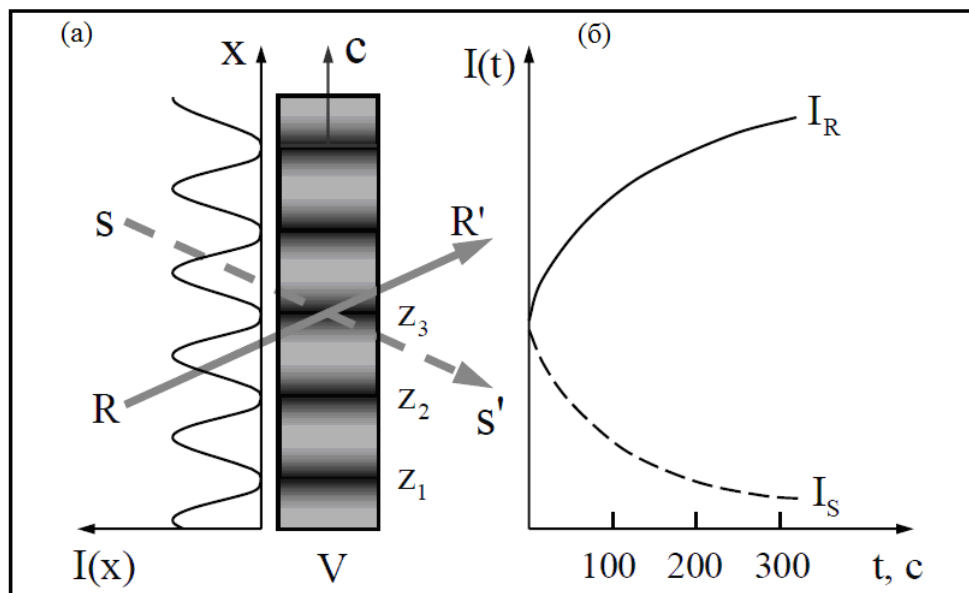


Рис. 2 Явление нестационарного энергообмена в кристалле ниобата лития. а) Направленная передача энергии между волнами R и S, интерферирующими в объеме V; б) зависимость интенсивности выходящих волн (I_S и I_R) от времени экспозиции динамической голограммы.

На кристалл V падают две плоские волны R и S, образующие стоячую волну с распределением интенсивности $I(x)$ (рис. 2а). Благодаря свойствам РС, возникающее под действием стоячей волны распределение показателя преломления смещается вверх или вниз относительно регистрируемой интерференционной картины. Смещение зависит от направления оптической оси кристалла С.

Распределение показателя преломления представляет собой фазовую решетку с максимумами, которые на рис. 2.3а обозначены z_1, z_2, z_3 . Если упомянутый сдвиг равен четверти периода решетки, то по мере записи голограммы энергия выходящих из кристалла волн R' и S', первоначально имеющих одинаковые амплитуды, начнет перераспределяться. При этом волна R' усиливается, а S' ослабляется. На рис. 2б приведены зависимости интенсивности этих волн от времени.

Физический смысл

При сдвиге на четверть периода (рис. 2) максимумы интенсивности поля стоячей волны попадают на какие-то определенные «склоны» гармоники распределения показателя преломления. В результате оказывается, что волновое поле проходит через кристалл так, что волны R и S становятся неравноправными. Одна из них (R) отражается от гармоники показателя преломления как от более плотной среды, а другая волна (S) – как от менее плотной среды.

Одна из составляющих при отражении теряет по фазе половину длины волны, а вторая сохраняет ту же фазу.

Та компонента, которая, отразившись от склона гармоники показателя преломления, потеряла половину периода, сложится с прошедшей сквозь склон волной с обратным знаком. Амплитуды этих двух волн вычитаются друг из друга, и интенсивность соответствующей выходящей из кристалла суммарной волны уменьшится. Интенсивность другой покидающей кристалл волны, включающая компоненту, не изменившую фазу при отражении от структуры голограммы, соответственно увеличится.

Используется в лазерных системах для коррекции формы волнового фронта. С помощью нестационарного энергообмена волн R и S, обеспеченного динамической сдвиговой голограммой, происходит перекачка энергии из пучка мощного лазерного излучения R с деформированным волновым фронтом в слабый по мощности пучок S с требуемой формой волнового фронта (рис. 3).

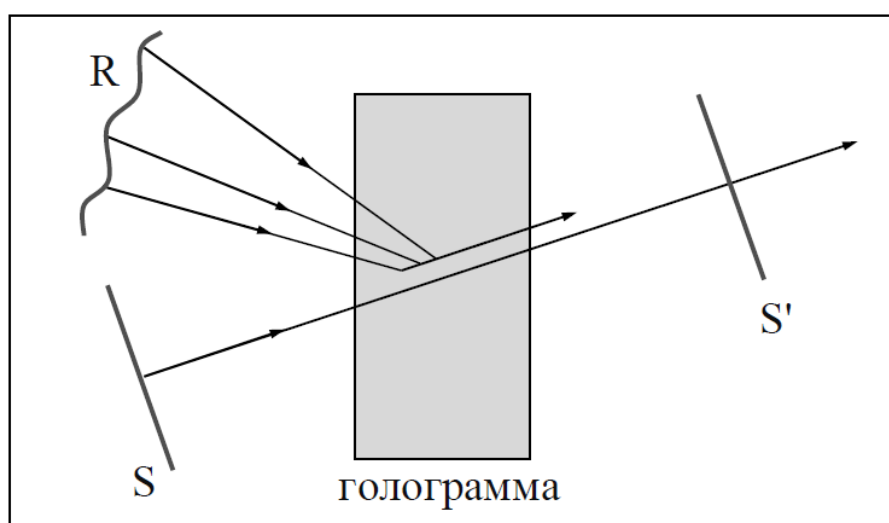


Рис. 3 Коррекция формы волнового фронта с помощью динамической сдвиговой трехмерной голограммы.

Восстановление объектной волны

Голограмма восстанавливает параметры объектной волны: амплитуду, фазу, спектральный состав, состояние поляризации, включая распределение параметров волны в пространстве и их изменение во времени.

Восстановленная объектная волна содержит такое количество информации, которую не может «освоить» наблюдатель и которая, как правило, не может быть полностью передана с помощью современных средств связи и систем передачи информации.

Современные технические приложения голографии ориентированы на сокращение передаваемой информации. Основная трудность сокращения избыточности записанной на голограмме информации связана с тем, что такое сокращение должно осуществляться с учетом особенностей зрительного аппарата человека.

Научно-технические приложения используют возможности голографии не только для восстановления объектной волны, но и для ее преобразования самыми различными способами.

