

## 2.8. Голография.

Литература (Матвеев §38, Сивухин §54)

Идея голографии состоит в том, чтобы получить оптическое изображение путем восстановления волнового фронта. Принципиально эта идея была выдвинута М. Вольфке в 1920 г., но затем была забыта.

Годом рождения *голографии* считается 1948 год, когда английский ученый Д. Габор предложил оригинальный метод повышения разрешающей способности электронных микроскопов. Идея Д. Габора состояла в том, чтобы сначала зарегистрировать на фотопластинке интерференционную картину, сформированную электронным пучком, прошедшим без рассеяния, и пучком, рассеянным (дифрагированным) на исследуемом объекте. Такую пластинку Д. Габор назвал *голограммой*. После этого тем или иным способом изображение интерференционной картины увеличивалось в несколько тысяч раз и освещалось видимым светом, длина которого во много раз больше, чем у электронного пучка. Дифрагированный на интерференционной картине свет формировал изображение объекта. Расчеты показывали, что разрешающая способность при этом увеличивалась в несколько раз, однако модельные эксперименты Д. Габора с некогерентными источниками света завершились неудачно. Требовались источники света, обладающие высокой степенью временной и пространственной когерентности.

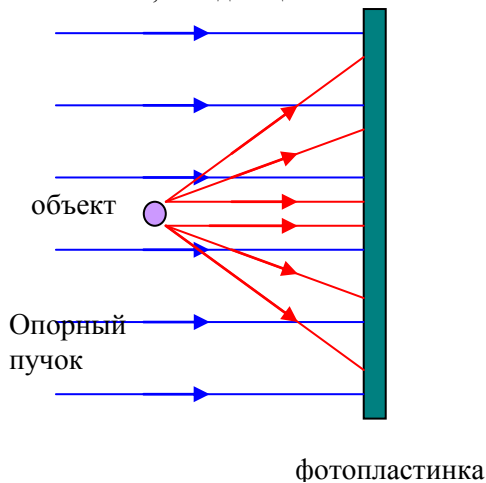


Рис. 8.1.

Термин *голография* происходит от двух греческих слов: *holos* -полный и *grapho* - пишу. То есть голография дословно означает полная запись, подчеркивая, что голографический метод позволяет регистрировать не только интенсивность, но и фазу световой волны.

Второе рождение голографии произошло после появления первых лазеров в начале 60-х годов XX века. Уже в 1961 году американские физики Э. Лейт и Ю. Упатниекс получили первые голограммы, используя когерентное излучение газового лазера. В 1962 году Ю.Н. Денисюк продемонстрировал отражательные голограммы, которые восстанавливались белым (некогерентным) светом. Изготавливается голограмма, т.е. фотопластинка, с помощью которой можно восстанавливать световую волну, рассеянную телом. Далее создаются условия для восстановления этой волны.

### Голограммы Лейта-Упатниекса.

На первом этапе происходит запись голограммы. Для этого когерентный световой пучок тем или иным способом разделяется на два пучка. Один из них – *опорный* – отражается от зеркала, другой – *объектный* – рассеивается объектом.

Примерная схема изображена на рис. 8.2. Там, где опорный и объектный пучки пересекаются, происходит их интерференция. В результате интерференции в одних областях пространства световые колебания усиливаются, а в других – ослабляются. При этом локальное интерференционное поле представляет собой периодически чередующиеся светлые и темные области, расстояние между которыми определяется длиной волны света и углом схождения пучков. При небольших углах схождения (несколько градусов) период интерференционного поля составляет несколько микрометров. Крупномасштабные изгибы интерференционного поля, изменение его контраста однозначно определяются фазовой поверхностью объектного пучка.

