

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}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.

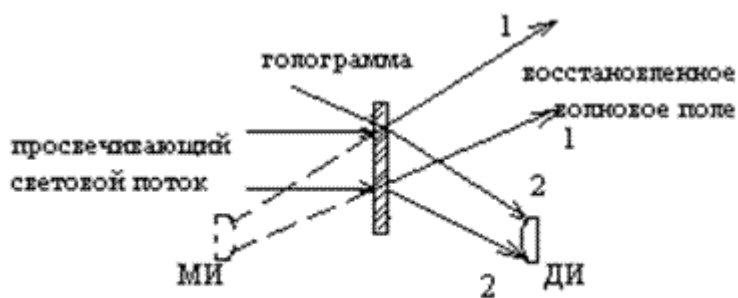


Рис. 2

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.

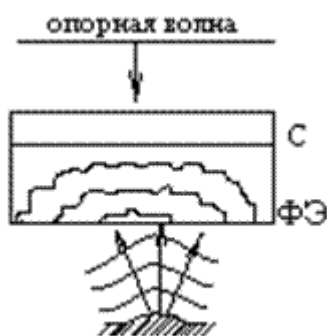


Рис. 3

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.

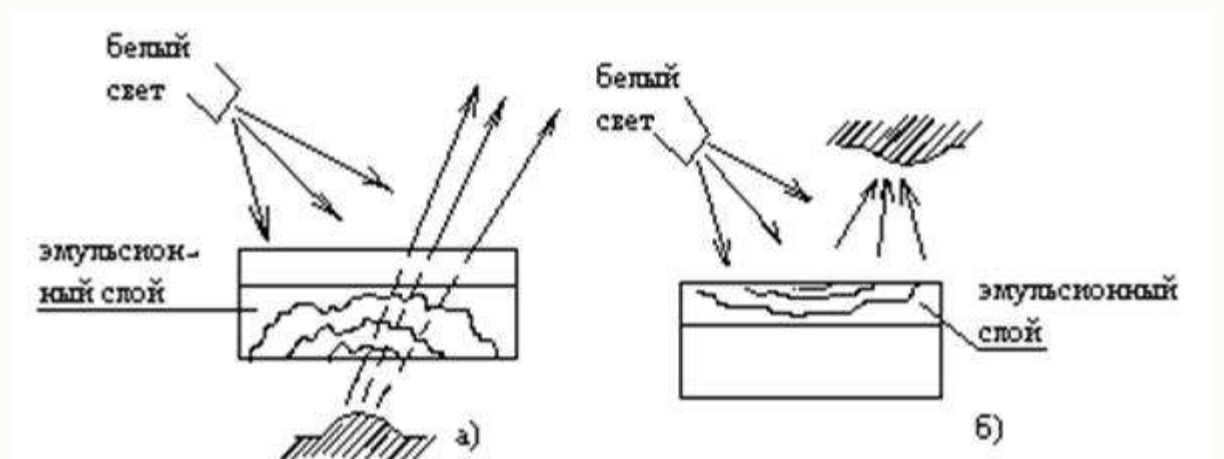


Рис. 4

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 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.

Основные характеристики объемных голограмм

Цель работы: Знакомство с основными характеристиками трехмерных голограмм и их экспериментальным определением.

Объект исследования: Пропускающие голограммы-решетки, имеющие различную толщину и зарегистрированные на одной пространственной частоте.

Задачи, решаемые в работе:

1. Ознакомиться с методикой измерения и оценки основных параметров голограммы.
2. Измерить и оценить параметры голограмм-решеток, имеющих одинаковый период, но различную толщину.
3. Оценить толщину и селективность виртуальных голограмм с различной пространственной частотой и степенью объемности.
4. Проанализировать полученные результаты с точки зрения влияния толщины и пространственной частоты голограммы-решетки на ее селективность и степень объемности; результаты анализа оформить в виде вывода.

СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

Перед началом работы необходимо ознакомиться с определениями и значениями следующих терминов, приведенных в терминологическом словаре данного пособия: *голограмма, пропускающая голограмма, двумерная голограмма, трехмерная голограмма, фазовая голограмма, селективность, условие Брэгга, дифракционная эффективность, пространственная частота голограммы.*

Трехмерные голограммы, толщина (T) которых намного превышает их период ($T \gg d$), обладают характерными свойствами, обуславливающими их широкое применение и использование; в первую очередь, это – формирование только одного порядка дифракции и селективность. На рисунке 1 схематически показано основное различие двумерных и трехмерных голограмм, определяемое соотношением между толщиной голограммы и ее периодом.

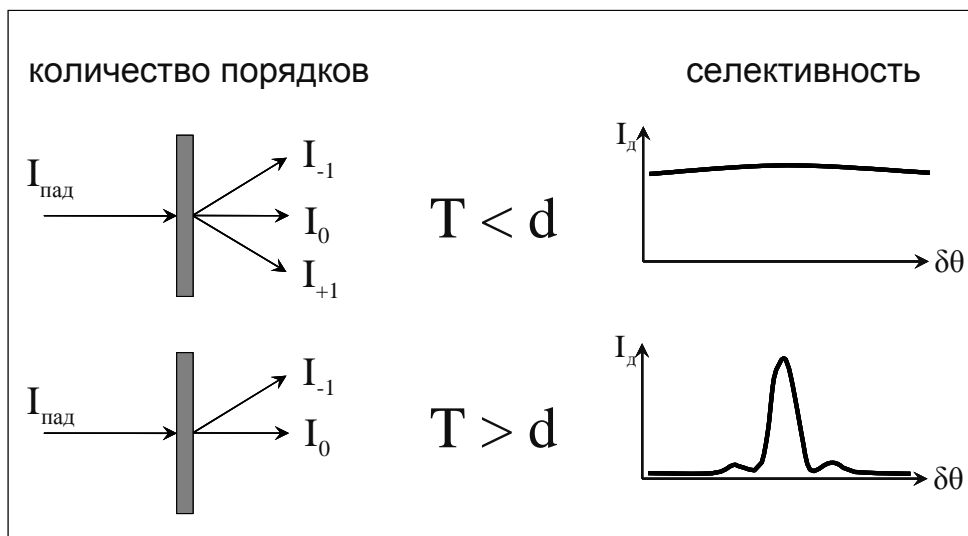


Рис.1. Влияние толщины регистрирующей среды на свойства голограмм (селективность продемонстрирована на примере угловой селективности).

При рассмотрении свойств трехмерных голограмм именно толщина является одним из определяющих параметров – в зависимости от величины T различают тонкослойные трехмерные голограммы (с толщиной менее 20 мкм) и объемные голограммы (с толщиной более 1 мм). Толщина и пространственная частота голограммы определяют степень объемности голограммы – важный для практики параметр. Как правило, вопрос о степени объемности голограммы решается экспериментально по наличию +1-го и высших порядков дифракции и их эффективности. В качестве теоретического критерия степени объемности для голограмм-решеток используют параметр Клейна

$$Q = 2\pi\lambda T / (nd^2) \quad (1),$$

где λ – длина волны излучения, T – толщина голограммы, d – пространственный период голограммы, иначе, период зарегистрированной интерференционной картины ($d=1/v$, где v – пространственная частота голограммы), n – средний показатель преломления голограммы (для голограмм, используемых в работе, $n=1,5$). Объемные голограммы обладают высокой селективностью – угловой ($\Delta\theta$) и спектральной ($\Delta\lambda$). Чем выше величина $T \cdot v$ для данной голограммы, тем выше ее селективность и меньше значения $\Delta\theta$ и $\Delta\lambda$. Таблица Т.1 иллюстрирует основные различия между двумерными, трехмерными тонкослойными и объемными голограммами.

Исследование селективности голограмм в данной работе производится на примере исследования угловой селективности –

проводится измерение контура угловой селективности голограмм (-1)-го порядка дифракции и дается оценка угловой селективности данной голограммы ($\Delta\theta$).

Таблица Т.1. Сравнение свойств двумерных и трехмерных голограмм.

Свойство голограммы	Двумерная голограмма (2D)	Трехмерная голограмма (3D)	
		Тонкослойная	Объемная
Количество порядков дифракции	≥ 2	1	1
Селективность	Не обладают селективностью	Селективность имеется	Селективность высокая
Степень объемности, Q, (по Клейну)	<10	10 – 1000	>1000

Для используемых в работе голограмм-решеток связь между основными параметрами определяется с помощью формул теории связанных волн:

$$\Delta\theta = 2,8n_0 / (\pi\nu T) \quad (2),$$

где n_0 - показатель преломления среды,

T - толщина голограммы,

ν - пространственная частота голограммы

Толщина голограммы, определенная расчетным путем по формуле (2), называется эффективной толщиной голограммы - $T_{\text{эф}}$, в отличие от геометрической толщины ($T_{\text{геом}}$), измеренной в физическом эксперименте. Эффективная толщина голограммы может не совпадать с геометрической толщиной из-за неравномерности распределения оптических параметров голограммы по ее толщине. Как правило, $T_{\text{эф}} \leq T_{\text{геом}}$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для измерения параметров голограммы используется установка, оптическая схема которой приведена на рисунке 2.

