

# Лабораторная работа № 1

## ЗНАКОМСТВО С ГОЛОГРАФИЕЙ

**Цель работы:** восстановление голографических изображений.

**Приборы и принадлежности:** гелий-неоновый лазер ЛГ-75, набор голограмм.

### 1. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время бурными темпами развивается новая отрасль оптики – голография. Голография (т.е. «полная запись», от греческого: голос – весь, графо – пишу) – это интерференционный метод регистрации структуры световых волн, дифрагировавших на объекте, который освещен когерентным светом. Голография была изобретена в 1947 году английским физиком Денисом Габором. За этот метод в 1971 году ему была присуждена Нобелевская премия.

В чем заключается принцип голографии? Как можно регистрировать и восстанавливать всю информацию о предмете?

Голография обязана своим возникновением основным законам волновой оптики – законам интерференции и дифракции – и принципу Гюйгенса-Френеля.

Если мы хотим регистрировать и восстанавливать волну, то необходимо уметь регистрировать и восстанавливать амплитуду и фазу волны, идущей от предмета. Такая возможность представляется в связи с тем, что фазовая и амплитудная информация заложена в формуле

$$E_0^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02}\cos(\alpha_2 - \alpha_1), \quad (1)$$

где  $E_0$  – амплитуда результирующего гармонического колебания;  $E_{01}, E_{02}$  – амплитуды слагаемых гармонических колебаний;  $(\alpha_2 - \alpha_1)$  – разность фаз слагаемых колебаний.

Так как интенсивность прямо пропорциональна квадрату амплитуды, то для интенсивности получим

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos(\alpha_2 - \alpha_1), \quad (2)$$

где  $I_1$  и  $I_2$  – интенсивности слагаемых колебаний;  $I$  – результирующая интенсивность.

Как видно из выражений (1) и (2), распределение интенсивности в интерференционной картине определяется, не только амплитудами интерференционных волн, но и разностью фаз. Следовательно, для полной регистрации волнового поля можно использовать явление интерференции света. При этом надо учитывать, что для регистрации как фазовой, так и амплитудной информации необходимо иметь, кроме

волны, идущей от предмета (предметной волны), еще одну когерентную с ней волну (опорную).

Таким образом, приходим к выводу: для регистрации и восстановления волны, дифрагированной предметом (т.е. промодулированной как по фазе, так и по амплитуде), необходимо заставить ее проинтерферировать с когерентной опорной волной с известной фазой, затем с помощью опорной волны извлечь из общей интерференционной картины предметную волну. Это и есть идея голографирования.

Процесс получения изображения в голографии распадается на две стадии.

На первой стадии изготавливается голограмма, т.е. фотопластинка, на которой произведена фотографическая запись интерференционной картины световых волн. Голограмма содержит информацию о фазе и амплитуде дифрагированных волн.

Вторую стадию составляет извлечение из голограммы той информации об объекте, которая на ней зарегистрирована. Для этого голограмма просвечивается световым пучком. В некоторых случаях используется отражение света от нее.

Изображение предмета, даваемое голограммой, является объемным. Замечательным свойством голограммы является большой объем содержащейся в ней информации.

Голограмма позволяет полностью восстанавливать волновое поле объекта в его отсутствие.

## 2. ТЕОРИЯ МЕТОДА И ОПИСАНИЕ РАБОЧЕЙ УСТАНОВКИ

### 2.1. Получение голограммы

На рис. 1 изображена принципиальная схема установки для получения голограммы непрозрачного объекта наблюдения  $H$  в отраженном от него свете.



Рис. 1

Испускаемый лазером волновой фронт излучения делится на две части (рис. 1). Одна часть фронта отражается от зеркала  $Z$ , а другая — рассеивается объектом наблюдения  $H$ . Зеркало  $Z$  направляет плоскую опорную волну на фотопластинку  $P$ , куда приходят и волны, отраженные от объекта  $H$  (предметная волна).

На каждую точку освещенной части

фотопластинки могут падать световые волны, модулированные по амплитуде и фазе любым участком объекта наблюдения, и, кроме того, падает опорная волна. Поэтому каждый участок интерференционной картины, возникающий при суперпозиции этих двух волн, может содержать полную информацию о всем объекте наблюдения.

Опорная волна не должна быть обязательно плоской. В некоторых случаях используется сферическая волна. Голограммы с различной кривизной волновых фронтов опорной и предметной волн называются голограммами Френеля, с равной кривизной – голограммами Фурье.

Требование к спектральному составу излучения – высокая монохроматичность. Ширина используемого спектрального интервала излучения  $\Delta\lambda$  должна быть порядка  $10^{-2}\text{ А}$ . Между тем ширина спектральной линии ртутной лампы, даже с невысоким давлением ртутных паров, составляет  $\approx 300\text{ А}$ . Следовательно, источники света так называемого «долазерного периода развития оптики» малопригодны для голографии. Наоборот, с помощью лазеров сравнительно легко реализовать нужные в голографии требования к монохроматичности используемого в ней света. Поэтому на всех схемах голографических опытов ту исходную волну, с помощью которой форматируется поле, освещающее объект наблюдения, и опорную волну следует считать лазерным излучением.

## 2.2. Восстановление голографических изображений

Использование записанной на голограмме информации об объектах наблюдения осуществляется путем просвечивания голограммы (рис. 2). Плоская монохроматическая волна падает слева, нормально на голограмму. В результате распространения света сквозь голограмму и его дифракции на ее неоднородном почернении за голограммой возникает сложная система световых пучков.

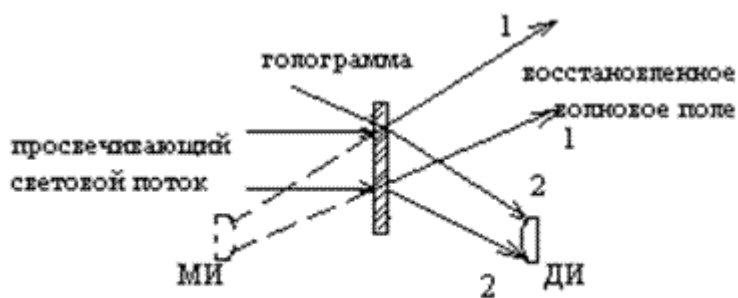


Рис. 2

Сходящийся световой пучок 2 формирует действительное изображение ДИ объекта наблюдения (без помощи оптической системы). Это

изображение получается на том расстоянии от голограммы, на котором помещался объект наблюдения от фотопластинки во время его голографирования. Полученное действительное изображение объекта может быть принято на экран или фотопластинку, если его надо зарегистрировать. Изображение ДИ можно наблюдать и глазом, аккомодировав глаз на область локализации ДИ.

Расходящийся световой пучок  $I$ , если его пропустить через собирающую линзу, может сформировать другое изображение объекта наблюдения. Распределение амплитуд и фаз световых волн в этом пучке  $I$  соответствует так называемому мнимому изображению МИ объекта наблюдения. Изображение МИ локализовано перед голограммой, симметрично с действительным изображением ДИ (см. рис. 2). Мнимое изображение МИ можно наблюдать невооруженным глазом, поместив глаз на пути светового пучка  $I$  и аккомодировав его на область локализации МИ. В этом случае роль собирающей линзы будет выполнять хрусталик глаза, проектирующий изображение на сетчатку глаза.

### 2.3. Запись голограммы в толстослойных эмульсиях (метод Денисюка)

В 1962 году советским физиком Ю.Н. Денисюком был предложен метод получения голографических изображений во встречных пучках. На рис. 3 изображена принципиальная схема получения голограммы этим методом. Объект наблюдения  $O$  освещается через фотопластинку светом лазера, и отраженное от него волновое поле распространяется назад по направлению к слою фотоэмульсии ФЭ.

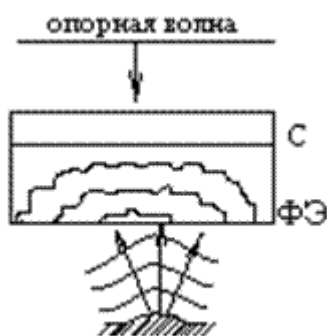


Рис. 3

Толщина фотографического слоя составляет 15...20 микрон. На том же рисунке буквой  $C$  обозначено стекло фотопластинки. Отраженные от объекта наблюдения световые волны распространяются навстречу опорной волне от лазера. В результате в толще фотоэмульсии создается интерференционное поле стоячих волн, вызывающих

слоистое почернение ее, которое учитывает распределение амплитуд и фаз волнового поля, рассеянного объектом наблюдения.

Если осветить голограмму расходящимися пучками белого света, то в отраженном от нее свете под определенным углом зрения можно наблюдать изображение объекта исследования. Максимальную интенсивность при этом будут иметь те световые лучи, для которых условия отражения удовлетворяют требованиям формулы Вульфа-Брегга. На рис. 4 а, б показано, каким образом, варьируя ориентацию голограммы по отношению к освещающему ее свету, можно получить мнимое или действительное изображение объекта наблюдения. В восстановленном изображении мы увидим только ту поверхность объекта, которая была обращена к фотопластинке во время съемки голограммы.

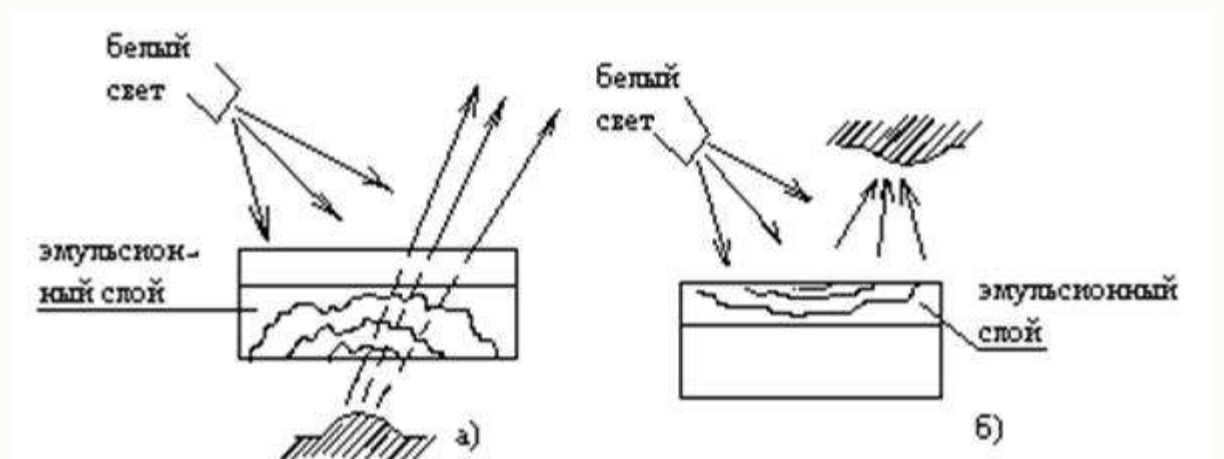


Рис. 4

Почему при использовании толстослойных голограмм на стадии восстановления изображения можно пользоваться белым светом со сплошным спектром? Условие Вульфа-Брегга может быть удовлетворено для излучения волны только определенной длины. Голограмма представляет собой объемную дифракционную решетку с пространственно периодическими слоями почернения. Из совокупности длин видимого света всегда найдется такая длина волны, для которой будет удовлетворено условие Вульфа-Брегга.

Цвет голограммы Денисюка может существенно отличаться от цвета излучения лазера, использованного при записи голограмм. Это связано с воздействием на фотоэмульсию процессов проявления и, главным образом, фиксирования и последующей сушки. Опыт показывает, что обработка фотопластинки дает эффект усадки фотоэмульсии. Это значит, что общая толщина высушенной фотоэмульсии, а следовательно, и расстояние между слоями почернения в ней становятся при сушке меньше, чем в момент регистрации

голограммы. Таким образом, уменьшается пространственный период объемной дифракционной решетки, на которой происходит дифракция света на стадии восстановления изображения. В результате этого обстоятельства условие Вульфа-Брегга выполняется для излучения с меньшей длиной волны, а не для излучения, с помощью которого была записана голограмма:

$$2d \cdot \sin \theta = n\lambda \rightarrow \lambda \sim d. \quad (3)$$

Этим объясняется, что изображения, получаемые с помощью толстослойных голограмм, оказываются окрашенными в несколько иной цвет, отличающийся от цвета того излучения, в котором они записаны. Смещение окраски происходит при этом в синюю сторону спектра.

Для голограмм Денисюка ярко выражен эффект псевдоскопии действительного изображения, когда выпуклая поверхность вогнута (рис. 4, б). Данный эффект связан с тем, что в восстановленном изображении части предмета, располагавшиеся ближе к фотопластинке во время получения голограммы, изобразятся ближе к голограмме. Поэтому в действительном изображении выпуклые части предмета (например, барельефа) будут вогнутыми, а вогнутые – выпуклыми.

В изображении предмета мы будем видеть не весь непрозрачный предмет, а только его часть, которая во время получения голограммы была обращена к фотопластинке.

## **2.4. Требования, предъявляемые к голографической установке**

Интерференционная картина – голограмма, получающаяся при суперпозиции предметного и опорного световых пучков, представляет собой весьма сложную систему тесно расположенных интерференционных полос и пятен. Поэтому для фотографической регистрации неимпульсных голограмм необходимы весьма устойчивые оптико-механические системы, защищенные от вибрации во время экспозиции фотопластинок, регистрирующих голограммы. Незначительное, порядка долей длины световой волны, взаимное смещение элементов оптической системы, источника света или объекта наблюдения во время экспозиции приводит к размытию интерференционной картины на голограмме и к утрате записываемой на ней информации об объекте наблюдения. Поэтому голографическая установка, предназначенная для регистрации голограмм с помощью лазеров непрерывного действия, должна представлять собой единую жесткую систему, включающую в себя лазер, все детали оптической системы, объект наблюдения и фотопластинку. Кроме того, эта система



должна быть очень надежно изолирована от внешних механических помех, которые могут вызвать в ней внутренние вибрации, способные изменить ход световых пучков.

Этим требованиям удовлетворяют современные голографические установки, представляющие собой примерно двухтонные интерференционные столы, снабженные воздушной пневматической амортизацией. Такие столы имеют период собственных свободных колебаний порядка секунды и высокую добротность подвески.