Цифровая голография

Развитие компьютерных технологий и твердотельных приемников излучения позволило записывать голограммы с помощью светочувствительных матриц на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС-камер) в цифровой форме. Такой процесс записи и обработки голограмм является полностью цифровым и получил название **цифровой голографии**.

В цифровой голографии изменяется в технология записи голограмм, однако **основной принцип голографии остается неизменным – восстановление объектной волны из записанной интерференционной картины**.

В цифровой голографии восстановление объектной волны выполняется с помощью компьютерных технологий при использовании записанной цифровым образом либо оцифрованной голограммы.

В цифровой голографии:

- имеются более широкие возможности для анализа по сравнению с традиционным оптическим процессом;
- для исследования доступны как амплитудные, так и фазовые характеристики поля;

- возможно легко отфильтровать фоновые шумы изображения и устранить нулевой порядок дифракции.

Цифровая голография применяется для качественного и точного количественного анализа свойств объекта:

- смещение точек поверхности при анализе деформаций;
- определение формы объекта;
- измерение коэффициента преломления в прозрачных средах;
- изучение траекторий частиц;
- микроскопия.

Изменение состояния изучаемого объекта приводит к изменению объектной волны и получаемой интерференционной картины, которая записывается цифровым образом.

Условия получения максимального голографического эффекта

Максимальный голографический эффект достигается при условии, что при записи голограммы каждая точка объекта освещает всю поверхность регистрирующей среды.

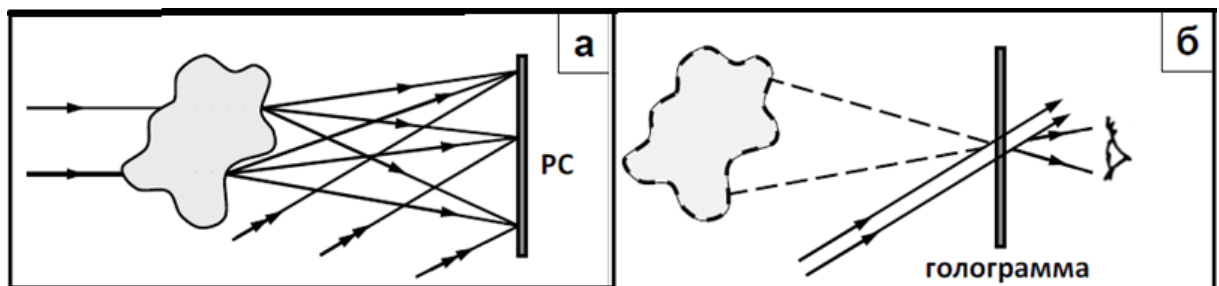


Рис. 4 Регистрация голограммы (а) наблюдение изображения (б) при использовании **диффузно рассеивающего объекта**.

Регистрация голограммы диффузно рассеивающего объекта производится таким образом, что излучение, рассеянное каждой отдельной точкой объекта освещает всю поверхность регистрирующей среды (рис. 4а).

Наблюдение изображения целого объекта при считывании такой голограммы (рис. 4б) можно производить узким пучком через любой участок голограммы.

Для получения голограммы нерассеивающего объекта используют диффузные экраны, или диффузоры .

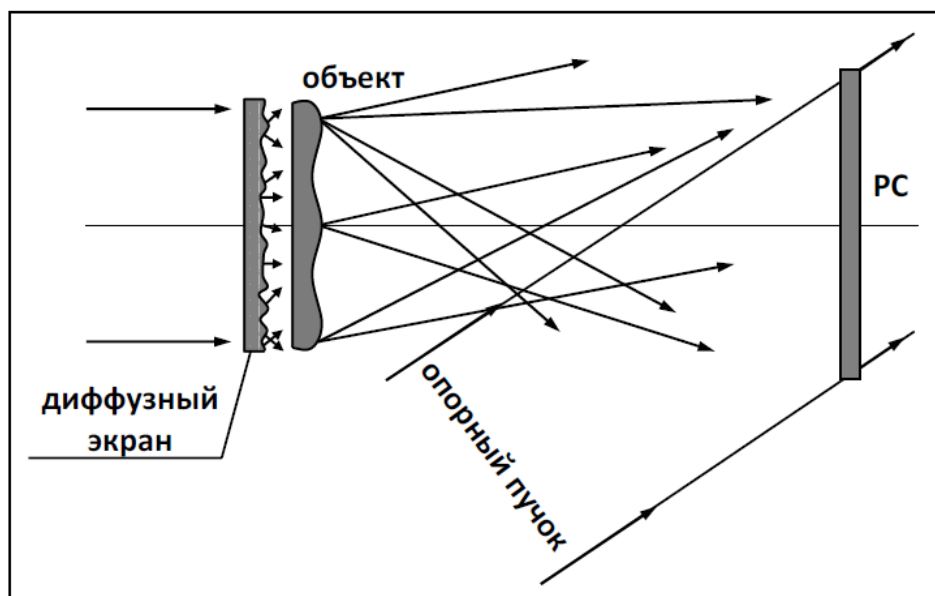


Рис. 5 Получение голограммы при освещении прозрачного (нерассеивающего) объекта через диффузный экран.

Диффузный экран (диффузный рассеиватель), например, матовое стекло, обеспечивает рассеяние света в большом телесном угле.

Экран формирует объектный пучок, удовлетворяющий требованиям создания максимального голографического эффекта. Важными параметрами являются расстояние от экрана до объекта и рассеивающие свойства (индикатриса рассеяния) экрана.

Условия при установке диффузного экрана:

- когерентность исходной волны, освещающей экран, должна сохраняться по всей площади экрана;
- максимальная длина пути излучения от источника до голограммы через экран не должна превышать длину когерентности источника излучения;
- экран должен быть неподвижным во время экспонирования голограммы;
- высокая разрешающая способность регистрирующей среды.

Информация, записанная на голограмме при диффузном освещении, обладает малой чувствительностью к механическим повреждениям и дефектам голограммы (регистрирующей среды).

При использовании изображений, полученных фотографическим способом, царапина или пятно на них приводят к полному уничтожению части информации.

Механизм устойчивости состоит в том, что каждая точка восстановленного изображения формируется лучами, идущими со всей площади голограммы. При повреждении части площади голограммы из процесса формирования изображения исключается только часть лучей, что приводит к уменьшению яркости восстановленного изображения, пропорциональному соотношению дефектной площади к общей площади голограммы, без потери основной информации.

Лекция 8

Делимость голограммы.

Воспроизведение градаций яркости объекта в широком динамическом диапазоне: понятие яркости объекта; градации яркости; диапазона градаций яркости.

Обращение волнового фронта: существо явления; его применение и использование.

Ассоциативные свойства: возможность осуществления поиска изображения объекта по его фрагменту.