Освещение голограммы производится коллимированным монохроматическим излучением полупроводникового лазера (ИИ) с длиной волны $\lambda = 650$ нм.

Голограмма (Γ) располагается на столике, позволяющем осуществлять поворот образца вокруг вертикальной оси с необходимой точностью. Вращение столика осуществляется микрометрическим винтом (МВ). Излучение лазера должно проходить через ось вращения столика. Приемник излучения (ПИ) подключен к измерительному прибору – мультиметру. Если нет дополнительных рекомендаций преподавателя, следует работать по шкале измерения токов (А). Показания амперметра прямо пропорциональны потоку излучения, падающему на приемник излучения. Для определения дифракционной эффективности измерения потока излучения проводятся в двух положениях приемника излучения: (1) и (3). При измерении контура угловой селективности приемник излучения находится в положении (3).

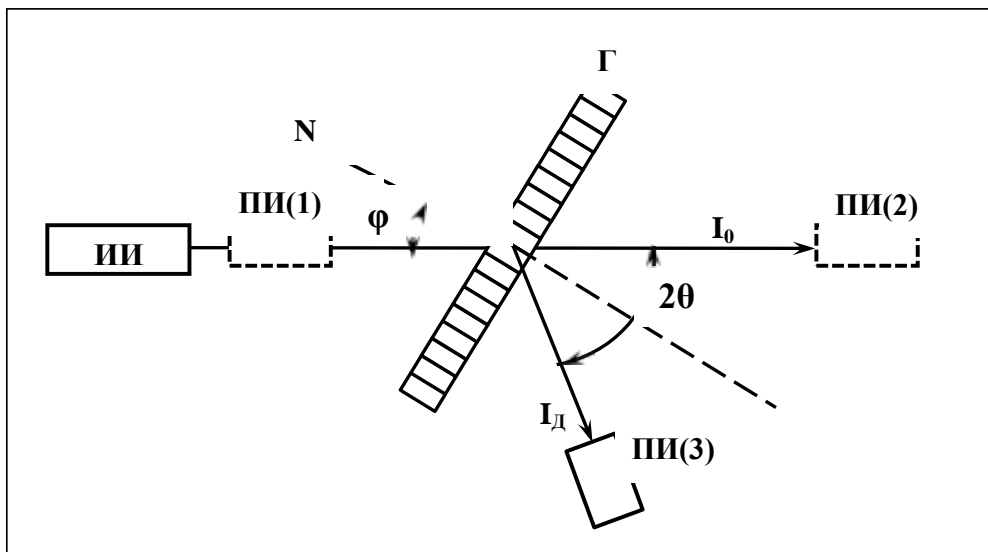


Рис.2. Оптическая схема установки для измерения дифракционной эффективности и контура угловой селективности пропускающей голограммы-решетки. ИИ – источник излучения; ПИ – приемник излучения, который может быть установлен в положения 1,2,3; Γ – голограмма; N – нормаль к поверхности голограммы; I_0 и I_d – нулевой и дифрагированный пучки излучения; φ – угол поворота образца относительно падающего пучка; 2θ – угол между нулевым и дифрагированным пучками излучения.

В работе необходимо провести измерения дифракционной эффективности и контуров угловой селективности исследуемых голограмм; рассчитать значения угловой селективности, эффективной толщины, параметра объемности исследуемых голограмм и виртуальных голограмм и проанализировать полученные результаты.

Сравнение контуров угловой селективности голограмм с различной толщиной, близких по параметрам к используемым в данной работе, приведено на рис.3. Как видно, сравнение удобно проводить, если каждый контур нормирован на «1» и сориентирован по углу Брэгга ($\theta_{\text{бр}}$). Из данных, приведенных на рис.3 видно, что наиболее высокой селективностью обладает голограмма №1 ($\Delta\theta$ – минимально), а голограмма №3 – неселективна (в рассматриваемом диапазоне углов поворота голограммы значение I_d не меняется).

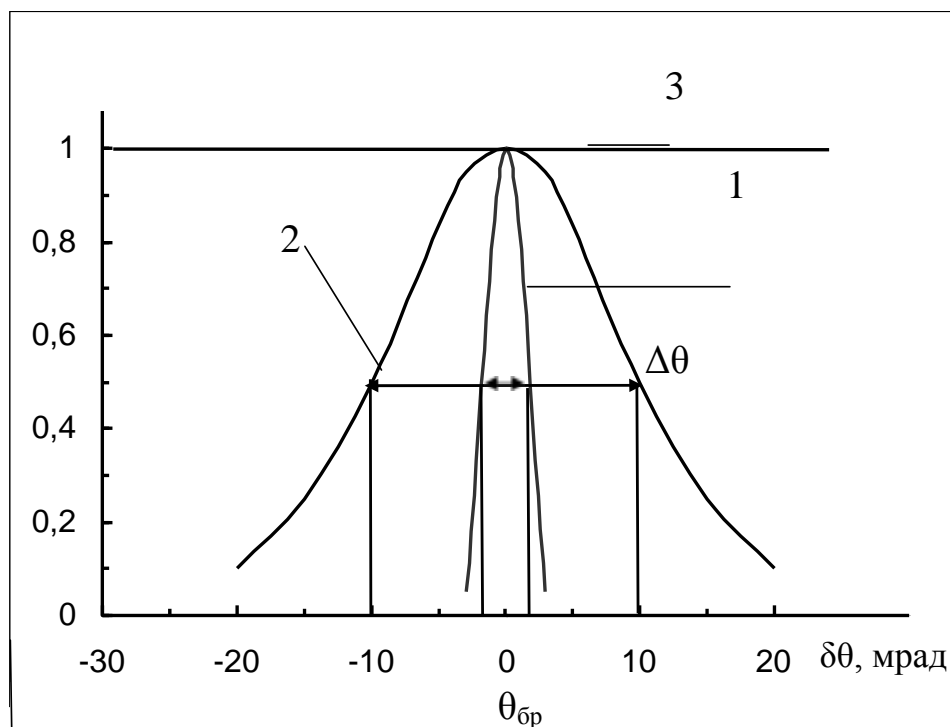


Рис.3. Сравнение контуров угловой селективности голограмм с различной толщиной, нормированных на «1» и сориентированных по углу Брэгга ($\theta_{\text{бр}}$); $\delta\theta$ – отклонение от угла Брэгга; $\Delta\theta$ – угловая селективность голограмм.

Исходные данные, необходимые для проведения расчетов и оформления отчета по работе, следует определить в эксперименте и уточнить у преподавателя:

- номер исследуемого образца и голограммы,
- длина волны лазерного излучения,
- угол между нулевым и дифрагированным пучками - 2θ , (определить самостоятельно в эксперименте),

- пространственная частота исследуемой голограммы - ν , мм^{-1} , (рассчитать, используя угол 2θ и условие Брэгга),
- цена деления барабана микрометрического винта в угловых единицах - q , рад/мм, (определить, измерив расстояние от вертикальной оси вращения столика с голограммой до горизонтальной оси вращения сердцевинки микровинта).

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с экспериментальным стендом и принципиальной оптической схемой установки для проведения измерений параметров пропускающих голограмм-решеток (см. Приложение 1).
2. Включить источник излучения и установить экран за поворотным столиком для наблюдения пучков излучения.
3. Установить образец №1 (№2; №3) на поворотный столик таким образом, чтобы излучение лазера попадало на исследуемую голограмму.
4. Поворачивая голограмму относительно падающего излучения, найти положение, при котором дифрагированное излучение имеет максимальную яркость при визуальном контроле.
5. Проанализировать картину дифракции, наблюдаемую на экране и проидентифицировать наблюдаемые порядки дифракции (I_0 , I_1 , I_2 и т.д.)

Измерение дифракционной эффективности

1. Подготовить таблицу 1 для записи результатов измерений.
2. Установить приемник излучения в положение «3», соответствующее измерению интенсивности дифрагированного пучка (-1)-го порядка (см. рис.1). Проверить перпендикулярность положения фотоприемника относительно падающего пучка.
3. Поворачивая голограмму относительно падающего пучка, найти максимальное значение интенсивности дифрагированного пучка - I_d и записать его. (Измерения проводятся по шкале мультиметра «А»)
4. Установить фотоприемник в положение «1» и измерить интенсивность падающего излучения - $I_{\text{пад}}$.
6. Если имеются несколько порядков дифракции, определить аналогичным образом значение дифракционной эффективности наиболее ярких из них, например, +1 и ± 2 порядков, при положении голограммы, в котором производились измерения ДЭ (-1)-го порядка. Уточнить задание у преподавателя.