Интерференционный стол представляет собой обычно стальную плиту размером  $1,5 \times 3 \text{ м}^2$ , на которой простроганы профили семи-восьми параллельных оптических скамей прямоугольного сечения. На рейторах, установленных и надежно закрепленных на этих скамьях, помещены все оптические детали голографической схемы, а также объект наблюдения и кассета с фотопластинкой.

## 2.5. Применение голографии

Голографический метод записи волнового фронта находит широкое применение в различных областях науки и техники и имеет перспективы в будущем.

К примеру, голограмму можно использовать в качестве комплексного оптического элемента. Известны, в частности, голограммы, играющие роль линз, дифракционных решеток, интерференционных фильтров. Голографические дифракционные решетки содержат 5 000 полос на 1 мм.

Метод голографии позволяет записывать на заданном малом участке фотоэмульсии (особенно толстослойной) в 100...400 раз больше страниц печатного текста, чем методы обычной микрофотографии. Это дает полное основание предполагать, что голография найдет широкое применение при записи и хранении информации.

На обычную фотопластинку  $32 \times 32 \text{ мм}^2$  можно записать 1 024 голограммы, каждая из которых занимает площадь в  $1 \text{ мм}^2$ . Одна голограмма – страница книги, одна пластинка – целая большая книга.

Разрабатываются электронно-вычислительные машины (ЭВМ) с голографической памятью, которая будет на несколько порядков превосходить память ныне существующих ЭВМ. Голографическая память ценна еще и тем, что она долговечна (ЭВМ «Минск-222» способна хранить информацию всего лишь 3 месяца).

Многообещающим является применение голографии при распознавании образов и символов, что позволит создать читающие автоматы, обладающие большой надежностью.

Голографические устройства, в которых используются звуковые радиоволны совместно со световыми, дадут возможность видеть предметы, рассеивающие звуковые или радиоволны (звуко- и радиовидение).

Метод голографической интерференции позволяет исследовать изменения (например, деформацию), происшедшие в наблюдаемом объекте под каким-либо внешним действием; он может быть использован также при исследовании плазмы.

Возможные применения голографии весьма разнообразны. Далеко не полный перечень образуют голографическое кино- и телевидение, голографический микроскоп, контроль качества обработки изделий. В литературе встречается утверждение, что изобретение голографии можно сравнить по его последствиям с созданием радиосвязи.

### **3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

3.1. Ознакомьтесь со схемой, используемой для получения голограммы Френеля (см. рис. 1).

3.2. Изучите схему для восстановления мнимого и действительного изображения объекта по голограмме Френеля (см. рис. 2).

3.3. Включите лазер ЛГ-75.

3.4. Вставьте голограмму Френеля в специальный держатель, который может поворачиваться. Для наблюдения мнимого изображения объекта свет лазера ЛГ-75 должен падать на голограмму со стороны эмульсии. Изображение локализуется за голограммой. Соответственно глаз наблюдателя должен быть аккомодирован не на плоскость голограммы, а на плоскость, лежащую за ней. Вращая держатель с голограммой, подобрать условия оптимальной яркости изображения объекта.

3.5. Для наблюдения действительного изображения объекта голограмма должна быть обращена стеклом к освещенному световому пучку. Освещая голограмму узким световым пучком от ЛГ-75 и варьируя ее ориентацию, получают на передвижном экране действительное изображение объекта наблюдения. Перемещая столик с голограммой относительно просвечивающего ее светового пучка в плоскости голограммы, наблюдают эффект видимого параллактического смещения и вращение деталей изображения.

3.6. Изучите схему, используемую для получения голограммы во встречных пучках методом Денисюка (см. рис. 3).

3.7. Ознакомьтесь со схемой для восстановления мнимого и действительного изображений объекта по голограмме Денисюка



(см. рис. 4 а, б). Осветите голограмму белым светом. Если при восстановлении изображения свет падает на голограмму со стороны стекла фотопластинки, то за голограммой (по отношению к наблюдателю) будет видно мнимое изображение предмета (см. рис. 4, а).

При освещении голограммы со стороны эмульсионного слоя перед голограммой будет наблюдаться действительное изображение (см. рис. 4, б). В этом изображении наблюдается эффект псевдоскопии.

3.8. Изменяя ориентацию столика с голограммой, наблюдают эффект объемности получаемых изображений и взаимного параллактического смещения деталей этих изображений.

3.9. Обратите внимание на цвет наблюдаемых изображений. Этот цвет не совпадает с красным цветом лазерного излучения, использованного при регистрации голограммы.

### **ВОПРОСЫ ДЛЯ ДОПУСКА К РАБОТЕ**

1. Понятие о голографии и голограмме.
2. Получение голограммы непрозрачного объекта (голограмма Френеля).
3. Получение голограммы во встречных пучках (голограмма Денисюка).

### **ВОПРОСЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ РАБОТЫ**

1. Восстановление голографических изображений.
2. Отличие голограммы от обычного фотоснимка.
3. Требования, предъявляемые к голографической установке.
4. Эффект псевдоскопии.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Годжаев Н.М. Оптика. – М.: Высш. шк., 1977. – 432 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2. – М.: Наука, 1978. – 480 с.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. – М.: Наука, 1980. – 751 с.
4. Ландсберг Г.С. Оптика. – М.: Наука, 1976. – 926 с.

## *Лабораторная работа*

# **Получение изобразительных голограмм по методу Ю.Н. Денисюка**

**Цель работы:** изучение экспериментальных условий регистрации стоячей световой волны (интерференционной картины) высокой пространственной частоты, предназначенной для воспроизведения объектной волны.

### **Задачи, решаемые в работе:**

1. Ознакомиться с установкой для регистрации голограмм и требованиями к получению изобразительных голограмм по методу Ю.Н. Денисюка.
2. Подобрать объект и схему его освещения, подготовить установку для регистрации.
3. Получить голограмму выбранного объекта: зарегистрировать голограмму на фотопластинке, провести химико-фотографическую обработку фотоматериала, высушить полученную голограмму.
4. Отработать условия освещения голограммы для получения максимального визуального эффекта. Сравнить эффект при наблюдении объекта в монохроматическом свете и наблюдении его изображения с помощью полученной голограммы.

## **СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ**

**Голография** – раздел физики, изучающий процессы преобразования волн (волновых полей) интерференционными структурами, формируемыми когерентными волнами при их взаимодействии в веществе. Основой голографии является наиболее общий метод записи и восстановления произвольного волнового поля, который состоит в том, что запись осуществляется путем регистрации в светочувствительной среде результата когерентного сложения (интерференции) исходного волнового поля с другой (опорной) волной, а восстановление (воспроизведение, преобразование) - вследствие дифракции излучения на зарегистрированной интерференционной структуре. Голографический метод применим к волнам любой природы, но наибольшее развитие получила оптическая голография (оптический диапазон электромагнитного излучения). Слово “голография” составлено из двух греческих слов “ $\delta\lambda o\sigma$ ” - "весь" и “ $\gamma\rho\alpha\phi\omicron$ ” - "запись" и означает “полная запись”. 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. 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.

**Голограмма** – зарегистрированный результат взаимодействия (интерференции) двух или более когерентных волн. Голограмма представляет собой интерференционную структуру, которая может быть получена физическими методами в результате взаимодействия излучения с приемником (регистрирующей средой) или синтезирована с использованием иных методов (например, методов вычислительной техники).

**Объектная (предметная) волна** - одна из волн, образующих интерференционную картину при регистрации голограммы, в которой содержится информация, предназначенная для воспроизведения или преобразования. Восстановленная (дифрагированная) волна, как правило, воспроизводит именно объектную волну. Обычно объектная волна формируется излучением, прошедшим через объект, либо отраженным от него. В ряде случаев объектной называют ту волну, которая имеет более сложную форму. Иногда деление волн на объектную и опорную является достаточно условным и может быть вообще лишено смысла, например, при получении голографических дифракционных решеток, когда используют волны одинаковой формы.

**Опорная (референтная) волна** - одна из волн, образующих интерференционную картину при регистрации голограммы, которая обычно используется для восстановления объектной волны. Как правило, ОВ имеет простую и легко воспроизводимую форму, например, плоскую или сферическую. В ряде случаев в качестве ОВ используют кодированные волны, а также компоненты объектных волн.

**Голограмма отражательная** - голограмма, при регистрации которой объектная и опорная волны падают на регистрирующую среду (РС) с противоположных сторон (рис.2). При освещении ГО дифрагированная волна наблюдается в отраженном свете. На рисунке 2а показано расположение интерферирующих волн ( $I_1$  и  $I_2$ ) относительно РС при регистрации элементарных отражательных голограмм по симметричной схеме, где  $(\pi/2 - \theta)$  - угол падения излучения на РС,  $T$  - толщина РС,  $d$  - расстояние между двумя соседними максимумами интенсивности в регистрируемой интерференционной картине. На рисунке 2б схематически показано расположение волн при освещении трехмерной отражательной

голограммы в условиях Брэгга  $\theta = \theta_{\text{Бр}}$ ,  $I_{\text{пад}}$  - падающая, или восстанавливающая волна,  $I_{\text{д}}$  - дифрагированная, или восстановленная волна,  $I_0$  - волна нулевого порядка дифракции, прошедшая голограмму без изменения направления). ГО 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).

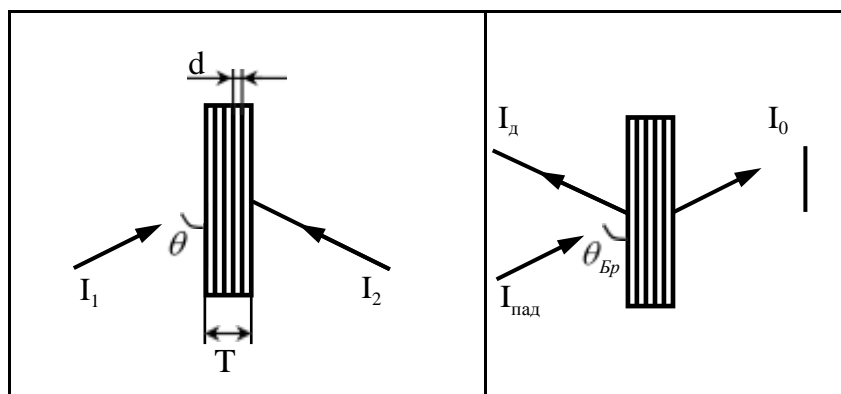


Рис. 2. Отражательная голограмма.

**Голограмма трехмерная (объемная)** - голограмма, при освещении которой формируется только один дифракционный порядок (-1). При этом толщина голограммы намного превышает пространственный период изменения ее оптических параметров. ГТ 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. Высокая эффективность и информационная емкость трехмерных голограмм привлекают к ним внимание многих исследователей, однако, теоретический анализ ГТ достаточно разработан лишь для ограниченного круга объектных волн (модовая теория, теория связанных волн). Практические применения ГТ во многом определяются прогрессом в области разработки светочувствительных сред для их регистрации. В настоящее время 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. Как правило, вопрос о степени объемности голограммы решается экспериментально по наличию +1 и высших порядков дифракции и их эффективности. В качестве теоретического критерия степени объемности используют параметр Клейна  $Q = 2\pi\lambda T / (nd^2)$ , применимый в случае элементарных голограмм (см. статью "Голограмма"), где  $\lambda$  - длина волны излучения,  $T$  - толщина

голограммы,  $n$  - средний показатель преломления голограммы,  $d$  - пространственный период голограммы. При  $Q > 10$  голограмму принято считать трехмерной, высокоселективные ГТ имеют  $Q > 1000$ . ГТ получили широкое применение в изобразительной голографии, динамической голографии, при получении голограммных оптических элементов. Благодаря высокой селективности ГТ 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.

**Денисюка голограмма** - отражательная трехмерная голограмма, впервые получена по однолучевой схеме Ю.Н.Денисюком в 1962г. При регистрации ДГ (рисунок 3а), 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. Таким образом, объектная и опорная волны распространяются навстречу друг другу. При встречном направлении интерферирующих волн пространственная частота голограммы достигает максимально возможной для излучения данной длины волны ( $\lambda$ ) величины и имеет порядок  $2\lambda$  поэтому ДГ проявляют объемные свойства даже при использовании сравнительно тонкослойных регистрирующих сред (фотоматериалы толщиной менее 20 мкм). Спектральная селективность голограммы при этом составляет величину 10-20 нм, что позволяет наблюдать качественное изображение объекта при освещении ДГ источником излучения со сплошным спектром (рисунок 3б: 3 - лампа накаливания, 4 - изображение объекта, 5 - наблюдатель). Для получения ДГ используют прозрачные регистрирующие материалы с высоким разрешением (порядка 5000 лин/мм) и методы постэкспозиционной обработки, пригодные для получения фазовых либо амплитудно-фазовых голограмм. ДГ широко используются для получения изобразительных голограмм и голограммных оптических элементов. ДГ, впервые полученная автором в 1962г. на липпмановских 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.



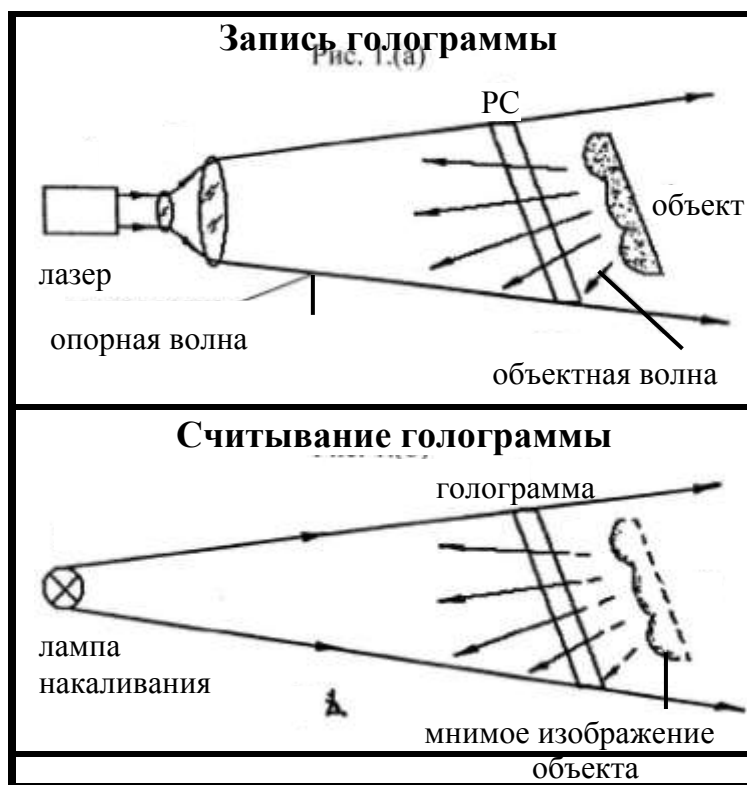


Рис. 3. Схема записи и считывания голограммы Денисюка.