Делимость голограммы. Практическое использование и применение этого свойства

Делимость голограммы – свойство, обусловленное спецификой голографического метода записи информации, заключающееся в том, что при регистрации голограммы **каждая точка объекта освещает всю поверхность РС**, в этом случае, **восстановление объектной волны возможно каждым отдельным, сколь угодно малым, участком голограммы.**

При наблюдении изображения объекта голограмма является "окном" в мир объекта – при уменьшении "окна" усложняются и ухудшаются условия наблюдения,

например:

предмет интерьера в комнате можно наблюдать через окно и через замочную скважину – условия разные, но иллюзия действительности сохраняется.

Уменьшение площади рассматриваемой голограммы приводит к ухудшению разрешения в изображении, получаемом с помощью восстановленной объектной волны.

Максимальный голографический эффект достигается при условии, что при записи голограммы каждая точка объекта освещает всю поверхность регистрирующей среды (рис. 1а). Наблюдение изображения целого объекта при считывании такой голограммы (рис. 1б) можно производить узким пучком через любой участок голограммы.

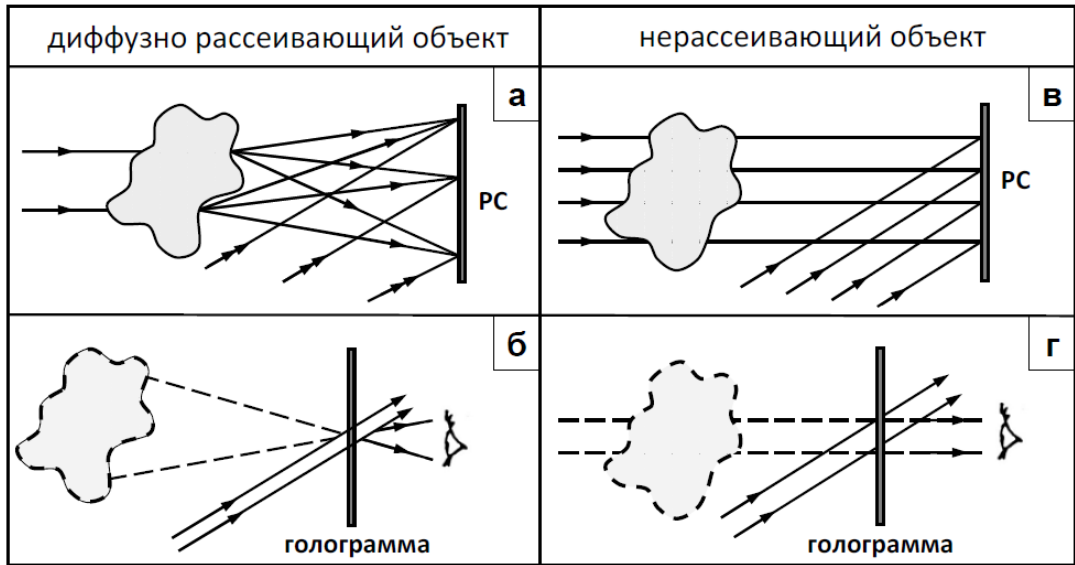


Рис.1. Регистрация голограммы (а, в) и наблюдение изображения (б, г) при использовании диффузно рассеивающего объекта (а, б) и нерассеивающего объекта (в, г).

При получении голограммы нерассеивающего объекта (рис. 1в) излучение от определенной точки объекта освещает только определенный участок голограммы. При считывании такой голограммы пучком ограниченного размера наблюдатель увидит только ту часть объекта, излучение от которой освещало этот участок голограммы при регистрации (рис. 1г).

Для того чтобы получить голограмму нерассеивающего объекта в голографических экспериментах используют диффузные экраны, или диффузоры.

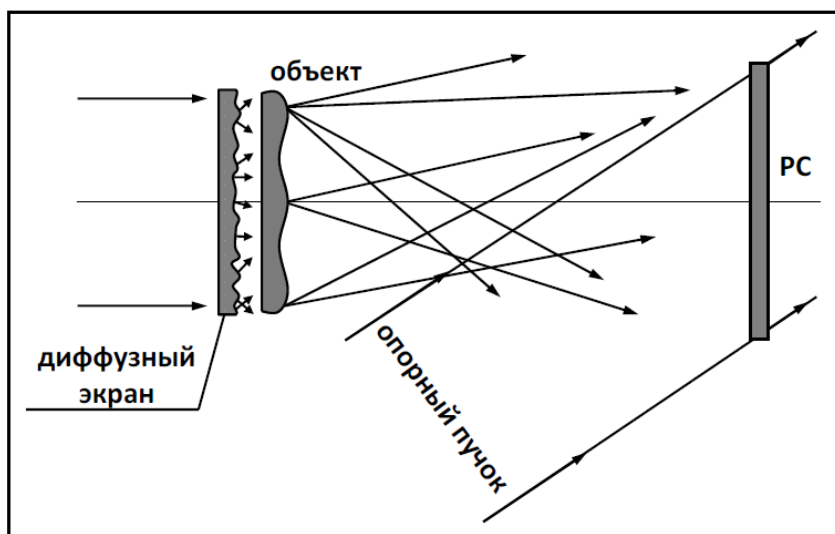


Рис. 2 Получение голограммы при освещении прозрачного (нерассеивающего) объекта

через диффузный экран.

Делимость голограммы обеспечивает малую чувствительность голографического изображения к повреждениям и дефектам голограммы (регистрирующей среды).

Механизм устойчивости обусловлен условиями получения **максимального голографического эффекта**. При повреждении части площади голограммы из процесса формирования изображения исключается только часть лучей, что приводит к уменьшению яркости восстановленного изображения без потери основной информации.

Способность регистрировать информацию за счет распределенной, а не локальной формы записи, свойственная голограммам, чрезвычайно **востребована при создании систем хранения информации (архивной памяти)**, так как увеличивает надежность и сохранность записываемой информации и обеспечивает повышенную стойкость к локальным повреждениям носителя информации.

Воспроизведение градаций яркости объекта в широком динамическом диапазоне: понятие яркости объекта; градации яркости; диапазона градаций яркости.

Распределенная форма записи, свойственная голограммам, обуславливает их способность воспроизводить широкий диапазон яркости в изображении объектов, недоступный другим изобразительным технологиям.