7. После измерения ДЭ голограммы необходимо, не изменяя юстировку голограммы относительно падающего пучка, провести измерение контура угловой селективности данной голограммы.

Таблица 1. Измерение дифракционной эффективности голограмм

№	№ дифр. порядка	Поток излучения при $\theta = \theta_{бр}$, I, мкА		ДЭ, %
		$(I_d)_{max}$	$I_{пад}$	
1	2	3	4	5
Голограмма №1 Образец №_____				
Голограмма №2 Образец №_____				
Голограмма №3 Образец №_____				

Измерение контура угловой селективности

Измерения контуров угловой селективности проводятся для всех голограмм только в (-1) порядке дифракции !

1. Подготовить таблицу 2 для записи результатов измерений контура угловой селективности. Данные измерений по каждой голограмме заносить в отдельную таблицу: таблицы 2-1; 2-2; 2-3.
2. Установить фотоприемник в положение (3) (см.рис.1) для измерения интенсивности дифрагированного пучка (-1)-го порядка дифракции.
3. Определить цену деления барабана микрометрического винта (МВ) в угловых единицах (q , рад/мм), измерив расстояние от вертикальной оси вращения столика с голограммой до горизонтальной оси вращения сердцевинки микрометрического винта. Занести результат в исходные данные к таблице 2.
4. Определить диапазон углов поворота, необходимый для построения контура угловой селективности данной голограммы и рассчитать, с каким шагом необходимо проводить измерения, чтобы при построении контура имелось 20-30 экспериментальных точек. Провести измерение контура угловой селективности голограммы, заполнив столбцы 1 и 2 таблицы 2.*

* При измерении контура угловой селективности голограммы №1 заполняются столбцы 1 и 2 таблицы 2-1.

При измерении контура угловой селективности голограммы №2 заполняются столбцы 1 и 2 таблицы 2-2.

При измерении контура угловой селективности голограммы №3 заполняются столбцы 1 и 2 таблицы 2-3. Учитывая низкую селективность данной голограммы, оценку селективности проводить по измерениям интенсивности дифрагированного пучка (I_d) в диапазоне углов поворота голограммы не более 25-30 миллирадиан.

Таблица 2-1. Данные для построения контура угловой селективности голограммы №1.

Исходные данные: цена деления барабана MB - $q = \underline{\hspace{2cm}}$ радиан/мм (или $q^1 = \underline{\hspace{2cm}}$ рад/деление MB).

Отсчет по барабану MB, N_i , мм	Интенсивность дифрагированного пучка		$\delta\theta$, рад
	I_i , мкА	$(I_d)_{отн} = I_i / I_{max}$	
1	2	3	4

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

1. Рассчитать значения ДЭ для исследуемых голограмм в соответствующих дифракционных порядках, используя формулу

$$ДЭ = I_d / I_{пад} \quad (3).$$

Данные занести в табл.1.

2. Рассчитать значения $(I_d)_{отн}$, заполнив столбец 3 в таблицах 2-1, 2-2, 2-3.
3. Рассчитать $\delta\theta$ для каждой голограммы, заполнив столбец 4 в таблицах 2-1, 2-2, 2-3. Расчет производить с учетом следующих факторов: при величине $(I_d)_{отн} = 1$ выполняются условия Брэгга для дифракции излучения на голограмме, при этом $\theta = \theta_{бр}$, и, следовательно, $\delta\theta = 0$, и $N_i = N_0$. Тогда значение $\delta\theta$ для всех остальных значений N_i можно вычислить, используя формулу:

$$\delta\theta = (N_i - N_0) \cdot q \text{ [радиан]} \quad (4),$$

где рекомендуется использовать $(N_i - N_0)[\text{мм}]$ и $q \text{ [радиан/мм]}$.

4. Построить графики зависимости $I_d(\delta\theta)$ для каждой голограммы и определить $\otimes\theta$ для каждой из них. Данные занести в табл.3. В ~~се~~ привести график, аналогичный приведенному на рис.3.

5. Рассчитать $T_{эфф}$ для каждой исследуемой голограммы, используя формулу (2). Данные занести в таблицу 3. Для голограммы 3 значение T^* уточнить у преподавателя.
6. Рассчитать параметр объемности Q для каждой исследуемой голограммы, используя формулу (1). Данные занести в таблицу 3.
7. Рассчитать аналогичным образом неизвестные параметры модельных двумерных и трехмерных голограмм, заполнив таблицу 3.
8. Проанализировать полученные результаты и сделать выводы о влиянии толщины голограммы и ее пространственной частоты (периода решетки) на такие параметры, как селективность голограммы и параметр объемности.

Таблица 3. Сравнение параметров пропускающих голограмм

	Голограмма	$v, \text{мм}^{-1}$	Кол-во дифр. порядков	$\Delta\theta$, рад	$T_{эфф}$	Q , параметр объемн.
Исследуемые голограммы	1	360	1	?	?	?
	2	360	1	?	?	?
	3	360	>2	?	T^*	?
Виртуальные голограммы	Двумерная (2D)	360	>2	$>90^0$?	≤ 10
	Трехмерная (3D)	360	1	?	?	≥ 10
	Двумерная (2D)	1500	>2	?	?	≤ 10
	Трехмерная (3D)	1500	1	?	?	≥ 10
	Объемная (3D)	360	1	?	?	≥ 1000
	Объемная (3D)	1500	1	?	?	≥ 1000

* Значение T^* уточнить у преподавателя.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие типы голограмм Вы знаете, и чем они отличаются друг от друга?
2. Как изменяется характер дифракции монохроматического излучения на объемной голограмме-решетке при изменении длины волны?
3. Что такое «селективность голограммы»?
4. Может ли быть разная угловая селективность у объемных голограмм-решеток с одинаковой толщиной?
5. Как влияет на селективность голограммы-решетки изменение периода решетки?

Получение изобразительных голограмм по методу Ю.Н. Денисюка

Цель работы: знакомство с основными свойствами голограмм путем самостоятельного получения изобразительной голограммы Денисюка.

Задачи, решаемые в работе:

1. Ознакомиться с основами голографического метода записи и воспроизведения информации; типами голограмм и их основными свойствами.
2. Ознакомиться с установкой для регистрации голограмм и требованиями к оптическим элементам голографической схемы для получения изобразительных голограмм по методу Ю.Н. Денисюка.
3. Подготовить объект (композицию) и установить его в голографическую схему; подготовить оптическую схему и установку для регистрации голограммы.
4. Получить голограмму выбранного объекта: зарегистрировать голограмму на фотопластинке, провести химико-фотографическую обработку фотоматериала, высушить полученную голограмму.
5. Определить условия освещения голограммы для получения максимального визуального эффекта при наблюдении изображения объекта. Проанализировать различия зрительного восприятия объекта в трех ситуациях:
 - При рассматривании объекта, освещаемого монохроматическим светом;
 - При наблюдении изображения объекта с помощью голограммы, освещаемой монохроматическим светом;
 - При наблюдении изображения объекта с помощью голограммы, освещаемой «белым» светом.

СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

При подготовке к работе необходимо ознакомиться с терминами и их толкованием, которые приведены во второй части пособия: **голография, голограмма, объектная (предметная) волна, опорная (референтная) волна, голограмма отражательная, голограмма трехмерная (объемная), голографическая установка, Денисюка**

голограмма, динамический диапазон воспроизведения градации яркости объекта, регистрация голограммы (запись голограммы), изобразительная голография.

Голограммы, используемые для зрительного (визуального) эстетического восприятия и 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., получение которых производится по методу, предложенному русским ученым Юрием Николаевичем Денисюком.



Ю.Н.Денисюк. 27.07.1927 – 14.05.2006

Ю.Н.Денисюк – выдающийся русский ученый, основоположник объемной голографии – нового направления в физике. Вся жизнь и деятельность Ю.Н.Денисюка неотделимы от развития голографии – научно-технического направления второй половины XX века, признанным лидером которой он являлся в течение последних десятилетий. Ю.Н.Денисюк внес существенный вклад в становление и развитие голографии не только в России и в СССР, но и во всем мире.

Голограмма Денисюка, впервые полученная автором в 1962 г. на прозрачных галогенидосеребряных 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 и заложила фундамент нового направления в физике – объемной голографии, или голографии в трехмерных средах.

Изобразительные голограммы, получаемые по методу Ю.Н.Денисюка, наглядно и зрелищно демонстрируют основные свойства и особенности голограмм. В первую очередь это свойства, связанные с возможностью восстановления объектной волны, неотличимой зрительным аппаратом человека от исходной объектной волны (волны, сформированной объектом). Именно идентичность исходной объектной волны и волны, полученной при освещении голограммы, позволяет получить объективную информацию о пространственной форме и структуре поверхности объектов. Голограмма представляет собой оптическую копию объекта, так как с точки зрения наблюдателя «голографическое» изображение объекта при определенных условиях наблюдения неотличимо от оригинала.