**Регистрация голограммы (запись голограммы)** - процесс физического взаимодействия излучения с регистрирующей средой, в результате которого пространственное распределение интенсивности в регистрируемой интерференционной картине преобразуется в соответствующее распределение каких-либо параметров среды. Для регистрации голограммы необходимы: источник излучения, голографическая схема, регистрирующая среда, разрешающая способность которой должна обеспечить запись максимальной пространственной частоты голограммы, и голографическая установка, обеспечивающая стабильность элементов голографической схемы и регистрирующей среды при регистрации голограммы.

**Изобразительная голография** - раздел голографии, рассматривающий вопросы, связанные с применением голографического метода и технических средств голографии для изобразительных целей. Голограммы, используемые для зрительного (визуального) эстетического восприятия (наблюдения) изображений, получили название изобразительных голограмм. Широкое распространение получили изобразительные голограммы объектов, представляющих собой художественную ценность, - музейных и коллекционных экспонатов, ювелирных изделий и т.д. Размеры голографируемых объектов определяются структурой объекта и техническими возможностями голографии – мощностью источников

излучения, чувствительностью регистрирующей среды, потерями излучения в голографической схеме, допустимой длительностью экспонирования. В настоящее время получены изобразительные голограммы высокого качества размером порядка нескольких квадратных метров. Наблюдение изображений в ИГ, как правило, не требует специальных монохроматических источников излучения – освещение изобразительных голограмм может производиться источниками излучения со сплошным спектром (стандартные лампы накаливания, Солнце). Изобразительные голограммы получают по методу Денисюка, по методу Бентона (радужные голограммы), а также на основе синтеза композиционных голограмм. В качестве регистрирующей среды используют высокоразрешающие галогенидосеребряные фотографические материалы, фотоматериалы на основе бихромированной желатины, фотополимерные композиции. Голографический метод дает принципиальную возможность получить изображение объекта, неотличимое от оригинала при наблюдении в дифрагированном пучке в пределах размера голограммы. Голографическое изображение воспроизводит не только пространственную форму объекта, но и правильно передает диапазон яркости, что позволяет наблюдать игру бликов на объекте при его оглядывании – эффект, недостижимый другими методами получения изображений. ИГ - раздел голографии, тесно соприкасающийся с изобразительным искусством. На основе ИГ появилась возможность создания новых методов в изобразительной технике, обеспечивающих полную иллюзию действительности изображаемой сцены или объекта, а также возможность создания технологий синтеза трехмерных образов и композиций.

«Уникальный характер голографии, как фактически единственного способа объективной записи информации о форме и структуре предметов, предопределил необычайно широкий диапазон ее практических приложений, простирающийся от тяжелого машиностроения до исследований в области термоядерной плазмы и лингвистики». В большинстве научно-технических приложений зачастую используют эту возможность голографии не только для восстановления объектной волны, но и для ее преобразования самими различными способами.

Изобразительные голограммы демонстрируют свойство восстанавливать волновое поле объекта с наибольшей наглядностью даже для людей далеких от техники.

«Каким образом наблюдатель, смотря на предмет, убеждается в его реальном присутствии?

Эффект присутствия, выработанный всем опытом нашей повседневной жизни, а также, по-видимому, и врожденным строением мозга, складывается, собственно, из многих эффектов. Один из самых впечатляющих – так называемый «эффект оглядывания»....

Весьма существенны также и эффекты стереоскопического, бинокулярного видения. Эти эффекты возникают благодаря тому, что глаза наблюдателя, расположенные в двух разных точках, воспринимают несколько различные изображения. Мозг регистрирует эти различия и извлекает из них информацию о расстояниях до предметов.

Особую живость наблюдаемой сцене придает так называемая игра бликов...

Все перечисленные эффекты, по существу, являются формой, в которой мозг представляет информацию, содержащуюся в световых полях. Поскольку повседневный опыт убедил нас в надежности такой информации, вся она в целом дает уверенность в реальном присутствии объекта.

Именно на воспроизведении светового поля, заключенной в котором информации мы так доверяем, и основан механизм воссоздания образов с помощью голограммы.

В заключение обсуждения данного свойства голограммы приведем еще одно высказывание Ю.Н.Денисюка о возможности создания оптических копий объекта. «Очевидно, что предельным случаем структуры, свойства которой совпадают с оптическими свойствами объекта, является точная копия предмета съемки. Естественно, что такая копия восстановит волновое поле объекта при освещении ее излучением любого направления и любого спектрального состава. Если, однако, объект освещается излучением с ограниченным спектром и определенным направлением распространения, то он воздействует на волновое поле только частью своих оптических свойств. Модель этой части, обладающая способностью рассеивать данное излучение так же, как и объект, может вместе с тем сильно отличаться от него по своему внешнему виду».

Зрелищность изобразительных средств голографии еще не нашла в полной мере своего места в современном обществе, возможно, это связано с большим избытком информации, который несет в себе голограмма, при достаточно высокой трудоемкости ее получения. По-видимому, это удел будущих поколений. Вот как описывает данную ситуацию основоположник объемной голографии Ю.Н.Денисюк.

«Поразительно, что среди всего разнообразия известных физике эффектов до последнего времени не было явления, которое позволило бы объективно запечатлевать конфигурации предметов окружающего нас мира. Фотографии, полученные с помощью камеры-обскуры и линзы, - вот фактически и все, что имелось в этом направлении. Однако даже и этот, на первый взгляд очевидный способ регистрации, при ближайшем рассмотрении оказывается субъективным, т.е. рассчитанным на восприятие с помощью человеческого глаза или какого-либо иного зрительного аппарата с аналогичным строением.

Первый действительно объективный способ регистрации формы предметов – голография и лежащее в ее основе явление были обнаружены только в середине нашего (XX-го) столетия к моменту появления технического средства их реализации – лазера».

**Изобразительные голограммы** - голограммы, используемые для зрительного (визуального) эстетического восприятия (наблюдения) изображений. Широкое распространение получили изобразительные голограммы объектов, представляющих собой художественную ценность, - музейных и коллекционных экспонатов, ювелирных изделий и т.д. Размеры голографируемых объектов определяются структурой объекта и техническими возможностями голографии – мощностью источников излучения, чувствительностью регистрирующей среды, потерями излучения в голографической схеме, допустимой длительностью экспонирования. В настоящее время получены изобразительные голограммы высокого качества размером порядка нескольких квадратных метров. Наблюдение изображений при использовании изобразительных голограмм, как правило, не требует специальных монохроматических источников излучения – освещение изобразительных голограмм может производиться источниками излучения со сплошным спектром (стандартные лампы накаливания, Солнце). Изобразительные голограммы получают по методу Денисюка, по методу Бентона (радужные голограммы), а также на основе синтеза композиционных голограмм. В качестве регистрирующей среды используют высокоразрешающие галогенидосеребряные фотографические материалы, фотоматериалы на основе бихромированной желатины, фотополимерные композиции. Голографическое изображение воспроизводит не только пространственную форму объекта, но и правильно передает диапазон яркости, что позволяет наблюдать игру бликов на объекте при его оглядывании – эффект, недостижимый другими методами получения изображений. Голографический метод дает принципиальную возможность получить изображение объекта, неотличимое от оригинала.

Голограмма Денисюка представляет собой фрагмент пространственной интерференционной картины - стоячей волны, заполняющей все окружающее объект пространство, или, другими словами, пространственную фотографическую модель такой стоячей волны, повторяющую в виде вариаций коэффициента отражения распределение интенсивности этой волны. Таким образом, голограмма является оптическим эквивалентом объекта.

Если объект рассеивает волны во всех направлениях в пространстве, то в каждую точку голограммы поступает информация обо всем объекте. Таким образом, каждый отдельный участок голограммы может восстановить изображение всего объекта, так как на нем содержится информация обо всех его точках.

Однако информация, полученная каждым участком голограммы, зависит от угла между объектной и опорной волнами, соответствующего этому участку во время регистрации. Следовательно, каждый участок голограммы восстанавливает объект под определенным углом зрения. Если голограмма достаточно велика, чтобы можно было рассматривать освещенный участок обоими глазами, то при совмещении в мозгу двух наблюдаемых изображений возникает стереоскопический эффект. Если наблюдатель переместится относительно голограммы, то увидит изображение под другим углом. Таким образом, от направления наблюдения зависит, какие части изображения увидит наблюдатель. Это – эффект оглядывания.

Динамический диапазон яркостей на голограмме на несколько порядков выше, чем, например, на фотографии или на печатном оттиске. На фотографии градации яркости передаются за счет различия в пропускании (или отражении) различных участков, а перераспределения по изображению падающего на нее светового потока не происходит, в то время как для построения изображения каждой точки объекта голограмма, обладающая фокусирующими свойствами, собирает свет, падающий на всю ее поверхность. Если на печатном изображении яркость формируется вычитанием из максимальной яркости, то на голограмме – перераспределением света из темных участков на светлые.

## **ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ ЛАБОРАТОРНЫЕ УСТАНОВКИ**

При получении голограмм расстояние между интерференционными полосами, как правило, сравнимо с длиной волны используемого излучения. Во время регистрации голограммы (ее экспонирования) сдвиг фотопластинки (или любого другого регистрирующего материала) должен быть существенно меньше, чем значение наибольшей пространственной частоты регистрируемой интерференционной картины, т.е. не превышать долей длины волны. Для крепления фотоматериалов используют специальные кассеты-держатели, которые обеспечивают нужную стабильность во время экспозиции. Гораздо труднее во время экспозиции обеспечить стабильность самой интерференционной картины. Эта традиционная проблема прецизионной оптической интерферометрии. Голографическая установка собирается, как правило, на массивной плите из стали или гранита (последний имеет преимущество в том, что обладает меньшим температурным коэффициентом расширения). Большая масса необходима для того, чтобы сделать собственную частоту колебаний стола (около 1 Гц) много меньше частот колебаний здания.

Для защиты голографического стола от вибраций здания его помещают в ванну с песком, либо ставят на систему пневматических амортизаторов и т.д.



Возмущения окружающего воздуха – нестабильность температурных и акустических условий в помещении также сказывается на стабильности интерференционной картины. Избавиться от них часто бывает значительно труднее, чем от механических вибраций. Чтобы уменьшить влияние указанных факторов, оптическую длину пути пучков, особенно между светоделителями и голограммой делают как можно меньше.

Для уменьшения влияния нестабильности следует также стараться уменьшать время экспозиции. С этой целью необходимо использовать наиболее чувствительные регистрирующие среды, полнее использовать выходную мощность лазера, выбирая оптимальное соотношение между интенсивностями пучков и сводя к минимуму количество оптических элементов, а, следовательно, и потерь в них.

В качестве источников света в голографических установках используются оптические квантовые генераторы – лазеры, хотя возможны схемы и с другими источниками излучения. Наиболее распространенными при получении изобразительных голограмм являются схемы с газовыми лазерами непрерывного действия. Для получения монохромных изображений используют лазеры с длиной волны в нужном спектральном диапазоне. При получении цветных изображений возникает сложная задача подобрать лазеры с необходимой спектральной и световой чувствительностью

Пучок излучения лазера имеет диаметр порядка нескольких миллиметров, поэтому в оптических схемах используют специальные элементы для получения световых пучков нужного диаметра и расходимости.

Для расширения параллельного светового пучка используют телескопическую систему, состоящую либо из двух линз, фокусы которых совмещены, либо состоящую из микрообъектива и длиннофокусной линзы. Увеличение диаметра пучка равно отношению фокусных расстояний используемых линз (или микрообъектива и линзы). В фокусе микроскопического объектива, расширяющего лазерный пучок, обычно помещают диафрагму с малым отверстием – порядка 10-40 мкм для пространственной фильтрации излучения. Из малой диафрагмы выходит идеальная сферическая волна, т.е. устраняются вредные влияния аберраций оптических систем, а также влияние рассеяния на пылинках воздуха и дефектах оптики.

Для изменения направления световых пучков в различных схемах используют зеркала с высоким коэффициентом отражения и призмы. При этом необходимо тщательно следить за чистотой поверхностей и при использовании призм учитывать возможность возникновения вторичных отражений от граней, приводящих к появлению паразитных пучков, которые при интерференции с основными пучками могут дать как

паразитные изображения при восстановлении, так и паразитную структуру на фотопластинке, ухудшающую качество изображения.

Важным моментом любой голографической схемы является разделение светового пучка от лазера на два пучка, с требуемым соотношением интенсивностей. Используют в таких случаях два основных приема: деление амплитуды и деление волнового фронта световой волны.

При амплитудном делении используют полупрозрачные зеркала, оптические клинья (хорошо обработанные стеклянные пластины с определенным углом между поверхностями), дифракционные решетки, различные двупреломляющие системы. Деление фронта световой волны может также осуществляться с помощью зеркал, призм и линз. Эти системы могут применяться лишь при полной пространственной когерентности пучка в отличие от схем с амплитудным делением. Последние в некоторых случаях могут совместить модовую структуру (нарушающую пространственную когерентность) опорного и предметного пучков.

Широкие возможности для конструирования голографических систем представляют волоконно-оптические элементы.

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СХЕМЫ ДЕНИСЮКА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗОБРАЗИТЕЛЬНЫХ ГОЛОГРАММ**

Изобразительные голограммы, т.е. голограммы, предназначенные для демонстрации зрителям оптических копий художественных объектов, различных макетов и сцен, не должны требовать сложных и дорогостоящих источников освещения для своей реконструкции. Оптимальным является использование обычных ламп накаливания. Кроме того, для получения таких голограмм целесообразно использовать имеющиеся в достаточном ассортименте и доступные регистрирующие материалы, обладающие необходимым разрешением.