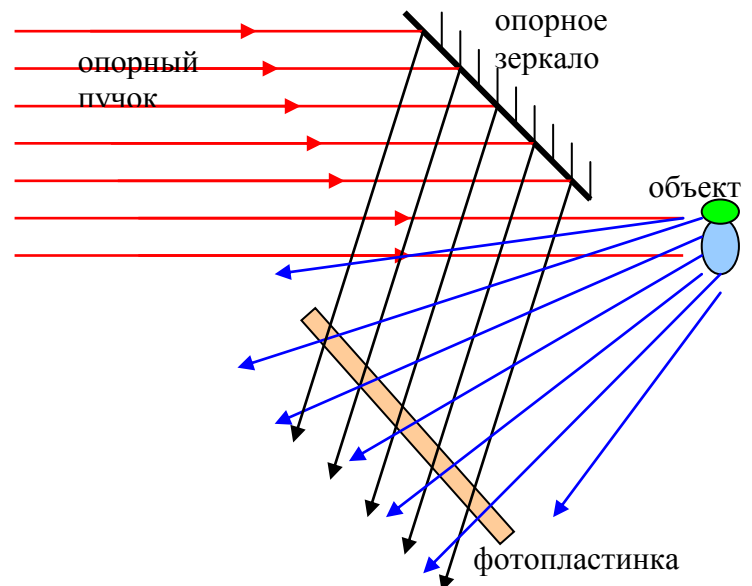


Рис. 8.2.

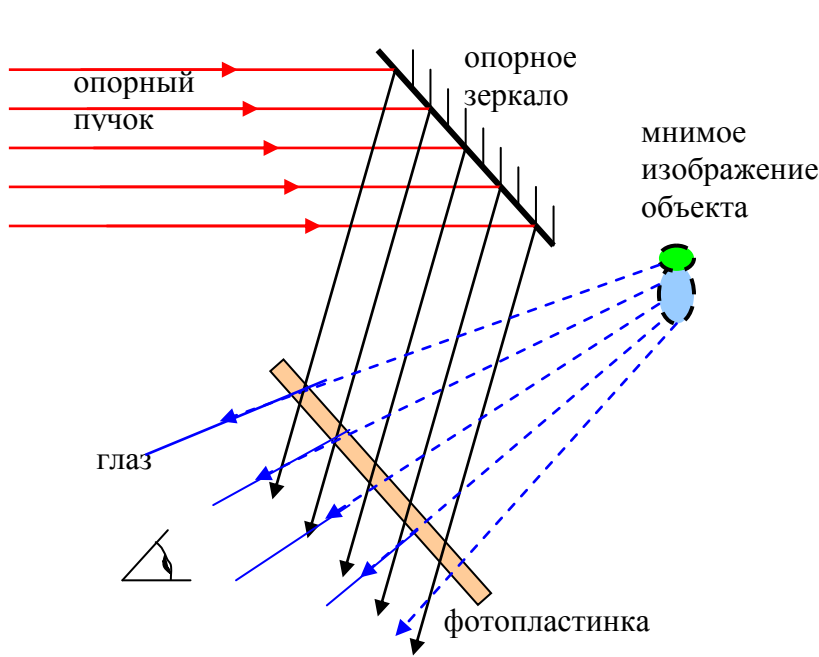


Рис. 8.3.

Если в интерференционное поле поместить пластинку с нанесенным на ее поверхность тонким фоточувствительным слоем, обладающим достаточно высоким разрешением, то на ней будут зафиксированы интерференционные полосы. После обработки такая пластинка является голограммой.

Второй этап голографического процесса связан с восстановлением голографического изображения. Голограмма освещается опорным пучком примерно под тем же углом, что и при записи (см рис. 8.3). Это опорный пучок испытывает дифракцию на голограмме как на дифракционной решетке. Дифрагированный пучок является почти точной копией объектного пучка, который

записывал голограмму. Поэтому, если посмотреть сквозь голограмму навстречу дифрагированному пучку, то можно увидеть объемное изображение объекта.

#### Голограммы Денисюка.

Метод Ю.Н. Денисюка тесно связан с методом цветной фотографии Г. Липпмана. Этот тип голограмм называют также толстослойными, объемными, отражательными голограммами или голограммами на встречных пучках.