За счет чего при рассматривании «голографического» изображения объекта возникает убеждение в реальности наблюдаемого объекта?

1. За счет «эффекта оглядывания», который всем опытом нашей повседневной жизни убеждает нас в реальности происходящего. Стереоскопическое, бинокулярное зрение подтверждает это убеждение. Информация, записанная каждым отдельным 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 [1-3].
2. Правильная передача градаций яркости объекта в «голографическом» изображении позволяет наблюдать игру бликов на объекте при его оглядывании, что создает эффект присутствия реального объекта, недостижимый другими методами получения изображений и известными изобразительными средствами.

«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 которой информации мы так доверяем, и основан механизм воссоздания образов с помощью голограммы.» [1,3].

С помощью изобразительных голограмм легко можно продемонстрировать уникальное свойство делимости голограммы, связанное с возможностью восстановления объектной волны каждым отдельным, сколь угодно малым, участком голограммы (при условии, что при записи голограммы каждая точка объекта освещала всю поверхность регистрирующей среды). При наблюдении изображения объекта голограмма для наблюдателя является своего рода "окном" в пространство объекта – при уменьшении "окна" усложняются и ухудшаются условия наблюдения, но иллюзия действительности сохраняется.

Изобразительные голограммы незаменимы при демонстрации такого явления как «Обращение волнового фронта» (ОВФ), которое в традиционной оптике реализуется, как правило, только для простых волновых фронтов (плоского и сферического) и ряда конкретных экспериментальных ситуаций. На рис.2 приведены схемы наблюдения изображений объекта, сформированных исходной объектной волной и сопряженной, имеющей ту же форму, что и исходная, но распространяющуюся в противоположном направлении. При использовании исходной опорной волны наблюдается мнимое ортоскопическое изображение объекта, с определенным распределением разности фаз объектной волны на его поверхности. При использовании сопряженной опорной волны наблюдается действительное псевдоскопическое изображение объекта. Разность фаз объектной волны на поверхности действительного изображения соответствует по абсолютной величине разности фаз на поверхности ортоскопического мнимого изображения, но имеет противоположный знак. Это приводит к тому, что в псевдоскопическом действительном изображении выпуклости выглядят вогнутостями и наоборот, а тень «гуляет» перед объектом, а не позади него.

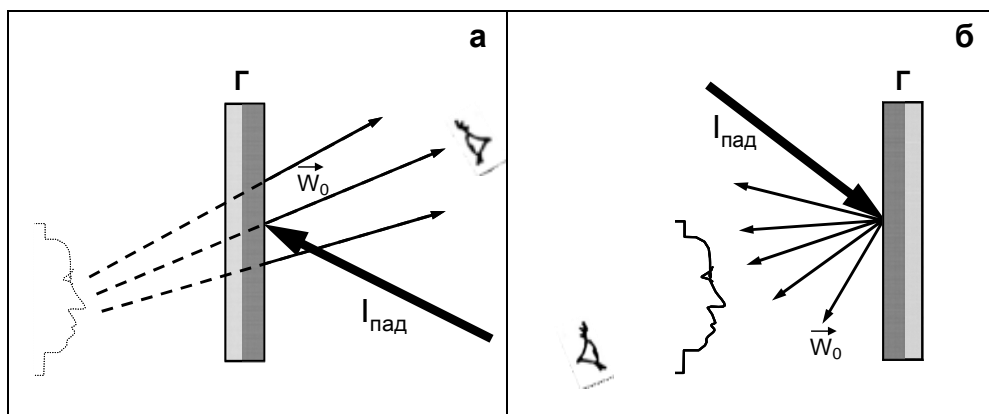


Рис.2. Наблюдение изображения объекта с помощью голограммы Денисюка при использовании исходной опорной волны (а) и обращенной (б). $I_{\text{пад}}$ – падающая на голограмму волна, предназначенная для считывания информации; W_0 – восстановленная объектная волна, формирующая при наблюдении мнимое (а) и действительное (б) изображение объекта.

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». [2,4]

Схема записи голограммы Денисюка (см. «Денисюка голограмма») относится к так называемым однолучевым голографическим схемам, при использовании которых опорный пучок освещает объект и формирует

объектную волну. Использование однолучевой схемы регистрации голограмм имеет существенные преимущества:

- Необходимо наличие только одного пучка излучения требуемого качества.
- Необходимо обеспечить высокую стабильность только одного узла, который формирует интерференционную картину, т.е. узла «объект-регистрирующая среда», который можно соединить в один элемент голографической установки. При этом требования к стабильности остальных элементов схемы сильно снижаются.

На рис.3 приведена принципиальная схема, используемая для регистрации голограмм Денисюка. Узел источника излучения (1) обеспечивает необходимые параметры излучения и формирует опорный пучок. Узел «объект - регистрирующая среда» (2,3) обеспечивает стабильность регистрирующей среды относительно объекта (или наоборот). Существенно то, что каждый узел является достаточно независимым по целому ряду параметров и обеспечению стабильности.

Для получения изобразительных голограмм по методу Ю.Н.Денисюка используют лазеры различных типов как непрерывного действия, так и импульсные. При этом необходимо, чтобы лазеры обладали длиной когерентности L , обеспечивающей установку объекта на заданном расстоянии от регистрирующей среды, которое не должно превышать $L/2$. Наиболее широко для получения монохромных изобразительных голограмм используют газовые лазеры на смеси He-Ne, которые обладают высокой степенью когерентности (обеспечивающей длину когерентности десятки см), малой расходимостью и высокой степенью поляризации излучения. Для расширения коллимированного пучка He-Ne лазера обычно используется схема, приведенная на рис.4.

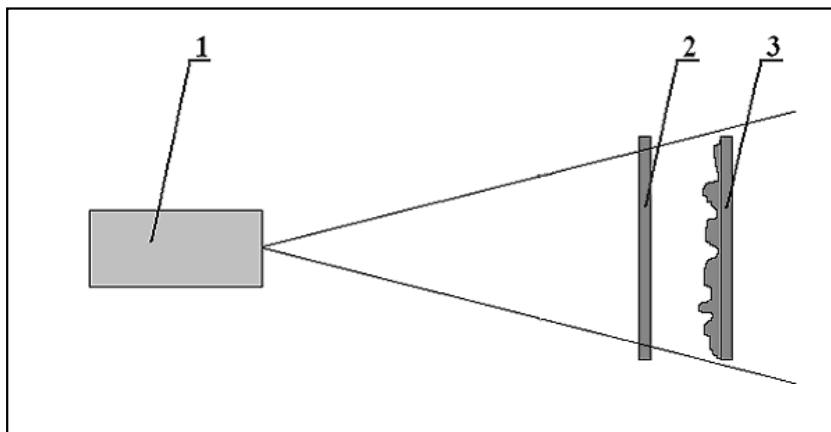


Рис.3.Принципиальная схема записи голограмм Денисюка: 1 – узел источника излучения с системой формирования пучка; 2 - регистрирующая среда (фотопластинка), 3 – объект-композиция.

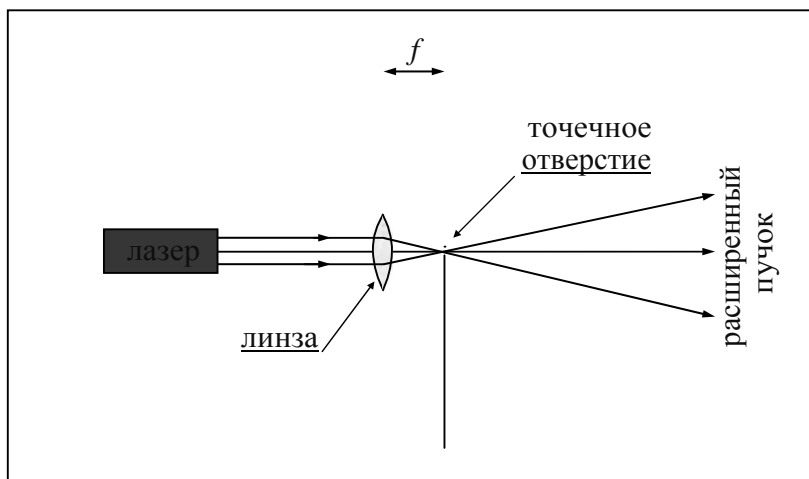


Рис.4.Схема, используемая для расширения коллимированного пучка лазерного излучения: формирование сферического пучка и его фильтрация с помощью точечной диафрагмы.