Схема, предложенная Ю.Н. Денисюком, обладает, кроме ранее перечисленных особенностей, еще целым рядом особенностей, позволяющих упростить процесс регистрации голограмм. Например, можно регистрировать голограмму по однолучевой схеме, не проводя разделения лазерного пучка на предметный и опорный. Опорным является пучок, прошедший фотопластинку и падающий на объект. Отраженный от объекта пучок интерферирует с падающим и в объеме светочувствительной среды регистрируется картина стоячих волн. При записи голограмм требуется высокая стабильность всех элементов схемы. Однако, при записи голограмм по однолучевой схеме достаточно обеспечить требуемую стабильность только между фотопластинкой и объектом, соединив их в один элемент голографической установки. При

этом требования к стабильности остальных элементов схемы сильно снижаются.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

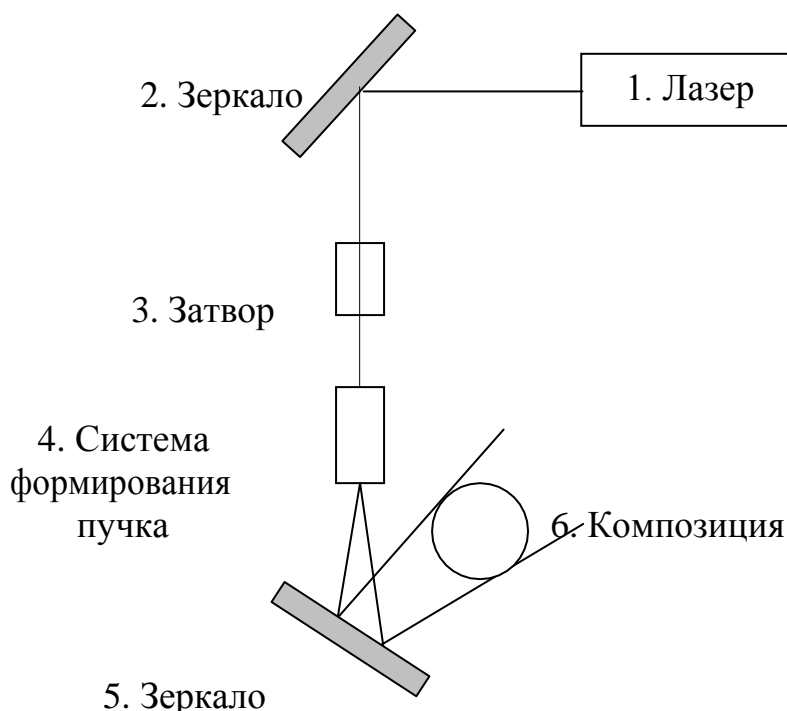
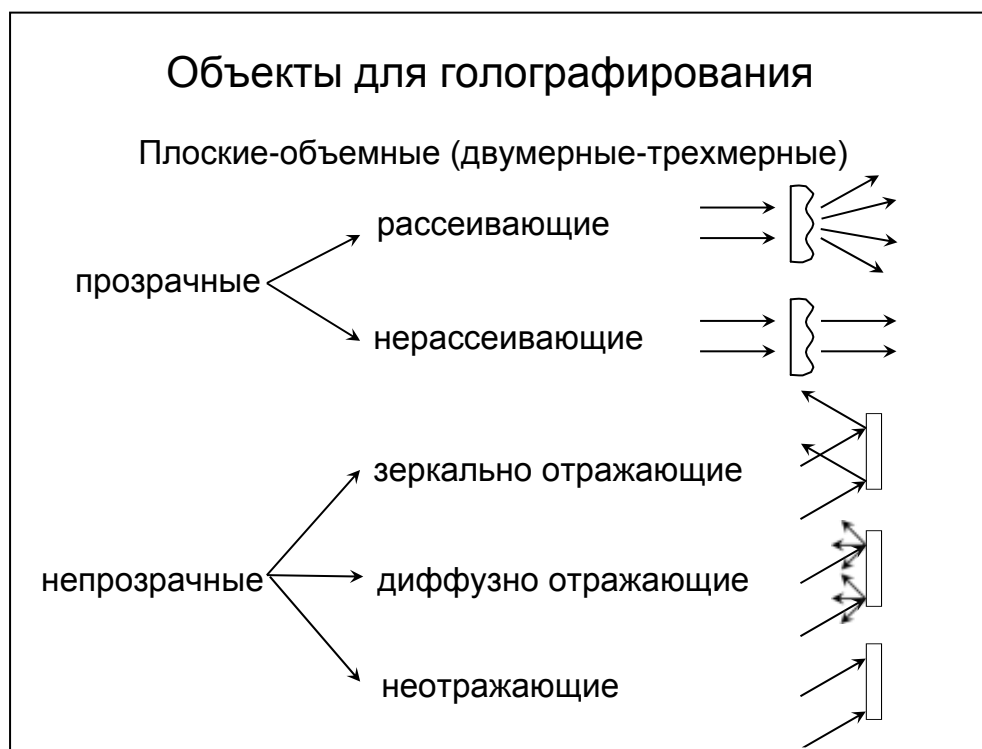


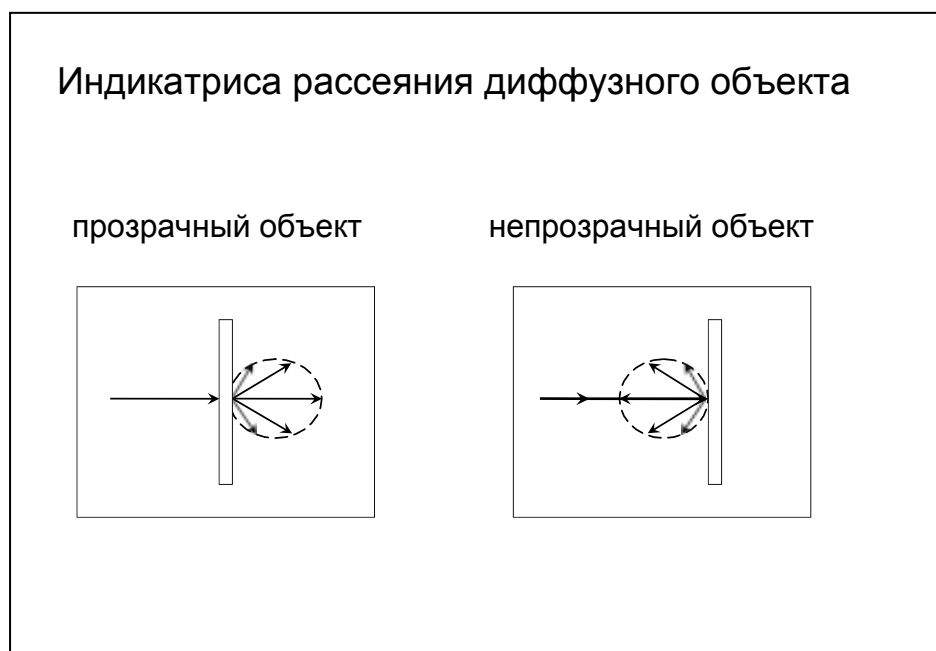
Рис. 4. Принципиальная оптическая схема для формирования лазерного пучка, освещающего объект (композицию).

1. При проведении эксперимента используется гелий-неоновый лазер.
2. Зеркало
3. Затвор с автоматическим управлением
4. Система формирования пучка
5. Зеркало
6. Композиция. Объект, предназначенный для съемки по однолучевой схеме, должен обладать следующими свойствами:
  - достаточной механической прочностью всех деталей и элементов, желательно, чтобы это был металлический объект, либо объект из фарфора, твердой керамики и т.д. Объекты из дерева, пластмассы, бумаги не получаются, т.к. во время регистрации происходит сдвиг отдельных деталей, элементов структуры этих объектов и интерференционная картина “размывается”.
  - достаточно высоким коэффициентом отражения, чтобы контраст записываемой интерференционной картины позволял получить высокую эффективность дифрагированного пучка, создающего изображение.

**Таблица 1.** Характеристики объектов для голографирования.



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



**Рис.5.** Индикатриса рассеяния прозрачного и непрозрачного объектов.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с правилами техники безопасности на голографической установке.
2. Ознакомиться с оптической схемой установки и работой отдельных элементов. Обратить внимание на работу с подвижками юстируемых элементов.
3. Подготовить композицию к съемке, закрепить все элементы схемы на плите с помощью магнитов.
4. Проверить установку фотопластинки с помощью стекла такого же размера.
5. Приготовить рабочий раствор проявителя ПРГ-1.

Раствор А:

сульфит натрия безводный – 38 г

гидрохинон – 30 г

бромистый калий – 22 г

вода дистиллированная – до 1 л

Раствор Б:

углекислый калий – 240 г

вода дистиллированная – до 1 л

Вода дистиллированная – 1 л

Все компоненты проявителя смешиваются непосредственно перед проявлением в соотношении 1 часть раствора А + 1 часть раствора Б + 13 частей дистиллированной воды.

6. Включить фонарь с зеленым фильтром, свет которого не влияет на фотопластинку.
7. Перекрыть излучение гелий-неонового лазера затвором с дистанционным управлением.
8. Вынуть фотопластинку из черной бумаги и установить ее эмульсией к объекту. Выключить фонарь.
9. Время выдержки фотопластинки перед экспозицией 5-10 минут.
10. Открыть затвор, регистрация длится 45 секунд, закрыть затвор.
11. Опустить пластинку в кювету с проявителем эмульсией вверх, время проявления 20 минут.
12. Промыть голограмму в течение 20 минут в проточной воде.
13. Высушить голограмму в вертикальном положении.



## **ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ**

1. Проверить качество полученной голограммы при различных условиях освещения.
2. Отметить недостатки и чем они обусловлены (этапы процесса, свойства фотопластинки).
3. Защитить эмульсию фотопластинки от возможных повреждений и придать голограмме товарный вид.

### Лабораторная работа № 3

## Пространственная фильтрация излучения с помощью объемной голограммы

**Цель работы:** Знакомство с пространственной фильтрацией излучения при помощи объемной голограммы-решетки.

**Объект исследования:** Голограммы-решетки, полученные в объемной регистрирующей среде «Диффен».

#### Задачи, решаемые в работе:

1. Измерить распределение интенсивности в падающем на голограмму считывающем пучке, а также в нулевом и дифрагированном пучках излучения при считывании голограммы в условиях Брэгга.
2. Определить ширину полосы пространственных частот, выделяемых голограммой из считывающего излучения.
3. Оценить параметры исследуемой голограммы-решетки в качестве пространственно-частотного фильтра.

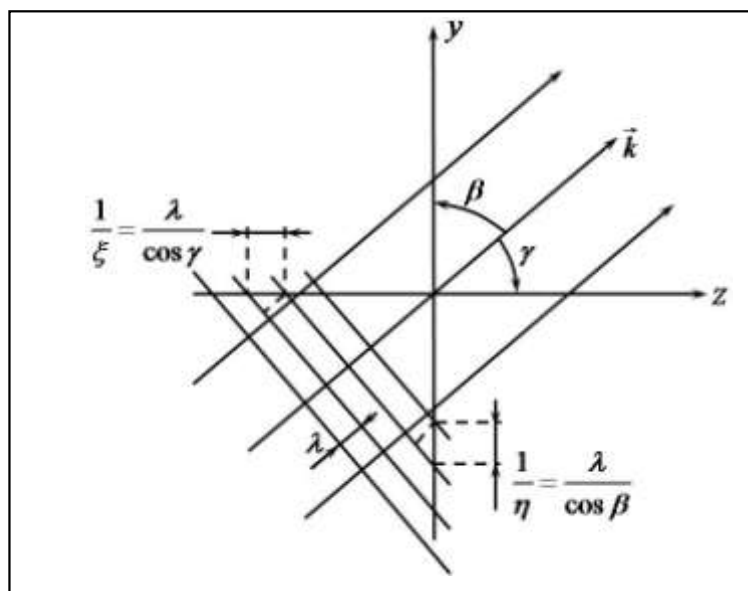
### СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

Вопрос выделения полезной информации из поступающего сигнала представляет собой комплексную задачу в любой области научно-технической деятельности и связан, как правило, с фильтрацией шумовых волн для увеличения отношения «сигнал-шум». Устройства и системы оптоинформатики, работающие в реальных условиях (особенно это относится к системам оптической обработки изображений), не только осуществляют заданные преобразования полезного сигнала, но и вносят в него определенные искажения. Применяемые системы фильтрации должны максимально подавить шумы, оставив неизменным полезный сигнал. С этой целью в радиодиапазоне широко применяются так называемые П-образные фильтры. В оптическом диапазоне для создания таких фильтров используются голограммы, которые могут работать как в качестве спектральных фильтров длин волн, так и в качестве спектральных фильтров пространственных частот.

**Пространственная частота излучения** – характеристика, определяющая направление распространения излучения в пространстве в какой-либо момент времени. Это направление для плоской монохроматической волны характеризуется тремя пространственными частотами ( $\xi$ ,  $\eta$ ,  $\zeta$ ), которые обратно пропорциональны периодам волны, измеренным по осям  $x$ ,  $y$  и  $z$ , соответственно:

$$\xi = (\cos \alpha)/\lambda; \eta = (\cos \beta)/\lambda; \zeta = (\cos \gamma)/\lambda, \quad (1)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  – углы между направлением распространения волны, т.е. волновым вектором  $\mathbf{k}$ , и осями  $x$ ,  $y$  и  $z$ , соответственно;  $\cos \alpha$ ,  $\cos \beta$  и  $\cos \gamma$  – направляющие косинусы волнового вектора распространяющегося излучения;  $\lambda$  – период волны (длина волны излучения) в направлении ее распространения;  $\lambda/\cos \alpha$ ,  $\lambda/\cos \beta$ ,  $\lambda/\cos \gamma$  период волны, измеренный в направлении осей  $x$ ,  $y$  и  $z$ , соответственно (рис.1).