Яркость в изобразительной технике является определяющим параметром. Именно яркость наиболее непосредственно связана со зрительными ощущениями, так как **освещенности изображений предметов, формируемых на сетчатке глаза, пропорциональны яркости этих предметов.**

Яркость L – плотность светового потока, исходящего от поверхности. Равна отношению светового потока $d\Phi$ к геометрическому фактору $d\Omega dA \cos\theta$:

$$L = \frac{d\Phi}{d\Omega dA \cos \theta},$$

$$[L] = \text{кд} \cdot \text{м}^2 = \text{Вт} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{м}^{-2},$$

$d\Omega$ – заполненный излучением телесный угол;

dA – площадь участка, испускающего излучение;

θ – угол между перпендикуляром к этому участку и направлением излучения.

Динамический диапазон воспроизведения градации яркости характеризует способность устройства, формирующего изображение, правильно передать в изображении градации яркости объекта.

Соотношение наиболее ярких и наименее ярких деталей, которое характеризует каждый объект, не могут правильно передать методы получения изображений, обладающие ограниченным диапазоном воспроизведения градации яркости объекта.

При фотографировании на фотоснимках соотношение наиболее ярких и наименее ярких деталей, как правило, не превышает 1000:1. Это позволяет правильно передать градации яркости в изображении человеческого лица, но игра бликов будет утеряна. Распределение яркости фотографического изображения оказывается искаженным по сравнению с оригиналом, особенно это заметно при изготовлении фотоснимков водной поверхности или ювелирных изделий (яркость блика ювелирного изделия, как правило, на 5-7 порядков выше яркости поверхности, например, бархата, на которой изделие находится).

Диапазон яркостей восстановленного с помощью голограммы изображения существенно превышает возможности традиционно используемых методов получения изображений и близок к возможностям зрительного аппарата человека.

Голограмма способна передавать детали, яркость которых в тысячи раз превышает среднюю яркость объекта (например, блики на поверхности объекта).

При записи голограммы излучение каждой детали объекта освещает всю площадь голограммы, а при считывании - каждая деталь изображения формируется излучением, собранным со всей площади голограммы.

Таблица 1 Диапазон градаций яркости на объекте и в изображении объекта, полученном фотографическим и голографическим способом. Объект – бриллиант на черном бархате.

Объект	Фотография объекта	Голограмма объекта
$10^7 - 10^8$	$<10^3$	$\sim 10^5 - 10^6$

Яркость объекта характеризуется отраженным или рассеянным им потоком энергии. Интенсивность отраженного (рассеянного) излучения от граней бриллианта максимальна (практически 100% падающего излучения). Поверхность черного бархата отражает всего $10^{-7} - 10^{-8}$ от падающего на него излучения. Наблюдатель очень эффективно фиксирует эту разницу с помощью своего зрительного аппарата.

При использовании стандартных методов фотографии возможно передать градации яркости объекта в пределах не превышающих соотношение наиболее ярких и наименее ярких деталей 1000:1. (Как правило, это соотношение еще меньше – 100:1). Распределение яркости фотографического изображения оказывается искаженным по сравнению с оригиналом, особенно при передаче ярких деталей и бликов.

Голограмма, зарегистрированная на таком же фотоматериале, как и фотоснимок, способна правильно передавать детали, яркость которых в тысячи раз превышает среднюю яркость объекта. Диапазон яркостей восстановленного голограммой изображения ограничивается только шумом – постоянным фоном, обусловленным, например, рассеянием на зернистой структуре материала.

Обращение волнового фронта, существо явления, его применение и использование

Обращение волнового фронта – возможность пустить волны «вспять», обратно к объекту.

Обращенная волна – волна, имеющая ту же форму, что и исходная волна, но распространяющаяся в обратном направлении (сопряженная по отношению к исходной объектной волне):

$$\text{исходная волна} - E = \text{Re } E_0 \exp[i(\omega t - kz)],$$

$$\text{обращенная волна} - E = \text{Re } E_0 \exp[i(\omega t + kz)],$$

где E_0 – амплитуда волны, распространяющейся вдоль оси z ;

ω – круговая частота;

k – волновое число ($k = 2\pi/\lambda$);

λ – длина волны.

Голографическое изображение, восстановленное исходной волной, является **ортоскопическим**, а восстановленное сопряженной волной – **псевдоскопическим**, так как при рассматривании двух точек на поверхности голограммы они будут иметь разность фаз разного знака при использовании исходной волны и сопряженной.

Термины и определения

Волновой фронт (волновая поверхность) – поверхность, во всех точках которой волна имеет в данный момент времени одинаковую фазу. Распространение волны происходит в направлении нормали к волновому фронту и может рассматриваться как движение волнового фронта через среду.

Ортоскопическое изображение объекта - изображение, в котором распределение разности фаз на поверхности изображения соответствует распределению разности фаз на поверхности объекта. Наблюдатель видит изображение, соответствующее объекту. Мнимое изображение представляет собой ортоскопическое изображение

Псевдоскопическое изображение объекта - изображение, в котором распределение разности фаз на поверхности изображения соответствует по абсолютной величине распределению разности фаз на поверхности объекта, но имеет отрицательный знак по отношению к последнему. Наблюдатель видит изображение объекта, в котором вместо выпуклостей – вогнутости, и наоборот. Действительное изображение объекта является псевдоскопическим.

Псевдоскопическое изображение создается при обращении хода лучей через голограмму (явление обращения волнового фронта). Этот эффект можно наблюдать с помощью изобразительной голограммы.

Пример формирования восстановленной объектной волны, комплексно сопряженной объектной волне.

На голограмме с помощью точечного источника зарегистрировано волновое поле некоторого объекта O (рис. 3). Если на такую голограмму направить сферическую волну W_s того же самого референтного источника S , то голограмма восстановит волновое поле объекта, т. е. распространяющуюся от объекта волну W_o' , соответствующую дальнейшему ходу волны W_o , записанной на голограмме. Наблюдатель h_1 , регистрирующий это волновое поле, увидит пространственное изображение объекта O .