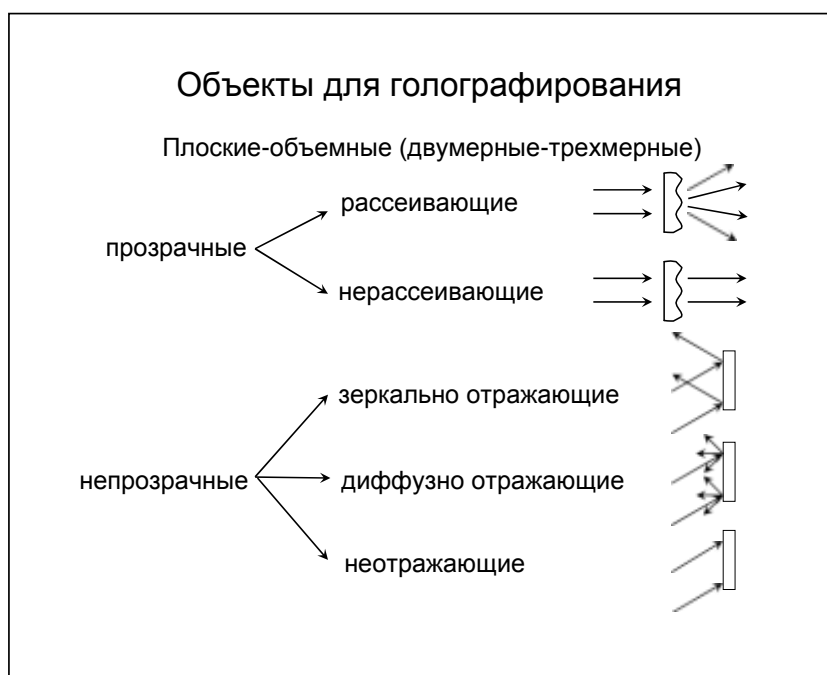
При получении голограмм Денисюка расстояние между интерференционными полосами сравнимо с длиной волны используемого излучения. Во время регистрации голограммы (ее экспонирования) сдвиг фотопластинки (или любого другого регистрирующего материала) должен быть существенно меньше, чем значение наибольшей пространственной частоты регистрируемой интерференционной картины, т.е. не превышать долей длины волны. Для крепления регистрирующей среды 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 применяют специальные меры: устанавливают систему пневматических амортизаторов; помещают в ванну с песком 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 интерферирующих пучков делают как можно меньше.

Для уменьшения влияния нестабильности следует 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.

Свойства объектной волны во многом определяются не только формой, но и оптическими характеристиками объектов для голографирования, которые в самом общем виде представлены в таблице 1. Как известно, свойства голограмм проявляются наиболее полно при условии, что излучение, рассеянное каждой точкой объекта, освещает всю поверхность голограммы. Поэтому важной характеристикой рассеивающего объекта является его индикатриса рассеяния (см. рис.5). Приведенные характеристики важны при выборе объекта для голографирования в конкретных экспериментальных условиях. Для регистрации голограмм Денисюка используют, как правило, непрозрачные объекты, имеющие и зеркальную и диффузную составляющие в рассеянном излучении, структура которого определяет возможность получения различных визуальных эффектов при наблюдении изображений с помощью голограммы.

Таблица 1. Характеристики объектов для голографирования.



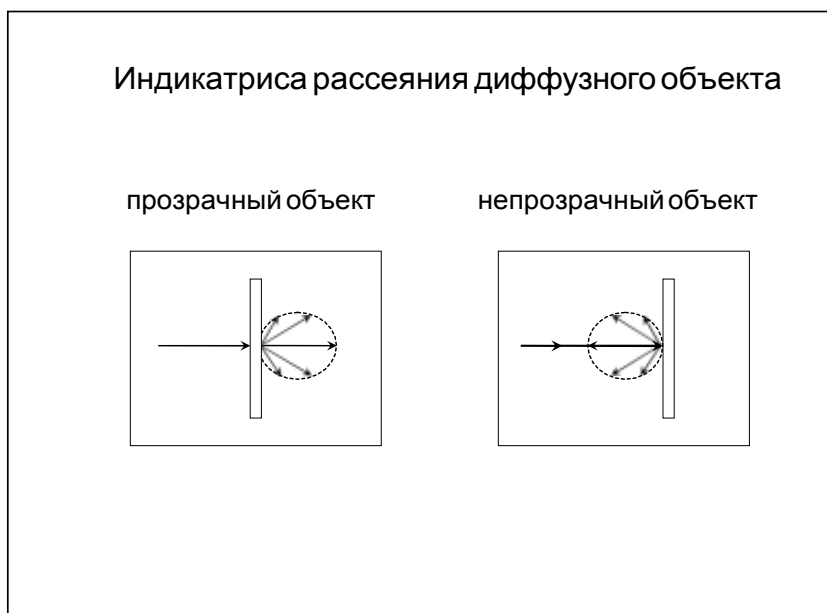


Рис.5. Индикатриса рассеяния прозрачного и непрозрачного объектов.

Регистрирующая среда для получения голограмм Денисюка должна обладать необходимыми характеристиками, главными из которых являются:

- разрешение, обеспечивающее в конкретном эксперименте запись интерференционной картины с периодом $\lambda/2$;
- спектральная чувствительность к длинам волн используемого лазера;
- чувствительность, обеспечивающая необходимую длительность экспонирования в данном эксперименте;
- размер, соответствующий условиям конкретного эксперимента.

Наблюдение изображений объектов при считывании изобразительных голограмм, полученных по методу Денисюка, как правило, не предусматривает сложных и дорогостоящих источников излучения для освещения голограммы. Обычно используют источники «белого» света с малым телом накала; лампы накаливания с оптической системой, моделирующей форму опорного пучка излучения определенной расходимости. Оптимальные условия наблюдения «голографического» изображения предоставляет излучение Солнца.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Оптическая схема экспериментальной установки, используемой в работе, представлена на рис.6. Схема размещается на плите-основании, где устанавливаются рейтеры (держатели) с оптическими элементами и платформа для объекта-композиции. Объект-композиция собирается на платформе и устанавливается в схему перед регистрацией голограммы.

При выборе объектов для голографирования необходимо учитывать целый ряд факторов, главные из которых перечислены ниже.

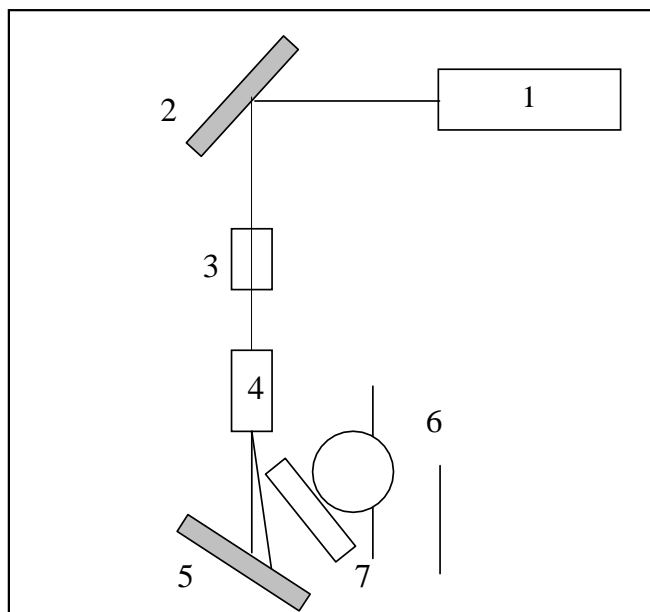


Рис.6. Принципиальная оптическая схема для получения голограмм по методу Ю.Н.Денисюка. 1 – лазер; 2,5 – зеркала; 3 – затвор; 4 – система формирования пучка; 6 – объект-композиция; 7 – регистрирующая среда (фотопластинка).

Объект, предназначенный для голографической съемки (голографирования), 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.;
- достаточно высоким коэффициентом отражения, чтобы контраст записываемой интерференционной картины позволял получить высокую эффективность дифрагированного пучка, создающего изображение;

- иметь диффузную составляющую в отраженном излучении достаточную, чтобы реализовать возможности голографического метода, а именно: излучение, рассеянное отдельной точкой объекта, должно полностью освещать регистрирующую среду.

Следует иметь ввиду, что объекты из дерева, пластмассы, бумаги не получают, т.к. во время регистрации происходит сдвиг отдельных деталей и элементов структуры этих объектов и интерференционная картина “размывается”.

Регистрирующая среда, используемая в работе – фотопластинки ПФГ-03 производства объединения «Славич» (Россия, г.Переяславль-Залесский). Размер фотопластинок определяется размером объекта и условиями регистрации и выбирается из стандартных размеров, которые выпускает изготовитель фотоматериалов. Обычно используют фотопластинки размером 76х76мм; 102х102мм; 90х120мм.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с правилами техники безопасности на голографической установке.
2. Ознакомиться с оптической схемой конкретной установки, работой отдельных элементов и правилами их юстировки.
3. Подготовить композицию к съемке, закрепить все элементы композиции и оптической схемы на плите. (Обычно используются для закрепления магниты-держатели или специальные замазки-клеи.)
4. Промоделировать установку фотопластинки в оптическую схему установки с помощью стекла такого же размера.
5. Приготовить рабочий раствор проявителя ПРГ-1 из запасных растворов А и Б. 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 засвечивает 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. Обеспечить выдержку фотопластинки перед экспозицией 5-10 минут в стабильных условиях.