**Рис.1.** Распространение плоской монохроматической волны с волновым вектором  $\mathbf{k}$  в плоскости  $yz$ .

В большинстве экспериментов пространственная частота излучения определяется относительно оптической оси системы, которая может совпадать с одной из координатных осей. Если оптическая ось системы совпадает с координатной осью  $y$ , то пространственная частота плоской монохроматической волны с волновым вектором  $\mathbf{k}$  (рис.1) относительно оптической оси будет составлять величину:

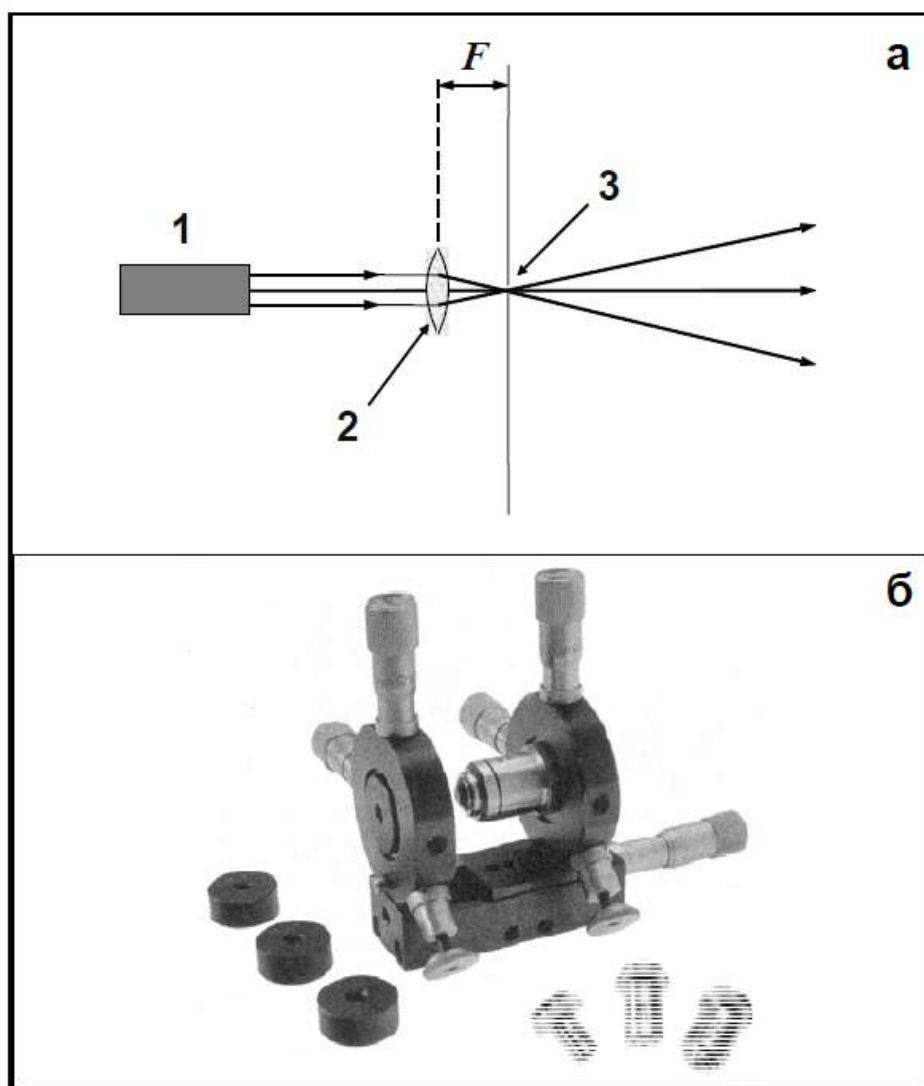
$$\eta = (\cos \beta) / \lambda \equiv \{\sin(90^\circ - \beta)\} / \lambda = (\sin \gamma) / \lambda \quad (2)$$

Пространственные частоты по осям  $y$  и  $z$  связаны между собой, т.к. сумма квадратов направляющих косинусов равна единице.

При распространении плоской монохроматической волны вдоль оптической оси, ее пространственная частота равна нулю, при распространении под углом  $90^\circ$  к оптической оси волна имеет пространственную частоту равную  $1/\lambda$ . Сферическая волна характеризуется набором пространственных частот (например, от  $1/\lambda$  до  $-1/\lambda$ ).

При использовании лазерного излучения в голографических экспериментах возникает проблема фильтрации этого излучения от шумовых волн и рассеянного излучения, образующихся на дефектах оптики, пыли и различных загрязнениях поверхностей оптических элементов. Дифракция излучения высокой когерентности на таких дефектах приводит к появлению волн, (когерентных с сигнальной волной), рассеянных под различными, в основном небольшими, углами к направлению распространения излучения. Интерференция сигнальной волны с волнами, рассеянными на дефектах, обуславливает появление крупномасштабных паразитных интерференционных структур в сформированных пучках, приводящих к нежелательным последствиям, например, к снижению отношения «сигнал-шум» в системах оптической передачи и обработки информации, возникновению шумовых структур в объеме регистрируемой голограммы и т.п.

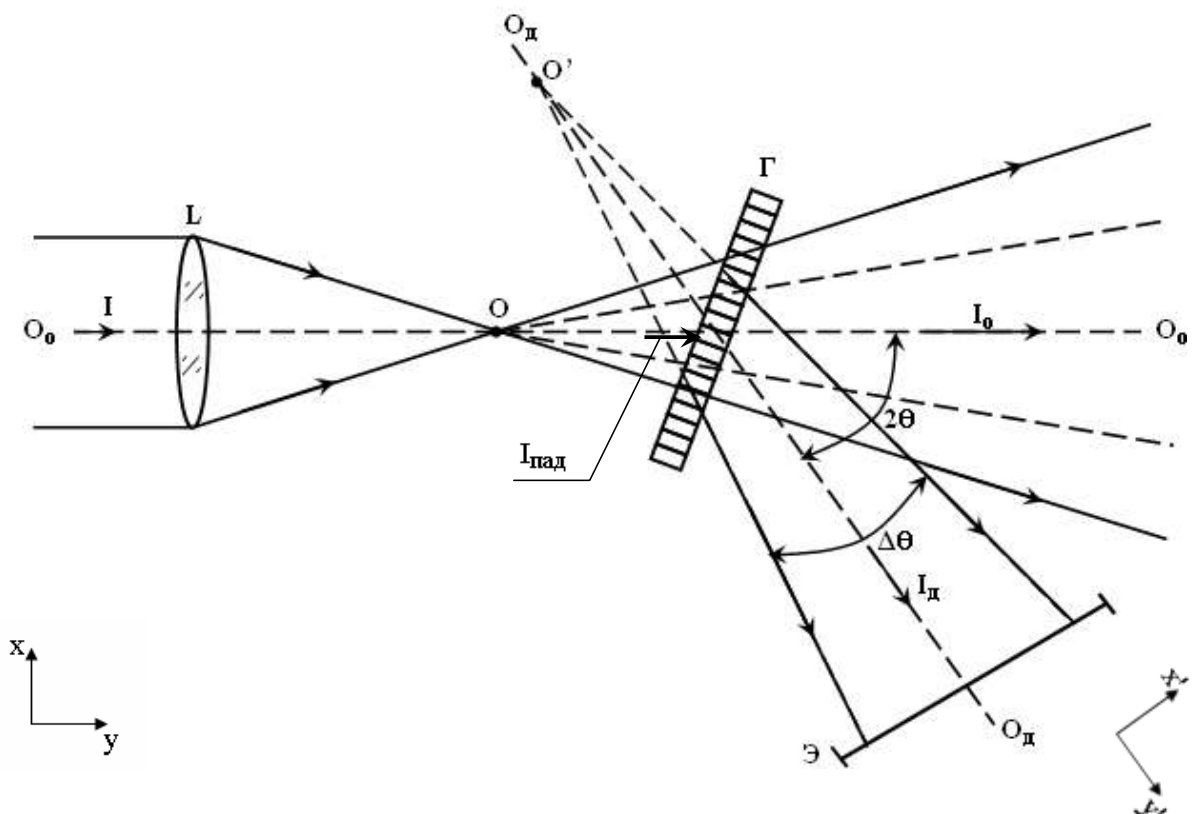
Восстановление пространственной однородности, так называемая «чистка» лазерного пучка, производится путем пространственной фильтрации излучения, например, с помощью оптико-механического узла (рис.2), состоящего из микрообъектива и точечной диафрагмы, установленной в фокальной плоскости микрообъектива. (Диафрагма в оптике представляет собой простейший пример устройства, осуществляющего пространственную фильтрацию.)



**Рис.2.**Пространственная фильтрация лазерного излучения. а – принципиальная оптическая схема: 1 – лазер, 2 – линза (микрообъектив), 3 – диафрагма; б – оптико-механический узел в сборке.

Размер диафрагмы определяется параметрами используемой оптики и требуемой степенью однородности пучка. В лабораторной практике в качестве точечной диафрагмы, как правило, используют круглые отверстия диаметром (10÷30) мкм, проколотые в металлической фольге. Пространственный фильтр с такой диафрагмой требует использования сложного механического узла: необходимо обеспечить пространственное трехкоординатное перемещение диафрагмы относительно точки фокуса микрообъектива с микронными точностями.

В настоящее время для пространственной фильтрации лазерного излучения предложен голографический фильтр на основе объемных голограмм, при использовании которого фильтрация выполняется непосредственно в исходном лазерном пучке без его фокусировки.

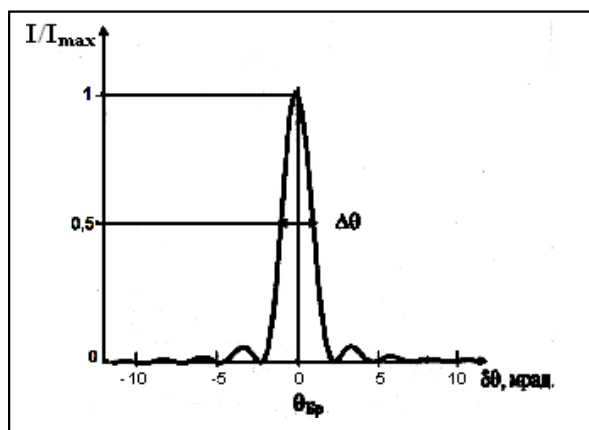


**Рис.3.** Оптическая схема для демонстрации пространственной фильтрации излучения объемной голограммой в плоскости  $xy$ : « $O - O'$ » - главная оптическая ось (ось  $y$ ); « $O_d - O'_d$ » - вспомогательная оптическая ось (ось  $y'$ );  $L$  - линза с фокусом в точке « $O$ » (« $O'$ »);  $\Gamma$  - голограмма,  $\mathcal{E}$  - экран,  $I$  - плоский монохроматический пучок излучения;  $I_{\text{пад}}$  - пучок излучения, падающий на голограмму;  $I_0$  - пучок излучения, прошедший голограмму без изменения направления;  $I_d$  - дифрагированный пучок. Вектор решетки ( $\mathbf{k}$ ) лежит в плоскости чертежа.

Принципиальную возможность осуществления пространственной фильтрации излучения объемной голограммой иллюстрирует схема, приведенная на рис.3.

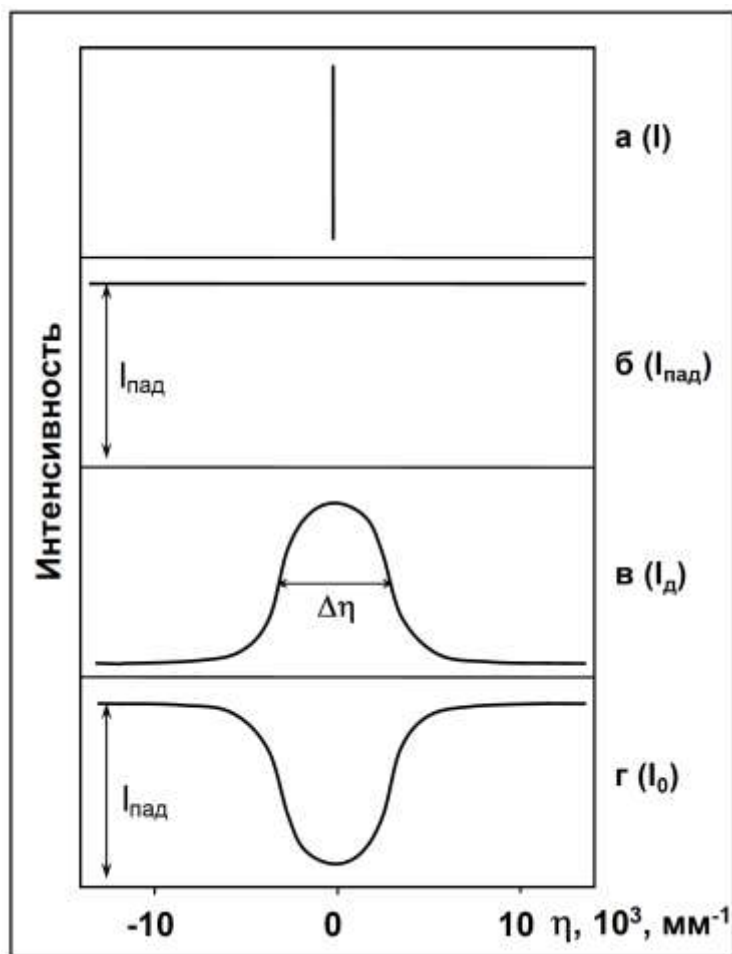
Плоский монохроматический пучок излучения ( $I$ ) распространяется по оси  $y$ , совпадающей с оптической осью « $O - O'$ », и имеет относительно этой оси пространственную частоту равную нулю ( $\eta = 0$ ). На оптической оси расположена линза  $L$  с фокусом в точке « $O$ », формирующая сферический пучок излучения с набором пространственных частот (от  $-\eta$  до  $+\eta$ ), который освещает голограмму-решетку (вектор решетки расположен в плоскости чертежа - плоскость  $xy$ ). При установке голограммы относительно падающего пучка таким образом, чтобы угол  $2\theta$  между центральным лучом

пучка, прошедшего голограмму без изменения направления ( $I_0$ ), и центральным лучом дифрагированного пучка ( $I_d$ ) соответствовал выполнению условия Брэгга данной голограммы-решетки, наблюдается максимальная интенсивность дифрагированной волны. Направление распространения максимума дифрагированной волны будем считать вспомогательной оптической осью « $O_d - O'_d$ » (осью  $y'$ ), так как на ней находится мнимый фокус ( $O'$ ) линзы  $L$ . Пространственную частоту дифрагированного излучения ( $\eta'$ ) будем измерять относительно этой вспомогательной оптической оси. На рис.4 приведено распределение интенсивности дифрагированного пучка по оси  $x'$  в угловых единицах - контур угловой селективности голограммы.