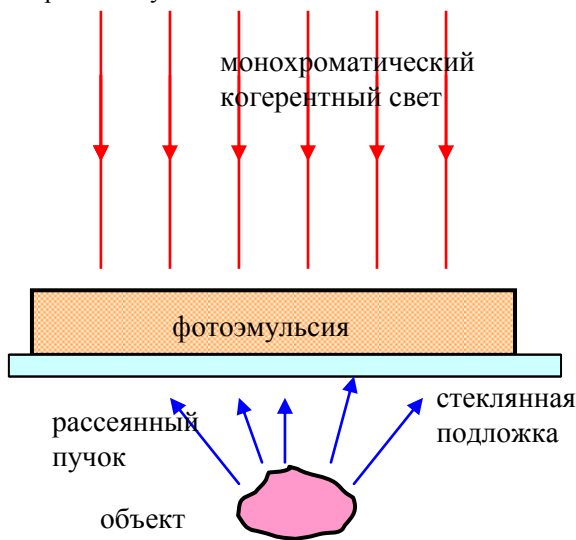


Рис. 8.4.

Напомним, что для получения высококачественных цветных фотографий Липпман помещал достаточно толстую (несколько десятков микрон) фоточувствительную эмульсию на зеркало. Цветное изображение проецировалось на эту эмульсию, проходило сквозь нее и отражалось назад зеркалом. В результате интерференции падающей и отраженной световой волны в объеме эмульсии возникали светлые и темные области, примерно параллельные плоскости фоточувствительного слоя. Так как расстояние между интерференционными областями оказывалось порядка половины длины волны света, то в фоточувствительном слое помещалось десятки таких областей. После фотографического проявления и фиксации в объеме фоточувствительного слоя оказывались зарегистрированными светлые области интерференционного поля в виде слабо

отражающих поверхностей. Расстояние между этими поверхностями однозначно определялось локальным цветом регистрируемого изображения. Теперь если убрать зеркало и осветить этот слой белым светом, то отражаться от каждого участка слоя будет только тот цвет, для которого расстояние между отражающими поверхностями в этом месте равно половине длины волны (см этот же раздел Волновая оптика, Глава 1, §1.4)

При записи голограммы Денисюка когерентный пучок света, являясь одновременно опорным, проходит сквозь фотоэмульсию и рассеивается объектом (рис. 8.4). Объектный пучок распространяется почти навстречу опорному пучку и образует интерференционное поле в виде чередующихся светлых и

темных областей, расстояние между которыми равно половине длины волны. В объеме фоточувствительного слоя возникают слабо отражающие слои, форма и расположение которых определяется светлыми областями интерференционного поля, в котором «закодировано» распределение амплитуды и фазы излучения, отраженного объектом.

Если теперь осветить такую фотопластинку (голограмму) пучком некогерентного белого света, то

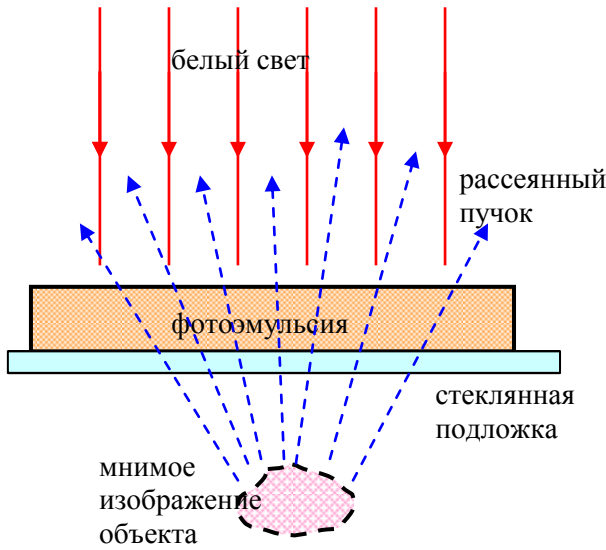


Рис. 8.5.

эффективно отражаться будет только свет с такой длиной волны, которая в 2 раза больше расстояния между отражающими слоями голограммы. Чем больше слоев, тем большим отражением и спектральной селективностью обладает голограмма. Отраженная волна является почти точной копией волны от объекта, которая записывала голограмму. Поэтому в отраженном свете мы видим мнимое объемное изображение объекта (см рис. 8.5).