10. Открыть затвор - время экспозиции 30-60 секунд (согласовать с преподавателем); закрыть затвор; фотопластинку вынуть из схемы и защитить от засветки перед проявлением.
11. Опустить пластинку в кювету с проявителем эмульсией вверх, время проявления 10-20 минут (уточнить у преподавателя).
12. Промыть голограмму в течение 10-20 минут в проточной воде.
13. Высушить голограмму в вертикальном положении.

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

1. Проверить качество полученной голограммы, наблюдая изображение объекта-композиции при различных условиях освещения:
 - При рассматривании объекта, освещаемого монохроматическим светом;
 - При наблюдении изображения объекта с помощью голограммы, освещаемой монохроматическим светом;
 - При наблюдении изображения объекта с помощью голограммы, освещаемой «белым» светом.
2. Определить условия освещения голограммы для получения максимального визуального эффекта при наблюдении изображения объекта. Проанализировать различия зрительного восприятия объекта при использовании трех вышеуказанных условий освещения.
3. На основании проведенного анализа отметить недостатки полученной голограммы и объяснить, чем они обусловлены (нестабильностью условий регистрации голограммы; нарушением технологии процесса химико-фотографической обработки; качеством фотопластинки).
4. Защитить эмульсию фотопластинки от возможных повреждений (с помощью прозрачных пленочных покрытий), и придать голограмме товарный вид с помощью окантовки готового изделия.

Дополнительные задания по указанию преподавателя.

- 1Д. Проверить свойство делимости голограммы, используя при наблюдении «голографического» изображения диафрагму из черной бумаги, которая закрывает часть поверхности голограммы.
- 2Д. Создать условия для наблюдения с помощью полученной голограммы действительного псевдоскопического изображения объекта при использовании обращенной опорной волны. Проанализировать полученные результаты схематически и на основе зрительного восприятия (ощущения).

ЛИТЕРАТУРА

1. Денисюк Ю.Н. Принципы голографии. – Л.:ГОИ. – 1978. – 125с.
2. Денисюк Ю.Н. Некоторые проблемы и перспективы голографии в трехмерных средах. В кн.: Оптическая голография; Под ред. Колфилда Г.(перевод под ред. Гуревича С.Б.) – М.:Мир. 1982. – Т.2. – С.691-729.
3. Денисюк Ю.Н. Изобразительная голография. – «Наука и человечество», 1982, М.: «Знание». (опубликовано в сб.: Труды ГОИ, т.68, вып.202, с.212-228).
4. Денисюк Ю.Н. Мой путь в голографии. В кн.: Ю.Н.Денисюк – основоположник отечественной голографии: Сб. научн. тр. – СПб, 2007. – С.7-14.

Получение голограмм на образцах объемного регистрирующего материала

Цель работы: знакомство с техникой получения объемных голограмм, предназначенных для использования в качестве оптических элементов.

Задачи, решаемые в работе:

1. Ознакомиться с особенностями получения голограмм на объемных регистрирующих средах.
2. Ознакомиться с голографической установкой, требованиями к элементам голографической схемы и методикой регистрации голограмм, предназначенных для использования в качестве голограммных оптических элементов (ГОЭ) различного назначения.
3. Провести измерение параметров интерферирующих пучков и рассчитать время экспонирования материала, необходимое для достижения заданных параметров голограммы.
4. Зарегистрировать голограмму-решетку на образце объемного материала и проконтролировать ее параметры после регистрации и на различных этапах постэкспозиционной обработки.
5. Проанализировать полученные результаты с точки зрения использования полученной объемной голограммы-решетки в качестве конкретного голограммного оптического элемента: делителя лазерного пучка по амплитуде; углового селектора; фильтра пространственных частот.

СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

При подготовке к работе необходимо ознакомиться с терминами и их толкованием, которые приведены во второй части пособия: *голограмма, голограмма пропускающая, голограмма статическая, голограмма трехмерная (объемная), голограмма фазовая, голографическая схема, голографическая установка, оптическая разность хода, принцип дисперсионной рефракции, регистрация голограммы (запись голограммы), регистрирующие среды для голографии, экспозиция.*

Трехмерная голография возникла в 1962 году, когда Ю.Н.Денисюк теоретически и экспериментально показал возможность восстановления голограммой не только амплитуды и фазы волны, но и ее спектрального состава. В настоящее время принято разделять трехмерные голограммы на тонкослойные с толщиной порядка 10 мкм (например, изобразительные голограммы) и объемные с толщиной порядка 1 мм (например, голограммные оптические элементы).

Перспективы развития и достижения трехмерной голографии и ее практических приложений неотделимы от прогресса в области разработки и создания материалов для регистрации трехмерных голограмм, в первую очередь, объемных голограмм. Это обусловлено тем, что материалы для регистрации объемных голограмм в настоящее время существуют только в виде лабораторных образцов, в то время как для регистрации тонкослойных трехмерных голограмм существует целый ряд промышленно выпускаемых светочувствительных материалов.

Получение объемных голограмм предъявляет целый комплекс требований к регистрирующим средам для их записи, причем некоторые из требований далеко выходят за рамки возможностей традиционных материалов [1,2]:

- высокая разрешающая способность;
- большая толщина (мм);
- «безусадочность» - сохранение геометрических размеров объема регистрирующей среды в процессе получения голограммы и ее эксплуатации;
- чувствительность к излучению имеющихся лазеров;
- прозрачность на рабочей длине волны;
- возможность длительного хранения информации;
- неизменность параметров в процессе длительной эксплуатации.

Особый интерес объемные регистрирующие среды представляют при создании элементов систем архивной голографической памяти, в особенности для систем дисковой оперативной оптической голографической памяти [3,4]. Успехи фирм – лидеров в области разработки и создания образцов такой современной техники определяются в первую очередь достижениями в создании регистрирующих сред для записи информации, которые должны обеспечивать необходимые технические параметры устройств.

Несмотря на чрезвычайную важность других компонент объемной (3D) голографической памяти, проблема регистрирующей среды всегда определяла конечные результаты любого исследования и проекта в этом направлении. В настоящее время острота проблемы только увеличилась.

По мнению специалистов при создании систем голографической памяти в настоящее время наиболее развитой и продвинутой является технология записи наложенных голограмм в объемных безусадочных полимерных материалах с толщиной 1-2 мм, что позволяет рассматривать их в качестве рабочей регистрирующей среды при создании объемной (3D) голографической памяти. Данная ситуация подготовлена усилиями ряда фирм и организаций. Разработанный в последние десятилетия XX-го века в Государственном Оптическом институте им. С.И.Вавилова принципиально новый полимерный регистрирующий материал для записи высокоэффективных объемных голограмм на основе органического красителя фенантренхинона также рассматривается специалистами в качестве рабочей среды для систем архивной голографической памяти, а его модификации, несомненно, являются прототипами ряда материалов, используемых современными исследователями. К таким модификациям относится материал «Диффен» (см. приложение 2), образцы которого используются в данной работе для записи одиночных и наложенных голограмм.

Основным объектом изучения в данной работе являются элементарные голограммы – голограммы-решетки, полученные при взаимодействии двух плоских когерентных волн (рис.1).

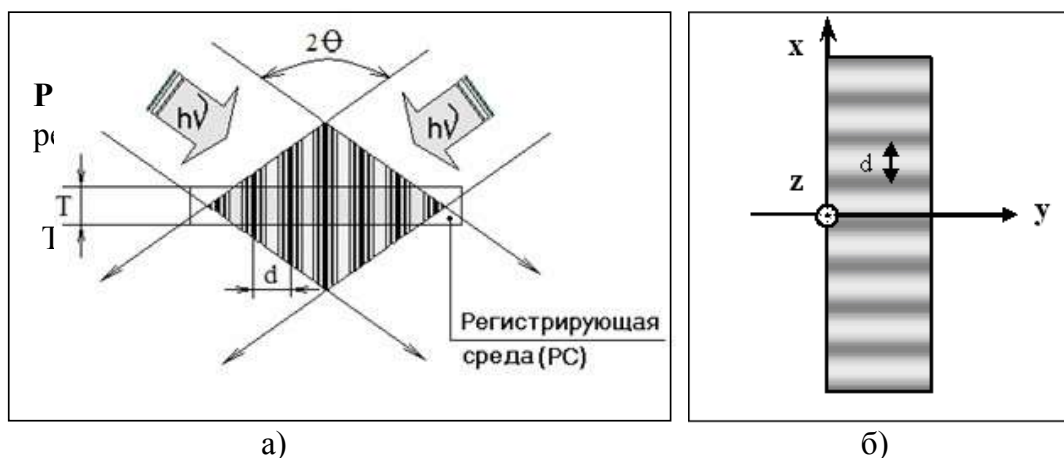


Рис.1. Принципиальная схема получения пропускающих голограмм-решеток (а) и зарегистрированная голограмма-решетка (б).