**Рис.4.** Распределение интенсивности дифрагированного излучения по оси  $x'$  в угловых единицах при считывании голограммы в «условиях Брэгга».

Спектр пространственных частот (ширина полосы) дифрагированного излучения зависит от селективных свойств голограммы и определяется ее угловой селективностью –  $\Delta\theta$  (рис.4). На рис.5 схематически показаны пространственные спектры монохроматического излучения, падающего на линзу (а); считывающего голограмму (б); дифрагированного на голограмме (в); прошедшего голограмму без изменения направления (г).

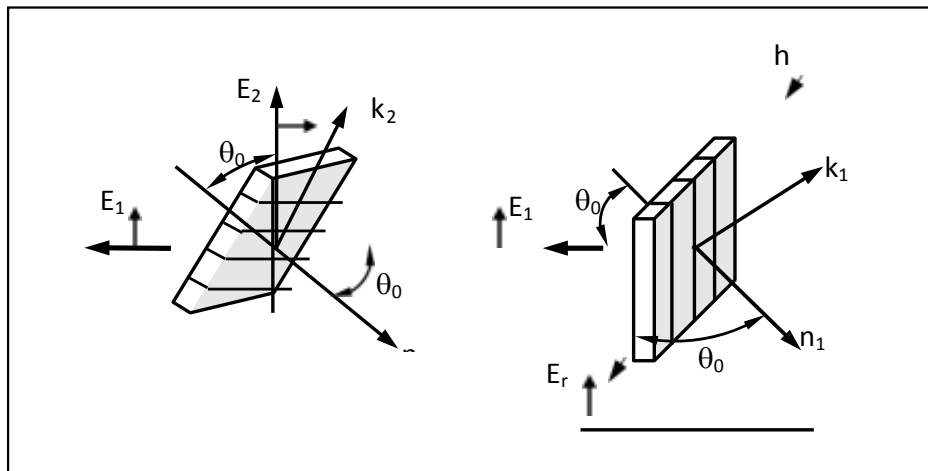


**Рис.5.** Схематическое представление спектров пространственных частот, измеренных относительно оптической оси (в соответствии со схемой рис.3): а – исходный лазерный пучок ( $I$ ); б – считывающее голограмму излучение ( $I_{\text{пад}}$ ); в – дифрагированное излучение ( $I_d$ ),  $\Delta\eta$  – ширина полосы частот дифрагированного излучения; г – излучение, прошедшее голограмму без изменения направления ( $I_0$ ). Пространственная частота дифрагированного излучения ( $\eta'$ ) определяется относительно оптической оси « $0_d-0_d$ ». Вектор решетки  $\mathbf{k}$  лежит в плоскости чертежа.

Пространственный спектр дифрагированного пучка представляет собой, как видно из приведенных на рис.5в данных, результат фильтрации излучения голограммой в плоскости  $xz$  по координате  $x$  - одной из координат поперечного сечения пучка. Оценка результативности фильтрации на заданной пространственной частоте ( $\eta$ ) в этом случае осуществляется по величине соотношения  $I_d(\eta=0) / I_d(\eta)$ .

По второй координате поперечного сечения пучка (плоскость  $xz$ , координата  $z$ ) фильтрация не осуществляется и пространственный спектр дифрагированного излучения соответствует спектру освещающего голограмму излучения, где  $I_d(\zeta=0)/I_d(\zeta) = 1$ .

Для осуществления двухкоординатной фильтрации (по двум направлениям, перпендикулярным волновому вектору распространяющегося излучения) используют узел фильтрации, включающий две объемные голограммы с неколлинеарными векторами решеток  $\mathbf{k}_1$  и  $\mathbf{k}_2$ , которые ориентированы относительно оптической оси, как показано на рис.6.



**Рис.6.** Голографический двухкоординатный фильтр пространственных частот излучения:  $n_1, n_2$  - нормали к поверхности голограммы;  $\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2$  - векторы решетки;  $\mathbf{E}_r$  - электрический вектор падающего пучка;  $\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2$  - электрические векторы дифрагированных волн.

При прохождении излучения через такой фильтр осуществляется двумерная (по двум координатам) фильтрация излучения, так как решетки имеют наклон по отношению к падающему излучению в двух взаимно перпендикулярных направлениях (векторы решеток  $\mathbf{k}_1$  и  $\mathbf{k}_2$  взаимно перпендикулярны).

Следует отметить принципиальные отличия голографического способа фильтрации излучения от фильтрации излучения с помощью точечной диафрагмы:

- голографический фильтр на основе объемных голограмм-решеток имеет только две угловые юстировки;
- фильтрация выполняется непосредственно в исходном пучке без его фокусировки, что чрезвычайно важно при использовании лазеров большой мощности.

В данной работе изучение фильтрующих свойств объемной голограммы производится на примере фильтрации излучения голограммой-решеткой по одной координате с использованием установки, принципиальная оптическая схема которой приведена на рис.3. Используемая голограмма разделяет входную информацию (в виде считывающего пучка) по пространственным частотам на два потока, направляя один в дифрагированный и другой в проходящий (нулевой) пучки.

При выполнении работы требуется определить пространственные спектры излучения освещающего голограмму, дифрагированного на голограмме и прошедшего голограмму без изменения, (см. зависимости, приведенные на рис.5), проанализировать полученные зависимости и оценить фильтрующие свойства голограммы. Для этого

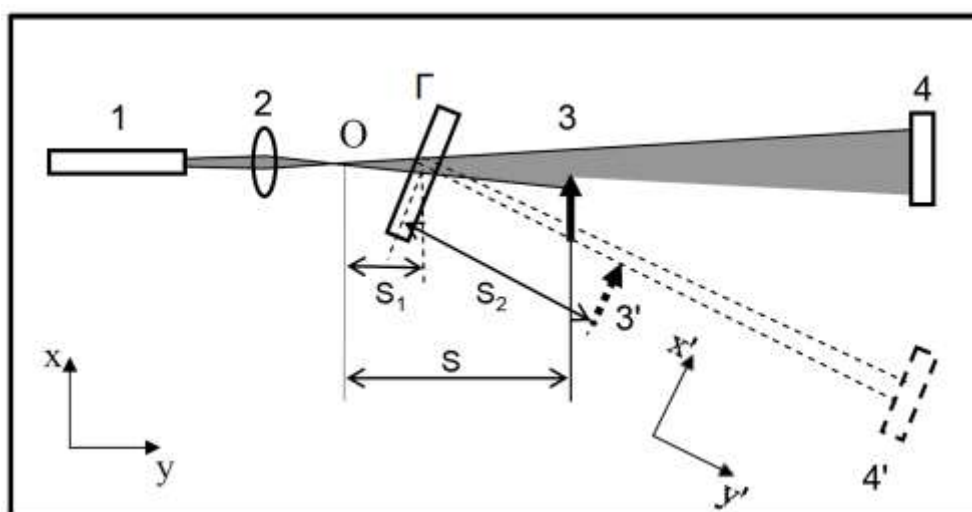
необходимо провести измерения, включающие оценку распределения интенсивности в поперечном сечении исследуемых пучков, которая может быть выполнена различными методами:

- при использовании ПЗС-матрицы для получения экспериментальных данных с последующей компьютерной обработкой результатов измерений;
- при использовании метода сканирующего ножа (двигающейся шторки) для снятия экспериментальных данных с последующей обработкой результатов измерений.

Приведенная ниже экспериментальная часть работы выполняется с использованием метода сканирующего ножа, описание которого приведено в приложении.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка для исследования пространственной фильтрации лазерного излучения при использовании метода сканирующего ножа собрана на рабочем столе, ее оптическая схема приведена на рис.7.



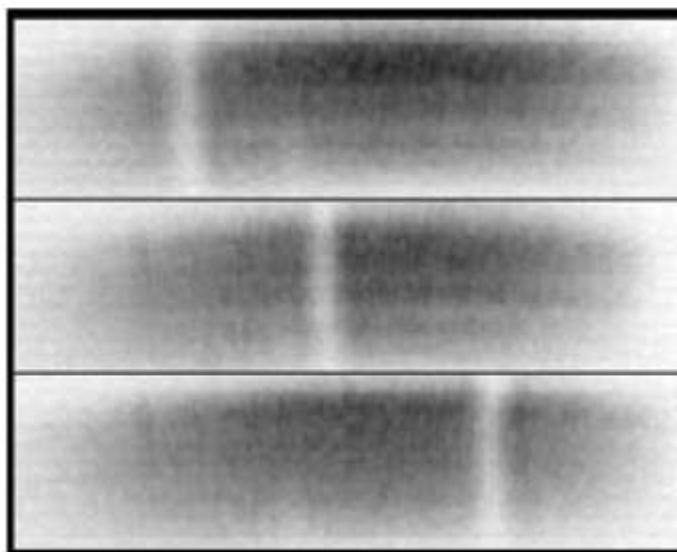
**Рис.7.** Оптическая схема установки для исследования фильтрующих свойств объемной голограммы-решетки: 1 – источник излучения (лазер), 2 – цилиндрическая линза, 3(3') – нож, 4(4') – приемник излучения; 0 – фокус линзы, Г – голограмма.

Источником излучения является полупроводниковый лазер (1). Излучение лазера попадает на цилиндрическую линзу (2), которая формирует в плоскости  $xu$  расходящийся пучок излучения с фокусом в точке «0» на оси  $y$ . Таким образом, с помощью цилиндрической линзы спектр пространственных частот лазерного излучения увеличивается в направлении оси  $x$  до величины, необходимой для исследования фильтрующих свойств голограммы в плоскости  $xu$ . Необходимость формирования определенного спектра пространственных частот лазерного излучения обусловлена тем, что при проведении данного эксперимента расходимость падающего на голограмму излучения должна быть в несколько раз больше ее угловой селективности. В направлении оси  $z$  расходимость излучения лазера при использовании цилиндрической линзы практически не изменяется.

Голограмма (Г), помещенная в кассету, устанавливается на поворотном столике, что дает возможность вращать голограмму вокруг вертикальной оси и тем самым изменять угол падения освещающего пучка на голограмму. Центр освещающего пучка должен находиться на оси вращения столика. При установке голограммы таким образом,



чтобы при ее освещении было обеспечено выполнение условия Брэгга, в пучке нулевого порядка дифракции появится темная полоса, которую можно наблюдать на экране (рис.8). Появление этой полосы обусловлено дифракцией излучения, а ее угловые размеры определяются угловой селективностью голограммы.



**Рис.8.**Нулевой порядок дифракции - наблюдение полосы, обусловленной дифракцией излучения в первый порядок (на рисунке приведено негативное изображение картины, экспериментально наблюдаемой на экране).

Измерение потока излучения производится с помощью приемника излучения (4), представляющего собой фотодиод ФД-24, соединенный с измерительным прибором (мультиметром). Так как фотодиод работает в фотогальваническом режиме, поток излучения прямо пропорционален току приемника излучения (фототоку) и измеряется по токовой шкале мультиметра в мкА. Узел приемника излучения при проведении измерений устанавливается либо в нулевой пучок (рис.7 положение 4), либо в дифрагированный (рис.7 положение 4').

Измерение распределения интенсивности в поперечном сечении лазерных пучков в данной работе производится методом сканирующего ножа, описание которого приведено в приложении. Устройство ножа и щели устанавливается на поворотном столике либо в нулевой пучок (рис.7 положение 3), либо в дифрагированный (рис.7 положение 3').

В результате проведения измерений необходимо получить пространственные спектры дифрагированного излучения (см. рис.3в) и пучков излучения, прошедших голограмму без изменения направления при установке голограммы в условиях Брэгга (см. рис.3г) и при небрэгговском считывании голограммы (см. рис.3б).

Исходные данные, необходимые для проведения расчетов:

- длина волны лазерного излучения – 0.65 мкм (уточнить у преподавателя);
- $R_{ст}$  и  $R_n$  следует измерить на установке и уточнить данные у преподавателя.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с оптической схемой установки, приведенной на рис.7: необходимо понимать назначение составляющих ее узлов, иметь представление о

- способах юстировки схемы. Полезно визуально рассмотреть образец и найти область, занимаемую голограммой на образце. Необходимо определить цену деления шкалы барабана микровинта. Подготовить таблицы для записи данных.
2. Установить голограмму на поворотном столике и, вращая ее вокруг вертикальной оси подвижкой с микрометрическим винтом, найти положение голограммы, при котором выполняется условие Брэгга для центральных лучей падающего на голограмму расходящегося пучка. При этом темная полоса в нулевом порядке, наблюдаемая на установленном в пучке экране (желательно устанавливая экран перед приемником излучения), должна находиться в центральной части пучка, как показано на рисунке 8.
  3. Поворотный столик с устройством ножа и щели установить на главной оптической оси в положение 3 (см.рис.7) таким образом, чтобы нулевой пучок проходил через ось его вращения. Установить нож на столик в рабочее положение. Необходимо убедиться, что при вращении микровинта нож полностью перекрывает и полностью открывает измеряемую часть пучка. (Это достигается перемещением микровинта приблизительно на 10 мм).
  4. Измерить радиус вращения ножа  $R_n$  и расстояние от точки фокусировки лазерного пучка цилиндрической линзой до ножа -  $S$  (см. рис.7). Результаты измерений занести в таблицу 1 в качестве исходных данных.
  5. Установить приемник излучения в положение 4 (рис.7) так, чтобы исследуемая часть нулевого пучка полностью попадала в его окно. Включить мультиметр на измерение тока.
  6. Снять зависимость потока излучения «вне ножа» от положения барабана микровинта, выбрав определенный шаг смещения  $MB$  (ориентировочно – 0,1мм). Полученные данные занести в таблицу 1 (столбцы 2 и 6). Закончив измерения, не меняя положение столика с ножом, перейти к выполнению пункта 7.
  7. Поворачивая голограмму, вывести ее из положения, при котором выполняются условия Брэгга (темная полоса должна выйти за пределы измеряемой области сечения пучка) и провести измерения распределения интенсивности в освещающем голограмму пучке ( $I_{пад}$ ), (который равномерно ослаблен голограммой). Для этого необходимо провести измерения, аналогичные п.6, но вращать микровинт столика с ножом в обратную сторону, заполняя столбец 7 таблицы 1 снизу вверх при значениях положения барабана  $MB$ , использованных для заполнения столбца 6.