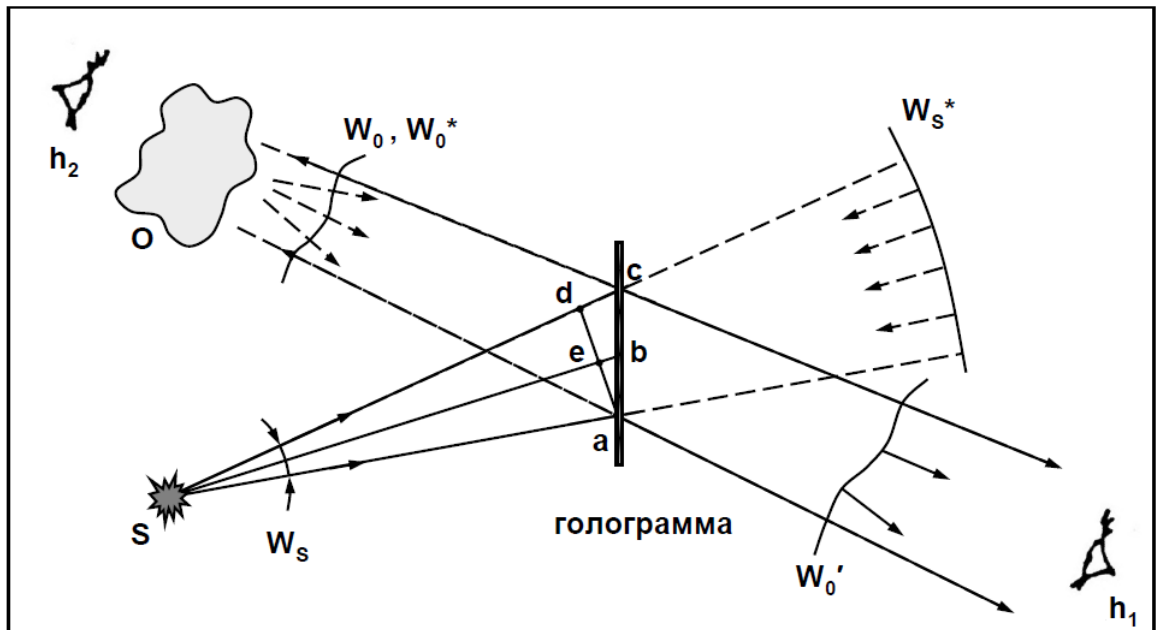


Рис. 3 Пример формирования восстановленной объектной волны, комплексно сопряженной объектной волне.

Пусть мы определили фазу колебаний в некоторой точке a , расположенной на одном из прозрачных участков голограммы. Фазы колебаний на всех остальных прозрачных участках равны длинам отрезков, которые задают удаление данного прозрачного участка от источника S по сравнению с удалением точки a (см. рис. 3). Фаза в точке b характеризуется отрезком be , фаза в точке c — отрезком cd и т. д.

Голограмма H реконструируется сферической волной W^* , сходящейся к референтному источнику S . Голограмма восстановит в этом случае волну W_0^* , сопряженную по отношению к зарегистрированной на ней волне W_0 , т. е. волну, совпадающую по форме с волной W_0 , но распространяющуюся в обратном направлении. На рис. 3 волновые фронты прямой и сопряженной волн W_0 и W_0^* обозначены одной кривой, т.к. они совпадают. Лучевые векторы прямой волны нарисованы сплошными линиями, обратной — пунктиром.

Величины отрезков, характеризующие распределение фаз на голограмме, в этом случае останутся прежними, однако знак их изменится на противоположный.

При восстановлении волной, исходящей из источника S , отрезки eb и dc характеризовали запаздывание колебаний в точках b и c по отношению к точке a .

При восстановлении волной, сходящейся в источник, эти же отрезки будут характеризовать опережение колебаний в точках c и b по отношению к колебаниям в

точке a , поскольку сферическая волна W^* сначала доходит до точек c и b и только затем до точки a .

При восстановлении сопряженной волной распределение фаз на поверхности голограммы изменит свой знак.

Новым условиям соответствует восстановленная волна W_o^* , совпадающая по форме с волной W_o , записанной на голограмме, однако распространяющаяся в обратном направлении — опережающие части фронта превращаются в отстающие, а отстающие в опережающие.

При прямой реконструкции наблюдатель h_1 видит, например, барельеф лица. При обращении голограммы наблюдатель h_2 увидит изображение того же лица, однако оно будет выглядеть так, как будто на него смотрят изнутри.

Если наблюдатель h_1 видел выпуклый овал и выступающий вперед нос, то наблюдатель h_2 увидит вогнутый овал и нос в виде углубления. В целом такое «псевдоскопическое» изображение имеет вид слепка, полученного при вдавлении оригинала в пластический материал.

Явления обращения волновых фронтов используется в приложениях, связанных с наблюдением сквозь неоднородные среды.

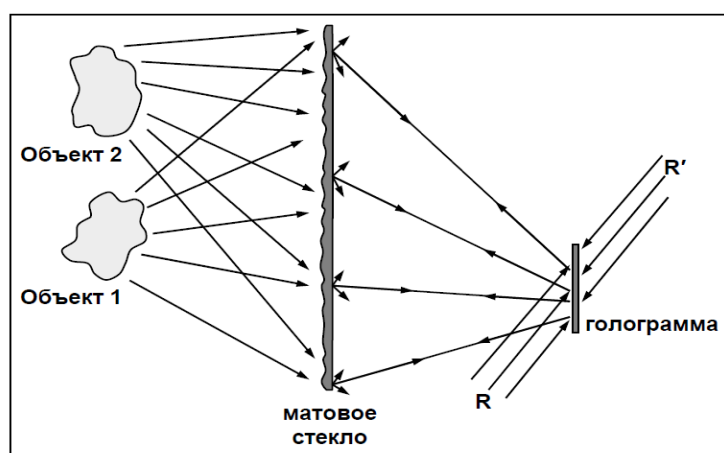


Рис. 4 Схема, поясняющая суть метода компенсации искажений, возникающих при наблюдении объектов сквозь оптически неоднородные среды, основанного на обращении хода лучей с помощью голограммы.

Излучение объектов O_1 и O_2 проходит через оптически неоднородную среду, например, матовое стекло. Излучение прошедшее через матовое стекло в виде равномерного фона регистрируется на голограмме H с помощью референтного луча R . Экспонированная и проявленная голограмма устанавливается относительно матового

стекла в прежнее положение, и на нее направляется излучение R' , сопряженное по отношению к излучению R , падавшему на голограмму при ее записи.

Ход лучей через голограмму обращается, восстановленное излучение идет через неоднородную среду строго по обратному направлению и приобретает фазовые набегги обратного знака. В результате внесенные матовым стеклом искажения компенсируются, и на выходе возникают изображения объектов O_1 и O_2 .