Такие голограммы являются удобной моделью при исследовании сложных процессов взаимодействия излучения с регистрирующей средой при записи голограмм и взаимодействия излучения с зарегистрированными интерференционными структурами при считывании голограмм.

Знание закономерностей, которые определяют характеристики дифрагированной волны и параметры регистрирующей среды, от которых эти характеристики зависят, играют определяющую роль при разработке технологии изготовления фотоматериалов, предназначенных для записи тех или иных типов трехмерных голограмм и технологии процесса изготовления голограммных оптических элементов на их основе.

Применительно к решению этой практически важной задачи используется теория связанных волн, предложенная американским исследователем Когельником [5]. Эта теория в настоящее время получила широкое распространение при анализе свойств объемных голограмм в решении практических задач, возникающих при создании и разработке объемных регистрирующих сред для записи оптической информации, в том числе и записи голограмм. В строгом смысле слова эта теория не является теорией трехмерной голограммы, так как голограмма по своему физическому смыслу представляет собой запись информации о сложном волновом поле, но в случае голограмм-решеток формулы теории связанных волн могут быть использованы как при анализе одиночных, так и наложенных голограмм.

Формулы теории связанных волн представляют при данных условиях проведения эксперимента (длина волны, геометрия опыта) зависимость между параметрами голограммы (дифракционная эффективность, селективность) и параметрами регистрирующей среды (толщина, амплитуда модуляции оптического параметра).

В данной работе будем рассматривать фазовые голограммы, зарегистрированные в линейном режиме, что достаточно близко соответствует условиям получения и считывания голограмм, получаемых на материале «Диффен». В этом случае распределение интенсивности излучения в регистрируемой интерференционной картине (рис.1а) преобразуется в распределение показателя преломления регистрирующей среды (рис.1б), которое может быть представлено формулой:

$$n = n_0 + n_1 \cdot \cos(2\pi x/d) \quad (1),$$

где n_0 – среднее значение показателя преломления; n_1 - амплитуда изменения показателя преломления; d – период решетки.

Тогда дифракционная эффективность (η) пропускающей голограммы-решетки может быть представлена в теории связанных волн следующей формулой:

$$\eta = \sin^2 \sqrt{\xi^2 + \varphi_1^2} \quad (2),$$

где параметр ξ определяет отклонение от условий Брэгга при считывании голограммы, а φ_1 – амплитуда фазовой модуляции – определяется формулой:

$$\varphi_1 = \frac{\pi n_0 n_1 T}{\lambda_0 \cos \theta_0} \quad (3),$$

где n_1 – амплитуда изменения показателя преломления среды; T – толщина голограммы; λ_0 – длина волны падающего излучения в воздухе; $2\theta_0$ – угол между дифрагированным (I_d) и нулевым (I_0) пучками; n_0 – показатель преломления среды.

При считывании голограммы в условиях Брэгга зависимость (2) принимает вид:

$$\eta = \sin^2 \varphi_1 \quad (4).$$

Таким образом, формула (4) связывает измеряемые параметры пропускающей голограммы (ДЭ) с параметрами регистрирующей среды (n_1 , T) и условиями эксперимента (λ , $\cos \theta$). Для фазовой отражательной голограммы-решетки дифракционная эффективность будет определяться формулой

$$\eta = \text{tg}^2 \varphi_1 \quad (5).$$

На рис.2(а,в) приведены зависимости, определяемые формулами (4) и (5).

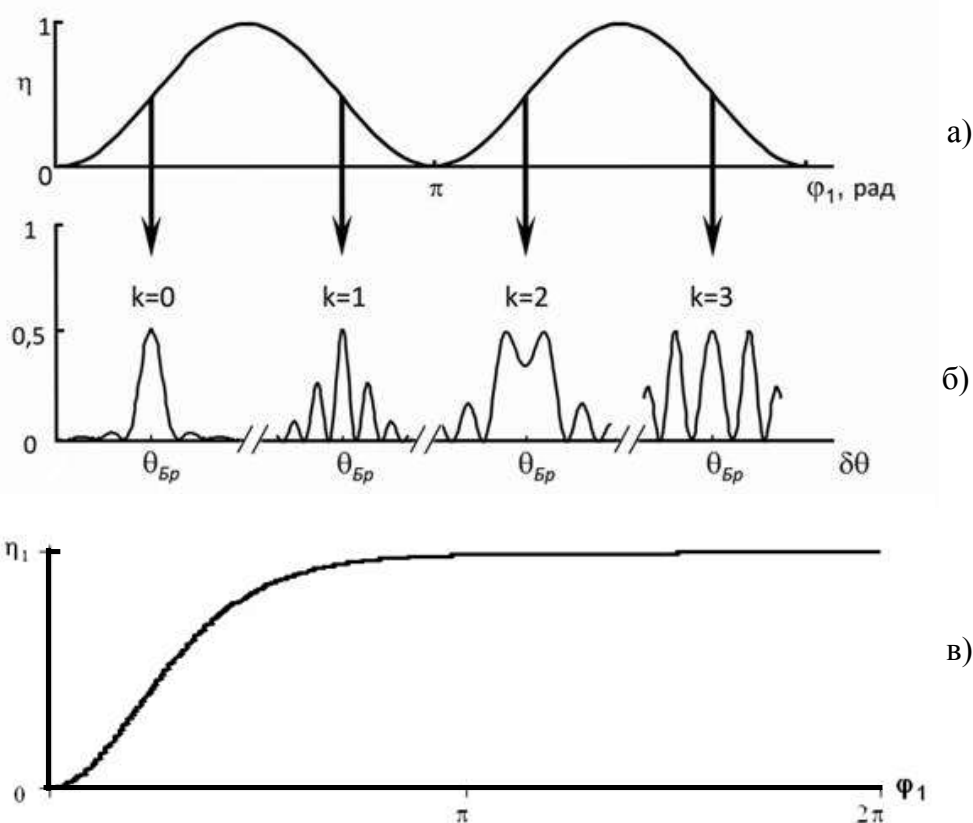


Рис.2.Зависимость дифракционной эффективности от величины фазовой модуляции для пропускающей (а) и отражательной (в) фазовой голограммы-решетки. б – форма контура угловой селективности голограммы с ДЭ = 50% и различным значением фазовой модуляции.

Один из важных параметров теории связанных волн - параметр ξ - определяет значение дифракционной эффективности (см. формулу 2) при отклонении от условий Брэгга при считывании голограммы, как это показано на рис.3 (см. также прил.1).

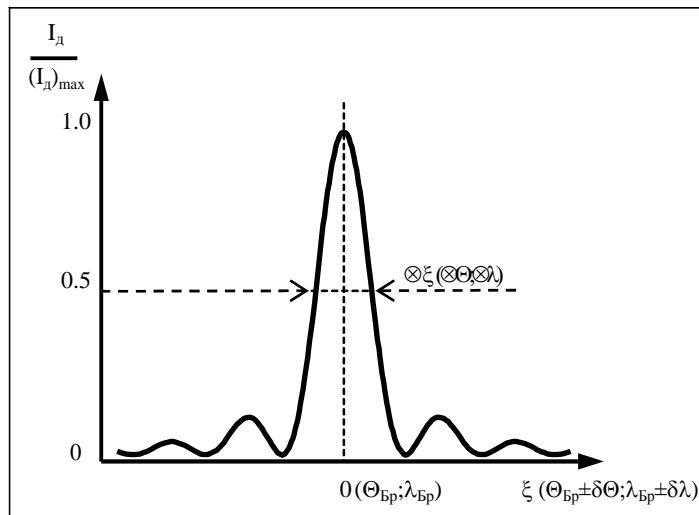


Рис.3.Изменение интенсивности дифрагированного излучения при отклонении от условий Брэгга при считывании голограммы.

Следует отметить, что зависимость ДЭ (η) пропускающих фазовых объемных голограмм от величины фазовой модуляции (ϕ_1) носит осциллирующий характер (см. рис.2а). При этом $\phi_1 = k\pi \pm \arcsin \sqrt{\eta}$, где $k=0,1,2,3,\dots$. Поэтому по измеренным значениям ДЭ однозначное определение ϕ_1 можно произвести только с учетом формы контура селективности, что существенно для высокоэффективных голограмм. На рис.2б приведены контуры селективности голограмм, которые имеют одинаковые значения ДЭ=50% (при считывании в условиях Брэгга) при различных значениях амплитуды фазовой модуляции.

При известном значении величины фазовой модуляции (ϕ_1) можно определить значение амплитуды модуляции показателя преломления регистрирующей среды (n_1) – важный параметр при разработке технологии получения оптических элементов на данной регистрирующей среде. В таблице 1 приведены значения ϕ_1 и n_1 , полученные при различном уровне экспозиции при регистрации голограмм-решеток на материале «Диффен».