Важно! Во время проведения измерений по пунктам 6 и 7 необходимо сохранять положение всех элементов схемы неизменным.

8. Вернуть исследуемую голограмму в положение, при котором выполняется условие Брэгга. Переставить приемник излучения в положение 4' (рис.7), а столик с ножом в положение 3' (рис.7). Радиус вращения ножа  $R_n$  желательно оставить без изменения, либо измерить его значение на данном этапе эксперимента, а также измерить расстояния  $S_1$  и  $S_2$  (см. рис.7) – данные занести в табл.2 в качестве исходных параметров.
9. Соблюдая условия измерения, указанные в пунктах 5 и 6 снять зависимость потока дифрагированного излучения «вне ножа» от положения барабана микровинта, выбрав определенный шаг смещения  $MB$  (ориентировочно – 0,1мм). Полученные данные занести в таблицу 2 (столбцы 2 и 6).

Важно! При проведении измерений распределения интенсивности в исследуемых пучках путем поворота столика микрометрическим винтом необходимо сохранять положение всех элементов схемы неизменным.

**Таблица 1.** Данные для определения спектра пространственных частот излучения, прошедшего голограмму без изменения направления.

Поток излучения измеряется при двух положениях голограммы: при выполнении условий Брэгга (столбец 6) и при небрэгговском считывании голограммы (столбец 7).

Исходные данные:  $R_n = \underline{\hspace{2cm}}$ ;  $S = \underline{\hspace{2cm}}$ .

№ п/п	Положение барабана МВ, мм	Смещение ножа, $L_n$ , мм	Положение ножа на оси $x$ , мм	Простр. частота, $\eta$ , $10^3$ , $\text{мм}^{-1}$	Поток излучения «вне ножа», $I_k$ , мкА	
					В Брэгге (рис.3г)	Вне Брэгга (рис.3б)
1	2	3	4	5	6	7

**Таблица 2.** Данные для определения пространственного спектра дифрагированного излучения. Освещение голограммы - при выполнении условия Брэгга.

Исходные данные:  $R_n = \underline{\hspace{2cm}}$ ;  $S_1 = \underline{\hspace{2cm}}$ ;  $S_2 = \underline{\hspace{2cm}}$ .

№ п/п	Положение барабана МВ, мм	Смещение ножа, $L_n$ , мм	Положение ножа на оси $x$ , мм	Простр. частота, $\eta$ , $10^3$ , $\text{мм}^{-1}$	Поток излучения вне ножа, $I_k$ , мкА
1	2	3	4	5	6

## ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Обработать полученные экспериментальные данные в соответствии с методическими указаниями приложения и получить распределение интенсивности в поперечном сечении исследуемых пучков излучения по координате  $x$ .
2. Рассчитать значения пространственной частоты излучения в проводимых экспериментах, полагая  $\eta = 0$  при  $x = 0$ , и используя формулу (2) и геометрию схемы измерений. Привести полученные зависимости к виду, представленному на рис.5, - получить распределение интенсивности в искомом пучке от пространственной частоты излучения – построить графики.
3. Проанализировать полученные экспериментальные результаты: сравнить пространственные спектры исследуемых пучков излучения. Определить полосу пространственных частот дифрагированного излучения, как показано на рис.5в (определение производится при уровне интенсивности 0,5 от максимального значения интенсивности излучения).
4. Оценить эффективность использования голограммы в качестве фильтра, который выделяет полезный сигнал из общего потока излучения. Оценка производится по

параметрам дифрагированного пучка с помощью формулы:

$$Д = 10 \lg \{ (I_d)_{\max} / (I_d)_{\min} \} \quad (3)$$

где  $(I_d)_{\max}$  и  $(I_d)_{\min}$  - максимальное и минимальное значение интенсивности излучения в дифрагированном пучке, которые следует выбрать в соответствии с условиями эксперимента и уточнить у преподавателя.  $(I_d)_{\max}$  – значение сигнала;  $(I_d)_{\min}$  - значение остаточной после фильтрации помехи. Эффективность выделения сигнала на фоне помехи измеряется в децибелах.

5. Оценить эффективность использования голограммы в качестве фильтра, который выделяет мешающий сигнал (например, диапазон частот излучения, включающий помеху для наблюдаемого сигнала) и удаляет его из общего потока излучения. Оценка производится по параметрам пучка нулевого порядка дифракции с помощью формулы

$$Д = 10 \lg \{ (I_o)_{\max} / (I_o)_{\min} \} \quad (4)$$

где  $(I_o)_{\max}$  и  $(I_o)_{\min}$  - максимальное и минимальное значение интенсивностей в нулевом (недифрагированном) пучке, которые следует выбрать в соответствии с условиями эксперимента и уточнить у преподавателя. Эффективность подавления помехи измеряется в децибелах.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Понятие пространственной частоты. Ее физический смысл.
2. Какой спектр пространственных частот имеют плоская и сферическая волны?
3. Какой элемент измерительной схемы (кроме голограммы) можно считать фильтром пространственных частот?
4. Как меняется качество фильтрации при изменении дифракционной эффективности голограммы?

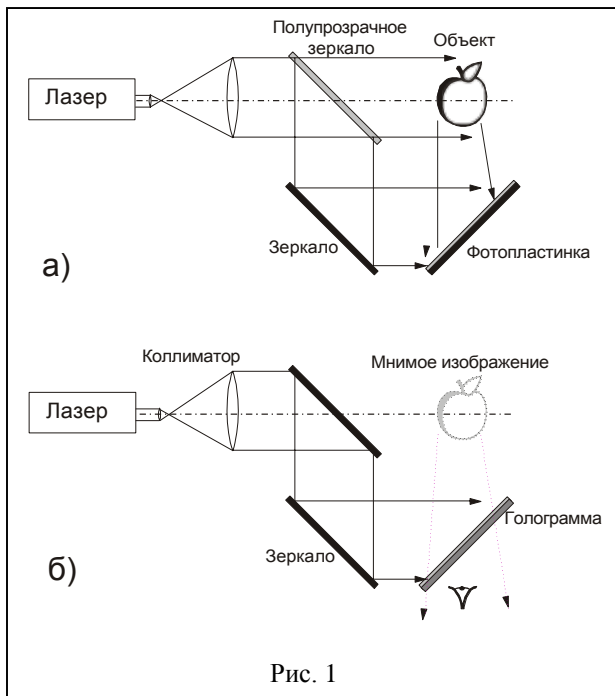
## Лабораторная работа № 4

### Голографическая интерферометрия

*Цель работы* – освоение методик записи голограмм, восстановления и обработки голографических изображений при интерференционных измерениях; определение влияния длины и времени когерентности излучения лазера на качество голограммы.

*Голографическая интерферометрия* [2, 23] служит для измерения характеристик деформаций, вибраций, отклонений от эталона и других смещений, значения которых имеют порядок длины волны лазера. Голографические интерферометры, работающие в реальном времени, менее критичны к стабильности и качеству изготовления отдельных деталей, чем их неголографические аналоги. Уникальным свойством голографии является возможность записывать множество изображений на одну и ту же голограмму, причем при восстановлении они интерферируют как независимые волновые фронты. Эта способность записывать волновые фронты за различное время, а также тот факт, что теперь в интерферометрии можно использовать произвольные волновые фронты, сделали голографический подход гораздо более гибким, чем классический. К достоинствам голографической интерферометрии, как метода ОНК, относятся также бесконтактность, высокая чувствительность, возможность контроля объектов, имеющих относительно большие поверхности, в том числе и диффузно-отражающие, что невозможно в классической интерферометрии.

На рис.1 изображены схемы записи (рис. 1а) и восстановления (рис. 1б) голограммы, т.е. записи светового поля, образовавшегося при интерференции двух когерентных полей: поля, рассеянного объектом контроля (ОК), и поля лазерного пучка. В отличие от обычной фотографии голограмма содержит информацию не только об амплитуде, но и о фазе световой волны.



Регистрация голограммы на фотопластинке производится за счет вариации показателя преломления или оптической толщины светочувствительного слоя, коэффициента пропускания или отражения этого слоя. При этом используются разнообразные светочувствительные материалы: галогенсеребряные фотопленки и фотопластинки, органические фотоэмульсии, халькогенидные стекла, диэлектри-

ческие и полупроводниковые кристаллы и другие.

В процессе записи и восстановления голограмм сильное влияние на их качество оказывает степень когерентность светового пучка источника излучения (лазера). Мерой временной когерентности являются *длина когерентности*  $l_{ког}$ , определяемая как длина цуга волн, испускаемых источником света без разрыва фазы, или *время когерентности*  $\tau_{ког}$ , связанное с  $l_{ког}$  соотношением

$$l_{ког} = c\tau_{ког}, \quad (1)$$

где  $c$  – скорость света. Время когерентности, в свою очередь, связано с частотным интервалом  $\Delta\nu$ , в котором осуществляется генерация когерентного цуга излучения (шириной линии генерации)

$$\tau_{ког} \approx 1/\Delta\nu. \quad (2)$$

При записи и восстановлении голограммы разность хода опорного и предметного пучков не должна превышать  $l_{ког}$ , в противном случае вместо интерференционной картины на ней будет зафиксировано простое сложение интенсивностей этих пучков. Таким образом, если излучение лазера содержит некогерентную составляющую, то на голограмме возникает равномер-

ный фон, который ухудшает контраст интерференционной картины, т.е. качество голограммы.

Различают два *основных метода* голографической интерферометрии: метод двойной экспозиции, используемый при анализе статических деформаций ОК, и метод двух предметных полей, который пригоден для исследования динамических деформаций.

*Метод двойной экспозиции* заключается в том, что на одну и ту же пластинку двумя экспозициями, последовательно записываются голограммы от объекта, находящегося в исходном и деформированном состояниях. При этом суммарная экспозиция должна находиться в пределах линейного участка характеристической кривой фотоземлюли. При освещении такой

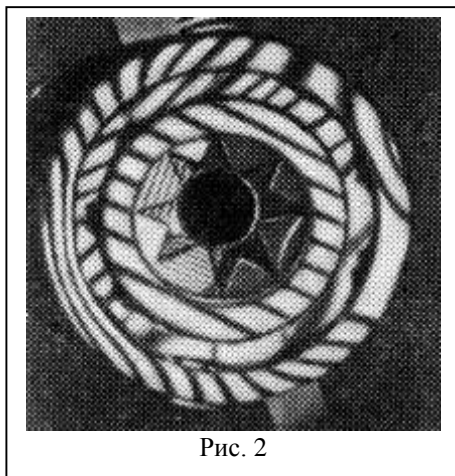


Рис. 2

сложной голограммы опорной волной возникают два световых поля, одно из которых отвечает недеформированному объекту (эталоны), а другое – деформированному. В силу когерентности этих полей они интерферируют между собой, создавая на изображении эталона интерференционную картину, которая соответствует деформациям объекта. В качестве примера на рис. 2 [24] показана голографическая интерферограмма картины напряжений в нагруженном шарикоподшипнике.

В *методе двух предметных полей* голограмму недеформированного ОК помещают в то место, где она экспонировалась. Объект контроля и источник излучения также оставляют на прежних местах. При освещении ОК и голограммы опорным пучком в пространстве за голограммой совмещаются и интерферируют две предметных волны: та, что идет непосредственно от объекта и восстановленная голограммой. Если теперь каким-либо образом деформировать ОК, то фазовые искажения рассеянной им волны, отразятся на интерференционной картине. На объекте, рассматриваемом через голограмму, возникнут интерференционные полосы, которые позволяют судить о характере и значениях деформаций ОК в различные моменты времени. Сказанное иллюстрирует рис. 3 [24], на котором изображен прозрачный деформированный объект, покрытый сетью интерференционных полос. У идеального объекта интерференционные полосы проходили бы параллельно.

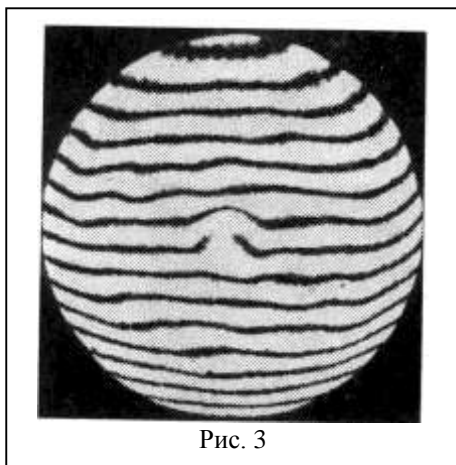


Рис. 3

### Методика выполнения работы

В лабораторной работе реализована схема метода двойной экспозиции. В качестве модели объекта контроля выбрано плоское зеркало. При этом «деформации» ОК соответствует небольшой поворот зеркала в пространстве. Теперь предметная и опорная волны в схеме записи (рис.1а) являются плоскими. Если эти волны сходятся под углом  $\psi$ , то голограмма представляет собой дифракционную решетку с периодом

$$d = \frac{\lambda_p}{2 \sin(\psi/2)}, \quad (3)$$

где  $\lambda_p$  - длина световой волны при регистрации голограммы.

Осветим эту голограмму плоской световой волной с длиной  $\lambda_v$ . Тогда на экране будет наблюдаться дифракционная картина (рис. 4), максимумы

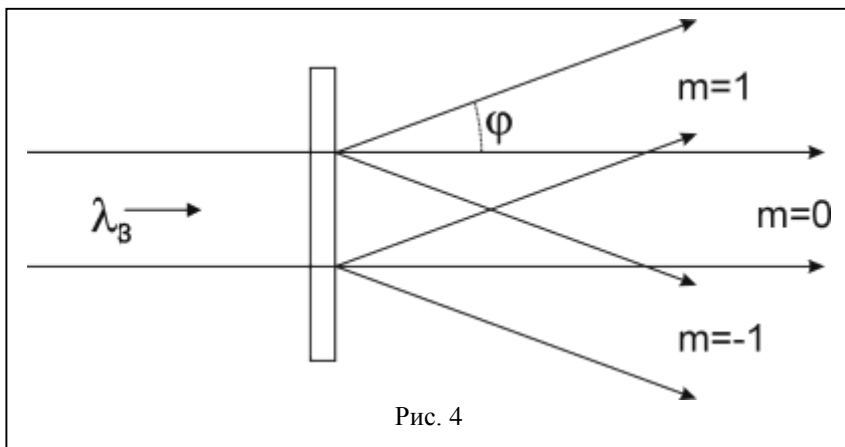


Рис. 4

интенсивности в которой находятся под углами дифракции  $\varphi$ , определяемыми соотношением  $d \sin \varphi = m \lambda_v$ , где  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$  - порядки дифракции. По мере возрастания порядка дифракции интенсивность дифракционных максимумов резко ослабевает. Решетка, которая, как в нашем случае, имеет синусоидальное распределение, максимумов выше первого



порядка практически не создает. Поэтому для определения периода записанной на голограмме дифракционной решетки ограничимся измерением угла  $\varphi$  между направлениями распространения волн нулевого и первого порядка. Тогда для искомого периода получим формулу:

$$d \equiv \frac{\lambda_0}{\sin \varphi}. \quad (4)$$

Небольшой поворот зеркала («деформация» ОК), т.е. изменение угла схождения предметной и опорной волн при записи дифракционной решетки, приведет к изменению ее периода. Следовательно, изменится и угловое расстояние между максимумами первого и нулевого порядка в картине восстановления голограммы.