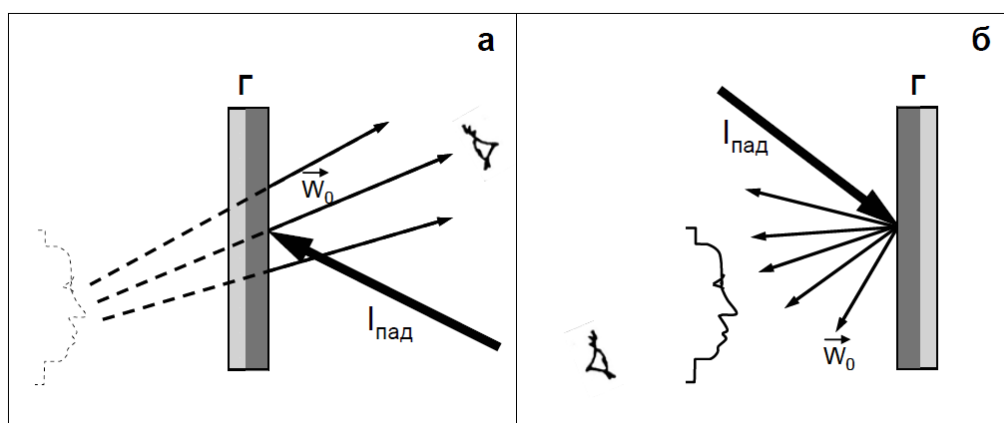


Рис. 5 Наблюдение изображения объекта с помощью голограммы Денисюка при использовании исходной опорной волны (а) и обращенной (б). $I_{пад}$ – падающая на голограмму волна, предназначенная для считывания информации; W_0 – восстановленная объектная волна, формирующая при наблюдении мнимое (а) и действительное (б) изображение объекта.

При использовании исходной опорной волны наблюдается мнимое ортоскопическое изображение объекта, с определенным распределением разности фаз объектной волны на его поверхности. При использовании сопряженной опорной волны наблюдается действительное псевдоскопическое изображение объекта. Разность фаз объектной волны на поверхности действительного изображения соответствует по абсолютной величине разности фаз на поверхности ортоскопического мнимого изображения, но имеет противоположный знак. Это приводит к тому, что в псевдоскопическом действительном изображении выпуклости выглядят вогнутостями и наоборот, а тень «гуляет» перед объектом, а не позади него.

В настоящее время обращенную волну получают с помощью четырехволновой динамической голограммы и используют для коррекции излучения лазера. Обращение волнового фронта получают также за счет вынужденного рассеяния Мандельштама-

Бриллюэна (бриллюэновским зеркалом). Многие оптические схемы адаптивной оптики используют явление обращения волнового фронта. Так же «обращенные во времени» световые волны можно использовать для компенсации атмосферной турбулентности, слежения за движущимися спутниками, кодирования и декодирования сообщений и распознавания образов.

Ассоциативные свойства: возможность осуществления поиска изображения объекта по его фрагменту

Ассоциативные свойства голограммы проявляются при восстановлении объектной волны излучением, сформированным только отдельным участком объекта. При этом голограмма может быть записана только объектной волной и представлять собой безопорную голограмму.

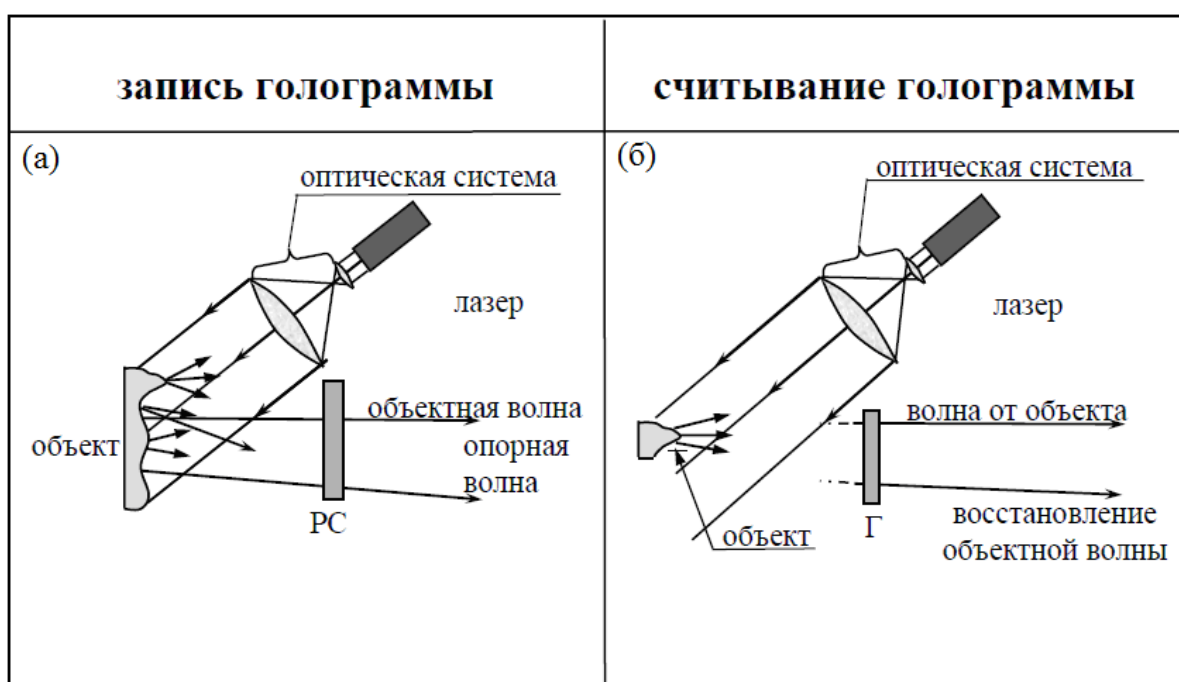


Рис. 6 Принципиальная схема записи и считывания безопорной голограммы.

Безопорная голограмма – голограмма, при записи которой не используется опорная (референтная) волна и голограмма регистрируется излучением только объектной волны в объемной регистрирующей среде. Интерференционная структура голограммы обусловлена когерентным взаимодействием излучения различных частей объекта.

Схема демонстрирует **ассоциативные свойства голограммы – восстановление объектной волны при освещении голограммы излучением, сформированным только отдельным участком объекта.**

При получении безопорной голограммы (рис. 6а) излучение каждой точки объекта, интерферируя с излучением всех его остальных точек, сформирует в объеме регистрирующей среды множество пространственных решеток (простейших голограмм), отличающихся пространственным периодом и ориентацией в пространстве.

Освещаем голограмму излучением, идущим от какой-либо части записанного на ней объекта (см. рис. 6б). Излучение каждой из точек используемой части объекта взаимодействует с простейшими решетками, в формировании которых это излучение участвовало во время записи. Изображения, восстановленные каждой точкой используемой части объекта, складываясь, усиливают друг друга, и в результате образуется единое яркое изображение объекта.

По отдельной части, записанной на ней сцены, голограмма «вспоминает» всю сцену, т.е. восстанавливает полностью объектную волну, формирующую изображение объекта, использованного при записи.

Процесс получения изображения объекта с помощью безопорной голограммы схож с ассоциативной памятью человека.

Голограммы, записанные в динамической среде обладают свойством, похожим на свойство человеческого мозга - «концентрации внимания». Динамическая среда реагирует на свет непосредственно в момент его воздействия. При восстановлении такой голограммы восстановленная волна, проходя далее через объем голограммы, начинает снова записываться, что приводит к усилению записи и постепенному «разгоранию» восстановленного изображения.