*Объемность голографического изображения.*

В Липпмановской фотографии для получения цветного изображения и его регистрации глазом используется некогерентный свет, а частично отражающие слои в фотоэмульсии «кодируют» локальный цвет изображения, а не кривизну волнового фронта. Поэтому Липпмановские фотографии не обладают эффектом объемности. В голографии Денисюка для получения голограммы применяются источники

когерентного света (лазеры), иногда даже несколько таких источников, когда хотят получить цветную голограмму. В этом случае частично отражающие слои «кодируют» фазу объектной волны, а при восстановлении голограммы белым (некогерентным) светом изображение получается объемным.

Отметим, что в то же время все точки фотографии находятся примерно на одинаковом расстоянии от наших глаз, поэтому не надо по-разному фокусировать хрусталик глаза на разные расстояния (аккомодация). Не используется бинокулярность зрения, связанная с тем, что для разных расстояний разные области сетчатки глаза являются сопряженными, т.е. дают единый (не раздвоенный) образ предмета. Объемность зафиксированного изображения оценивается глазом с использованием психологических критериев, как уменьшение размеров предмета при удалении, перекрывание близкими предметами более далеких предметов, менее четкое изображение более далеких и т.д. Именно указанные физиологические особенности зрения ответственны за ощущение объемности рассматриваемого пространства.

Пусть опорная и объектная волны имеют вид:

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_{10} e^{i(\omega t - \vec{k}_1 \vec{r})}, \quad \vec{E}_2 = \vec{E}_{20} e^{i(\omega t - \vec{k}_2 \vec{r})} \quad (2.8.1)$$

где  $\vec{E}_{10}, \vec{E}_{20}$  – комплексные амплитуды с пространственно зависящей фазой. Не будем для простоты учитывать поляризационные эффекты.

Суперпозиция этих полей образует интерференционное поле, распределение интенсивности в котором определяется квадратом суммарной амплитуды:

$$I = (\vec{E}_1 + \vec{E}_2)(\vec{E}_1 + \vec{E}_2)^* = |\vec{E}_1|^2 + |\vec{E}_2|^2 + \vec{E}_2 \vec{E}_1^* + \vec{E}_1 \vec{E}_2^* \quad (2.8.2)$$

Фотоотклик среды определяется этим же полем:

$$\varepsilon \sim \gamma I \quad (2.8.3)$$

где коэффициент  $\gamma$  определяет фотохромные и фоторефрактивные свойства среды. Пространственно модулированные слагаемые  $\vec{E}_2 \vec{E}_1^*$  и  $\vec{E}_1 \vec{E}_2^*$  определяют голографические характеристики среды, а  $|\vec{E}_1|^2$  и  $|\vec{E}_2|^2$  обуславливают квазиоднородную засветку и соответствующее изменение коэффициента поглощения или показателя преломления среды.

Осветим теперь эту среду волной  $\vec{E}_1$ . Тогда на выходе из среды получаем, учитывая только интерференционные слагаемые:

$$E \sim \gamma \vec{E}_2 \vec{E}_1^* \vec{E}_1 + \gamma \vec{E}_1 \vec{E}_2^* \vec{E}_1 \quad (2.8.4)$$

Первое слагаемое в этом выражении соответствует дифрагированной волне в направлении  $\vec{k}_2$ , которая полностью идентична объектной волне. Второе слагаемое соответствует восстановленной волне  $E_2^*$ , распространяющейся навстречу  $E_2$  и образующей действительное псевдоскопическое изображение. При его рассмотрении глазом выпуклые места кажутся вогнутыми и наоборот.

---

Примечание 1. Мечислав Вольфке, польский физик, 1883–1947;

*Деннис Габор, венгерский физик, работал в Лондоне, 1900–1979, Нобелевская премия 1971 г. за изобретение голографии;*

*Габриэль Липпман, французский физик, 1845–1921, Нобелевская премия 1908 г. за цветную фотографию солнечного спектра.*

*Юрий Николаевич Денисюк, 1927-2006, советский физик, окончил ЛИТМО и с 1954 г. работал в ГОИ;*

*Эммет Лейт, американский физик, 1927–2005, профессор электротехники в Университете Мичигана;*

*Юрис Упатниекс, американский физик латышского происхождения, 1936, профессор Мичиганского университета;*

---