Применение метода двойной экспозиции позволяет зарегистрировать на одной светочувствительной пластинке две дифракционные решетки, соответствующие двум углам схождения предметной и опорной волн. При освещении такой голограммы плоской волной в каждом дифракционном порядке восстанавливаются две волны, дифрагировавшие под разными углами. Небольшие изменения углов схождения  $\Delta \varphi$  и дифракции  $\Delta \varphi$  связаны соотношением

$$\Delta \psi = \Delta \varphi \sqrt{1 + \frac{1 - \left( \frac{\varphi_p}{\varphi_0} \right)^2}{1 + \left( \frac{\varphi_p}{\varphi_0} \right)^2}}. \quad (5)$$

В данной работе голограмма записывается на тонком слое халькогенидного стеклообразного полупроводника (ХСП), нанесенного на стеклянную пластинку. Достоинствами ХСП как материала для записи голограмм являются высокое пространственное разрешение (до 5000 лин/мм), значительная чувствительность к коротковолновому излучению (с длиной волны 0,5 мкм), получение голограммы без предварительной химической обработки материала, а также возможность многократного повторения цикла записи-стирание.

Длина когерентности лазера  $l_{\text{ког}}$  измеряется в работе путем наблюдения за ухудшением контраста интерференционной картины при увеличении разности длин плеч интерферометра Майкельсона вплоть до полного исчезновения полос. Удвоенную (за счет двойного прохода лучом плеча интерферометра) разность хода, при которой полосы исчезают, можно считать приближенно равной  $l_{\text{ког}}$ .

Основой лабораторной установки является измерительная голографическая установка УИГ-22К, состоящая из голографического стола и лазеров: аргонового ЛГН-503 и гелий-неонового ЛГН-111. Первый из них используется для записи голограмм благодаря относительно высокой выходной мощности (1 Вт в непрерывном режиме) и длине волны, лежащей в

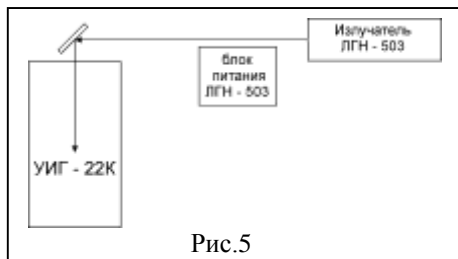


Рис.5

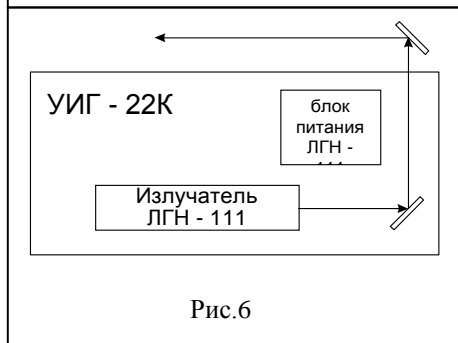


Рис.6

сине-зеленой области спектра ( $\lambda_p = 0,488$  мкм). Его недостаток – высокая потребляемая мощность (около 10 кВт), что требует двухконтурной системы водяного охлаждения. Расходимость излучения лазера ЛГН-503 – порядка десятых долей миллирадиана, накачка осуществляется путем возбуждения ионов аргона столкновениями в плазме дугового разряда. Лазер ЛГН-111 применяется для восстановления голограмм ( $\lambda_b = 0,6328$  мкм).

Структурная схема установки показана на рис. 5 (вид сверху) и рис. 6 (вид сбоку). Подвижная плита голографического стола расположена на пневматических подушках, защищающих

установку от воздействия внешних вибраций. На плите собираются измерительные схемы при помощи комплекта оптических элементов и сменных держателей. Лазер ЛГН-111 расположен на подвижной полке голографического стола, лазер ЛГН-503 – на стойке рядом с установкой УИГ-22К. Лучи лазеров выводятся на голографический стол с помощью зеркал, укрепленных в поворотных головках.

### Порядок выполнения работы

1. Изучить принцип работы и устройство лазеров ЛГН-503 и ЛГН-111 по их техническим описаниям.
2. Контроль влияния внешних условий на работу установки
- 2.1. Собрать на голографическом столе интерферометр Майкельсона, оптическая схема которого показана на рис. 8.7. В состав интерферометра входят: 1 – призма-куб, 2 – зеркала, 3 – линза, 4 – экран.

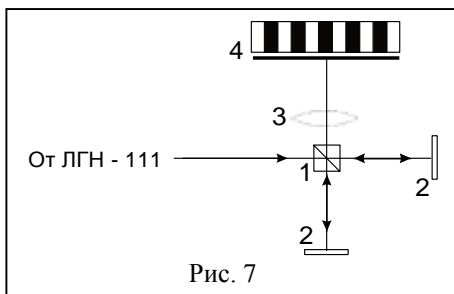
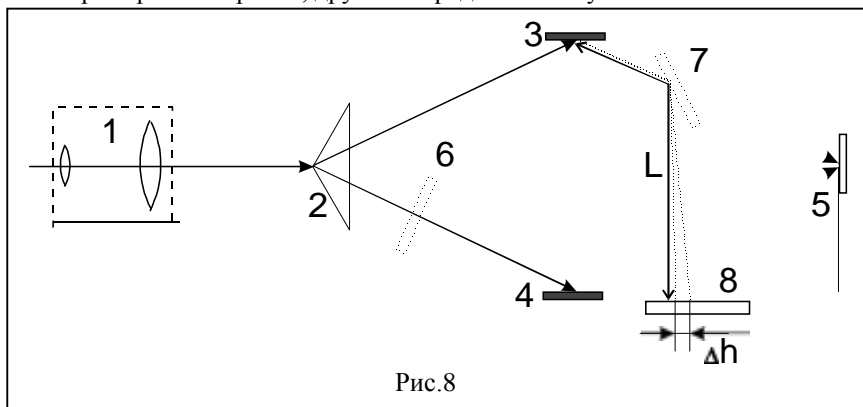


Рис. 7

- 2.2. Установить тумблер «Сеть» блока питания ЛГН-111 в положение «Вкл.». При этом должна загореться сигнальная лампочка, а через 1 – 3 с – появиться лазерное излучение.
- 2.3. Регулируя поворотными винтами юстировочных головок положение зеркал в плечах интерферометра, добиться появления на экране интерференционной картины, состоящей из 4 - 6 полос и визуально оценить ее устойчивость. Окружающие условия считаются пригодными для работы установки, если смещение интерференционных полос не превышает одной восьмой периода полос. В противном случае следует устранить причину вибраций (выключить вентиляцию или другое оборудование, создающее вибрации).
- 2.4. Выключить тумблер «Сеть» блока питания ЛГН-111.
3. Определение длины когерентности лазера ЛГН-111
- 3.1. Модернизировать схему интерферометра Майкельсона (рис. 7) таким образом, чтобы одно из его зеркал имело возможность перемещения с сохранением интерференционной картины (т.е. наложения на экране отраженных обоими зеркалами пучков) в диапазоне разности длин плеч интерферометра от 0 до 10-15 см. Для этого направляющая, по которой перемещается зеркало, должна быть установлена параллельно лазерному лучу, а тот, в свою очередь, должен быть параллелен поверхности стола УИГ.
- 3.2. Повторить операции п. 2.2.
- 3.3. Добиться максимального контраста интерференционной картины небольшими перемещениями подвижного зеркала относительно точки, для которой плечи интерферометра одинаковы. Отметить это положение по линейке на столе УИГ как  $l_1$ . Медленно перемещая зеркало от делительного кубика, наблюдать ухудшение контраста интерференционной картины вплоть до полного ее исчезновения. Отметить это положение по линейке на столе как  $l_2$ . Вычислить разность  $l_2 - l_1 = l_{\text{ког}}$ .
- 3.4. Повторить п.3.3 несколько раз, определить среднее значение длины когерентности  $l_{\text{ког}}$  и погрешность ее измерения.
- 3.5. Используя формулы (1) – (2), вычислить время когерентности, ширину линии излучения лазера и оценить погрешности их измерения.
4. . Запись голограммы
- 4.1. Собрать на голографическом столе оптическую схему записи голограммы (рис. 8). В ее состав входят: 1 – коллиматор, 2 – светоделительная призма, 3 – зеркало управления предметным лучом, 4 – зеркало управления опорным лучом, 5 – экран, 6 – непрозрачный экран, 7 – вспомогательное зеркало, 8 – вспомогательный экран.

Луч лазера ЛГН-503 направляется вдоль оптической оси коллиматора, увеличивающего диаметр луча, и делится призмой на два луча. Один из них играет роль опорного, другой – предметного пучка.



4.2. Включить лазер ЛГН-503, соблюдая следующую последовательность операций.

- 4.2.1. Подать воду из водопроводной магистрали в систему охлаждения; установить ручку потенциометра «Ток разряда» на передней панели блока питания в крайнее левое положение.
- 4.2.2. Установить выключатель сети в положение «Вкл», при этом должны загореться сигнальные лампочки «А», «В», «С».
- 4.2.3. Нажать кнопку «Охлаждение», должен заработать двигатель насоса и загореться сигнальная лампочка «Охлаждение вкл».
- 4.2.4. Нажать кнопку «Накал», должна загореться сигнальная лампочка «Накал».
- 4.2.5. Через 3 мин нажать кнопку «Анод», вольтметр на передней панели блока питания должен показать напряжение холостого хода не менее 500 В, а показания амперметра «Ток соленоида» должны быть в пределах 2,5 - 5 А.
- 4.2.6. Через 30 с нажать кнопку «Поджиг» и удерживать ее до появления излучения лазера, при этом должна загореться сигнальная лампочка «Поджиг есть».
- 4.2.7. Регулируя поворотными винтами юстировочных головок положение зеркал 3 и 4, совместить на экране отметки предметного и опорного лучей. Перекрыть затвором луч лазера ЛГН-503. Убрать экран и на его место установить светочувствительную пластинку.

- 4.3. Открыть затвор лазера ЛГН-503 и экспонировать голограмму в течение времени, указанного преподавателем. Перекрыть излучение лазера ЛГН-503 затвором.
- 4.4. В канале опорного луча установить непрозрачный экран 6, а в канале предметного луча - вспомогательное зеркало 7. Открыть затвор лазера ЛГН-503. Регулируя винтами положение зеркала 7, направить предметный луч на экран 8. Отметить на экране положение центра пучка.
- 4.5. Регулировкой положения зеркала 3 добиться смещения центра предметного пучка на экране на величину  $\Delta h = 3 \dots 5$  мм. Закрыть затвор лазера. Измерить расстояние  $L$  между зеркалом 3 и экраном вдоль луча лазера. Убрать зеркало 7.
- 4.6. Открыть затвор лазера ЛГН-503 и провести второе экспонирование голограммы в течение времени, указанного преподавателем. Закрыть затвор лазера.
- 4.7. Выключить лазер ЛГН-503, для этого проделать следующее
  - 4.7.1. Нажать последовательно кнопки «Анод» и «Стоп», через 3 мин отключить систему охлаждения нажатием кнопки «Охлаждение».
  - 4.7.2. Установить выключатель напряжения сети в нижнее положение, перекрыть подачу воды в систему охлаждения.
5. . Восстановление и обработка голографического изображения
  - 5.1. Собрать на голографическом столе оптическую схему восстановления изображения (рис. 9), в состав которой входят: 1 – голограмма, закрепленная в универсальном держателе, 2 – экран.
  - 5.2. Включить лазер ЛГН-111 и регулировкой положения голограммы добиться появления на экране дифракционных максимумов нулевого и высших порядков.
  - 5.3. Измерить расстояние  $R$  между голограммой и экраном и расстояния  $r_1$

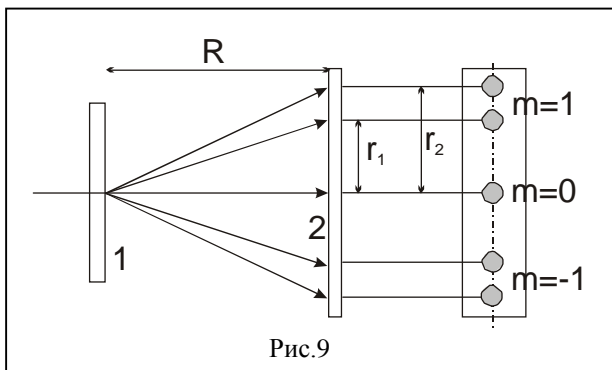


Рис.9

и  $r_2$  между дифракционными максимумами нулевого и первого порядка, соответствующими двум экспозициям голограммы.

5.4. Выключить лазер ЛГН-111.

5.5. Рассчитать угол дифракции и угловое смещение дифракционного максимума первого порядка с помощью соотношений

$$\varphi = \arctg \frac{r_1}{R}, \quad \Delta\varphi = \frac{r_2 - r_1}{R} \quad (6)$$

5.6. С помощью соотношений (4) – (6) рассчитать период дифракционной решетки и изменение угла схождения опорной и предметной волн  $\Delta\psi$ . Сравнить рассчитанный угол с его экспериментальным значением, которое определяется из соотношения

$$\Delta\psi = \Delta h/L.$$

Оценить погрешность измерений.