Лекция 9

Мультиплицирование изображения и его использование в научно-технических приложениях.

Предельные параметры по информационной емкости: голографическая оптическая память, голографический диск.

Мультиплицирование изображения и его использование в научно-технических приложениях.

Ярким примером возможностей, которые открывает голография в области создания оптических элементов, является множительный голографический элемент, используемый в микроэлектронике, а также в некоторых других областях. Общая схема получения и использования такого элемента приведена на рис. 1.

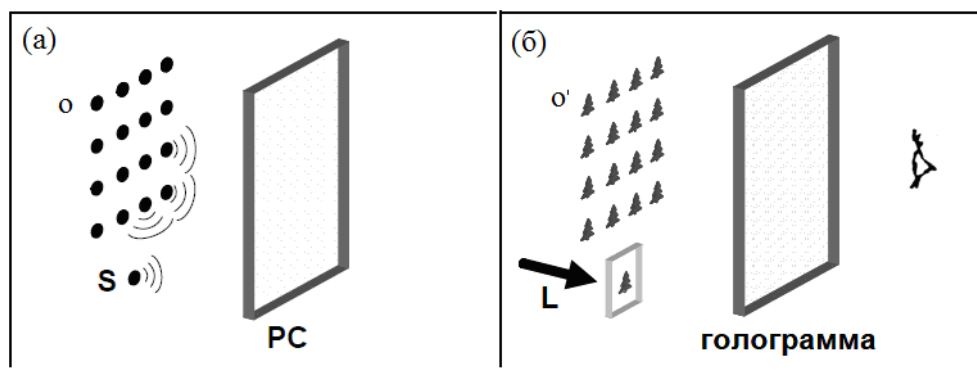


Рис. 1 Принцип работы голографического множительного элемента: а) – запись голограммы матричного элемента с использованием референтного источника S; б) – мультиплицирование объекта-транспаранта, освещаемого пучком лучей L.

На РС с помощью референтного точечного источника S записывается специальный объект O, выполненный в виде регулярной матрицы точек. При реконструкции на место, которое занимал точечный источник, устанавливается объект, подлежащий мультиплицированию (транспарант, освещенный пучком лучей L). Каждая точка этого объекта в соответствии с условиями съемки изображается голограммой в виде регулярной матрицы точек. **В целом голограмма восстанавливает регулярную матрицу O', составленную из изображений мультиплицируемого объекта.**

Голографический множительный элемент применяется для:

- записи изображений, например, в фотолитографии при производстве полупроводниковых приборов;
- осуществления многоканальной параллельной оптической обработки одного входного изображения;
- реализации поэлементной пространственно-неинвариантной обработки изображений;
- различных целей в качестве согласующих элементов оптических волоконных систем.

Преимущества голографического метода мультиплицирования изображений: два важных свойства элемента - **яркость изображения** и его **разрешение** - при использовании голографического метода обусловлены независимыми параметрами.

Увеличение разрешения в изображении объекта напрямую не связано с уменьшением его яркости. В неголографических методах увеличение разрешения, как правило, связано с потерей яркости.

Предельные параметры по информационной емкости: голографическая оптическая память, голографический диск.

Идею использования трехмерной голографии для создания оптической памяти сверхвысокой емкости высказал П.И. Ван Хирден в 1963 году. Идея основана на сходных способностях голограммы и мозга человека записывать и хранить информацию.

Согласно гипотезе физиолога Р.И. Берля мозг хранит каждый бит информации не в одиночной пространственно-локализованной ячейке, а в виде одиночной пространственной гармоник возбуждения, занимающей весь его объем. Такой способ хранения исключает полное исчезновение какой-либо части записанной в нем информации при повреждении одного или нескольких участков мозга.

Вход в такую распределенную память удобен в сравнении с памятью на пространственных ячейках, где каждая ячейка памяти должна иметь соединение с входным устройством. В случае распределенной памяти каждый элемент соединен только с ближайшими соседями.

Емкость устройств с распределенной памятью весьма велика. П.И. Ван Хирден показал, что число независимых гармоник, с помощью которых может быть записана информация определяется соотношением $N = V_r/\lambda^3$

V_r - объем голограммы; λ - длина волны света, использованного при записи.

Для видимого света и 1 см^3 : $N = 10^{10}$.

Идея создания голографической памяти была выдвинута и частично реализована в виде лабораторных систем и устройств в 1966-67г.г.

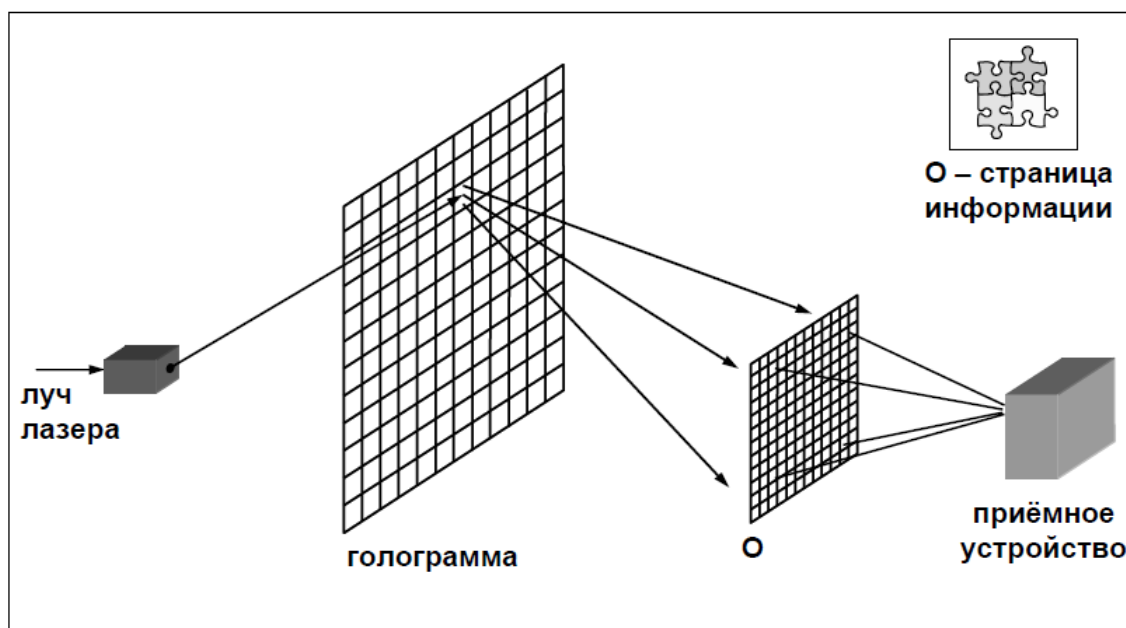


Рис. 2. Принципиальная схема устройства голографической памяти ЭВМ, опубликованная в журнале BSTJ в 1967г.

При записи информации на РС впечатывается система малых голограмм, на каждой из которых зарегистрирована одна страница памяти, которой соответствует одна клеточка в голограмме на рис. 2. Информация на каждой странице кодируется в виде изображения, характеризующегося определенным распределением интенсивности в некоторой плоскости O. Примерный вид такого распределения представлен в верхней правой части рис. 2.

Для извлечение информации из памяти по команде счетного устройства луч когерентного излучения с помощью отклоняющего устройства направляется на определенную голограмму, где записана страница с необходимой информацией. Голограмма восстанавливает изображение этой страницы в плоскости O. Распределение интенсивности в этом изображении считывается матрицей фотоприемников и подается на вход счетного устройства С. Если необходимо вспомнить другую страницу, угол отклонения луча изменяется и восстанавливается другая голограмма. Условия записи голограмм выбираются так, чтобы восстановленные изображения страниц точно проецировались на одну и ту же матрицу фотоприемников.

Современные системы архивной оптической голографической памяти представляют собой комплекс сложных научно-технических и инженерных решений при реализации различных этапов процесса записи, считывания и поиска информации. Голографическая система памяти включает следующие инженерные компоненты:

- источники света;

- дефлекторы пучков света;
- составитель страниц;
- среда для записи голограмм;
- матрица фотодетекторов (приемников излучения);
- различные вспомогательные оптические элементы и электронные устройства.

Перспективность голографического метода хранения и считывания информации обусловлена следующими специфическими особенностями данного метода:

- запись и хранение документов в аналоговом формате без предварительного кодирования;
- параллельная запись и считывание больших объемов информации (не отдельных битов, а целых страниц);
- повышенная надежность при хранении записанной информации за счет распределенной, а не локальной формы записи (избыточность информации при голографической записи обеспечивает повышенную стойкость к локальным повреждениям носителя);
- снижение требований к электромеханическим системам управления и к их быстродействию за счет того, что ширина спиральных дорожек на голографических дисках в 10-100 раз больше, чем в существующих оптических дисках (запись происходит не побитово, а постранично);
- увеличение информационной емкости за счет использования постраничной, а не побитовой записи информации и за счет использования наложенной записи, то есть записи на отдельном локальном участке диска нескольких голограмм, каждая из которых может содержать значительный объем информации, например, страницу текста.

В современных информационных технологиях дальнейшие перспективы увеличения плотности записи информации ориентированы на использование и применение голографических методов.

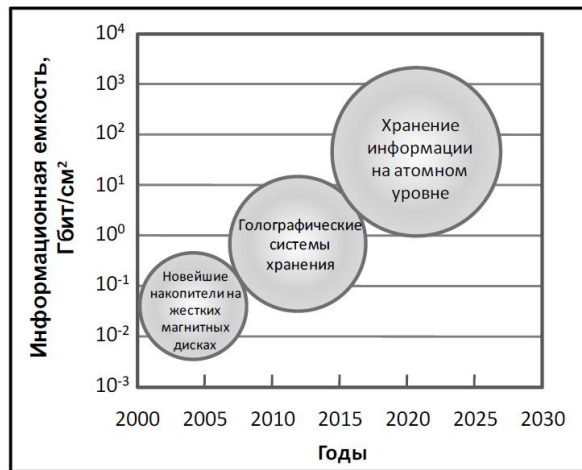




Рис. 3 Развитие емкости запоминающих устройств (по данным IBM).

Таблица 1 Сравнение характеристик различных типов оптических дисков.

Тип оптического диска		компакт-диск	DVD-диск	Blu-ray диск	голографический диск
Емкость носителя	сейчас	700 Мб	9,4 Гб	54 Гб	200 Гб
	в ближайшие несколько лет	—	—	216 Гб	4000 Гб
Скорость записи (однократно записываемых дисков)	сейчас	62 Мбит/с	177 Мбит/с	144 Мбит/с	270 Мбит/с
	в ближайшие несколько лет	—	266 Мбит/с	288 Мбит/с	1 Гбит/с




HVD Pro Series 1000 Magnum



InPhase
Tapestry 300r

OPTWARE



HVC (опытный образец)

Тип голографического диска	HVD	HVC	Tapestry	
Емкость носителя	сейчас	200 Гб	30 Гб	300 Гб
	ожидается	4000 Гб	150 Гб	1600 Гб
Скорость записи (однократно записываемых дисков)	сейчас	270 Мбит/с	40 Мбит/с	235 Мбит/с
	ожидается	1 Гбит/с	160 Мбит/с	1,2 Гбит/с

Рис. 4 Голографические системы хранения информации, предлагаемые различными фирмами-изготовителями.

Большинство из предлагаемых решений голографической памяти используются только для хранения архивных данных и не позволяют производить изменения записанной однажды информации. Такое ограничение не снижает перспективы использования голограмм для хранения обширных массивов данных, и именно использование принципов голографии будет способствовать значительному прорыву в области информационных технологий. Особенно это актуально в современных условиях, когда поиск нужной информации в большом объеме данных занимает много времени.

При создании голографической памяти одной из самых сложных проблем является создание РС для записи, хранения и перезаписи голограмм, которая может быть легко и технологично сформирована в виде удобного в эксплуатации носителя информации. Каждая фирма, претендующая на создание голографической памяти, предпринимает свои собственные разработки в этом направлении.

Одно из развиваемых направлений: диски изготавливаются из светочувствительного полимерного материала и имеют толщину порядка 1,0-1,5мм, которая обеспечивает возможность наложенной записи при регистрации информации голографическим способом.

Аналогом, а в ряде случаев и прототипом таких сред является полимерный светочувствительный материал на основе органического красителя фенантренхинона (ФХ), разработанный конце 80-х годов XX века в Государственном Оптическом Институте им. С.И. Вавилова (ГОИ) для целей объемной голографии.

Библиографический список

1. Островский Ю.И., Бутусов М.М., Островская Г.В. Голографическая интерферометрия. - М.: Наука. 1977. - 339 с.
2. Вест Ч. Голографическая интерферометрия. - М.: Мир. 1982.
3. Оптическая голография / Под ред. Колфилда Г. - М.: Мир. 1982. - т.1.
4. Клименко И.С. Голография сфокусированных изображений и спектр-интерферометрия. - М.: Наука. 1985. - 222 с.
5. Островский Ю.И. Спектры. В кн.: Физическая энциклопедия. М.: БРЭ. 1994. т.4. с. 604-605.