Таблица 1. Параметры голограмм-решеток на материале «Диффен», зарегистрированных при различной экспозиции.

Экспозиция голограммы, $H, \text{Дж/см}^2$	φ_1 , рад.	$n_1, 10^{-3}$
1	2	3
0,25	$0,26\pi$	0,23
0,50	$0,37\pi$	0,33
1,0	$0,62\pi$	0,56
2,0	$1,16\pi$	1,04
4,0	$1,28\pi$	1,15

При известной экспозиционной зависимости амплитуды модуляции показателя преломления для данного материала - $n_1(H)$ - можно определить необходимую экспозицию при регистрации голограмм, требуемую для получения на образцах с известной толщиной T заданного значения ДЭ (см. формулы 3 и 4). Такая зависимость определяется экспериментально для определенной (рабочей) длины волны, при использовании которой предусмотрено считывание голограммы, и для определенной пространственной частоты голограммы. Данное обстоятельство следует иметь ввиду при изменении условий планируемого эксперимента, так как существует дисперсия n_1 по длинам волн и материал имеет определенную частотно-контрастную характеристику (см. Приложение 2 и «Терминологический словарь»).

Важным параметром регистрирующей среды является ее динамический диапазон (D), который характеризуется интервалом экспозиций (от H_{\min} до H_{\max}), в пределах которого возможна запись голограммы в линейном режиме. Напомним, что регистрация голограммы в линейном режиме обеспечивается в случае, когда амплитуда голограммы (в данном случае амплитуда модуляции показателя преломления в голограмме) прямо пропорциональна воздействующей экспозиции (плотности энергии на единицу площади данного участка регистрирующей среды). При нарушении прямой пропорциональности между указанными величинами режим записи оказывается нелинейным.

Для характеристики динамического диапазона материала при записи наложенных голограмм и создании элементов на их основе используют характеристику $\Sigma\varphi_1$, которая является суммой значений амплитуд фазовой модуляции всех наложенных голограмм, зарегистрированных на данном участке регистрирующей среды, т.е. составляющих определенную мультиплексную голограмму.

На рис.4. показана зависимость суммарной фазовой модуляции голограмм ($\Sigma\varphi_1$), зарегистрированных на материале «Диффен» (образцы с

толщиной 2,3 мм) методом углового мультиплексирования, от их суммарной экспозиции. Приведенная зависимость характеризует динамический диапазон используемых объемных регистрирующих сред, являясь своего рода характеристической кривой светочувствительного материала. Максимальные значения суммарной фазовой модуляции, достигнутые в данном эксперименте, составляют величину $\Sigma\varphi_1 \cong 12$ радиан. Заметим, что для получения голограммы с ДЭ=50% необходимо обеспечить $\varphi_1 \cong 0,75\text{рад}$, в то время как при записи голограмм на голографический диск необходимая ДЭ, как правило, не превышает 1%.

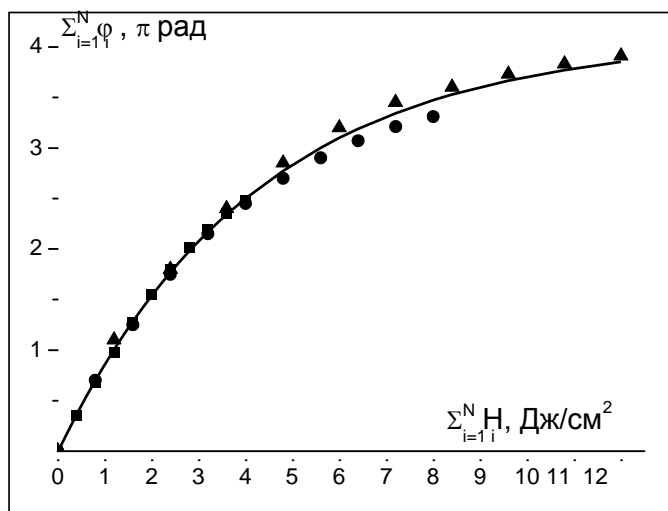


Рис.4. Зависимость суммарной амплитуды фазовой модуляции наложенных голограмм от их суммарной экспозиции (условные обозначения экспериментальных точек соответствуют голограммам с различными экспозициями).

Возможности записи большого объема информации связаны с использованием широкого динамического диапазона таких материалов. В этом случае эффективность голограмм невелика, и запись каждой отдельной голограммы производится в линейном режиме.

Данная работа ставит своей целью дать студентам элементарные практические навыки получения голограмм, предназначенных для применения в качестве оптических элементов, при использовании образцов объемного регистрирующего материала «Диффен» лабораторного изготовления.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для записи голограмм-решеток используется голографическая установка, представляющая собой голографическую схему, собранную на массивной плите. Схема установки, на которой производится запись объемных голограмм-решеток в данной работе, показана на рис. 5.

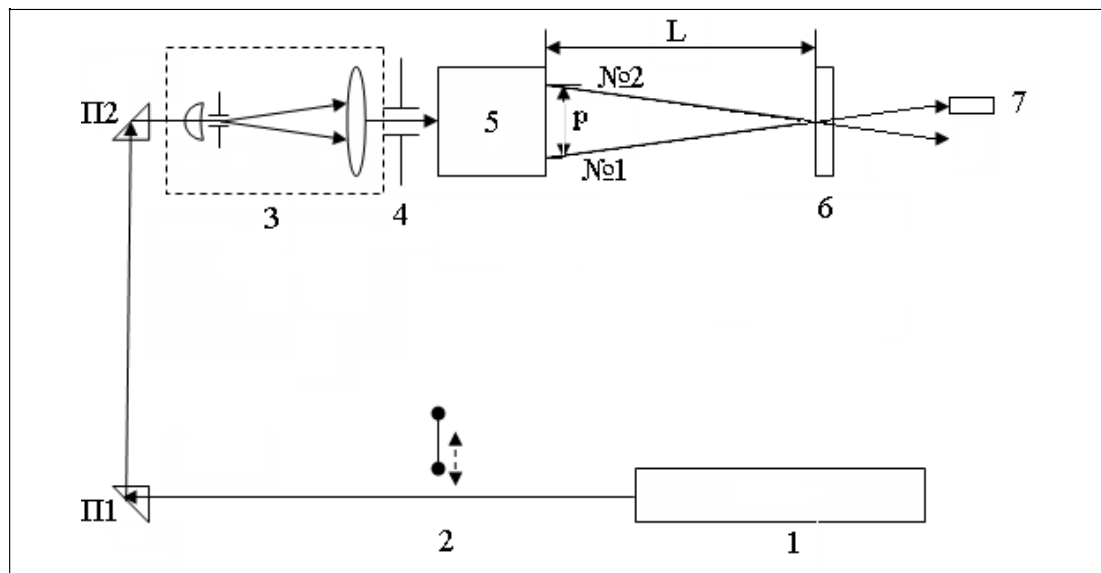


Рис.5.Схема установки для регистрации голограмм-решеток: 1 – лазер, 2 – затвор, П1 и П2 – поворотные призмы, 3 – узел формирования рабочего пучка излучения (более детально приведен на рис.7); 4 – диафрагма; 5 – делитель лазерного излучения (призмный интерферометр - см. рис.6); 6 – регистрирующая среда (РС); 7 – приемник излучения (измеритель мощности излучения); №1 и №2 – интерферирующие пучки; r – расстояние между пучками при выходе из интерферометра; L – расстояние от плоскости выхода пучков из интерферометра до плоскости их пересечения.

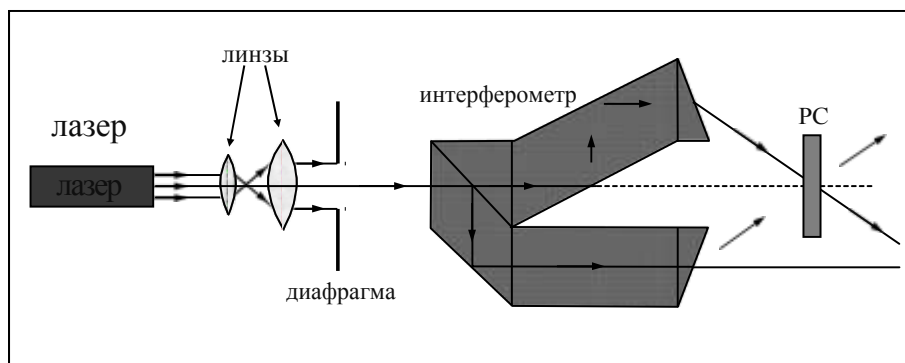


Рис.6. Принципиальная голографическая схема с призмным интерферометром для деления лазерного пучка по амплитуде и формирования интерференционной картины в плоскости регистрирующей среды (РС), используемая в данном эксперименте.

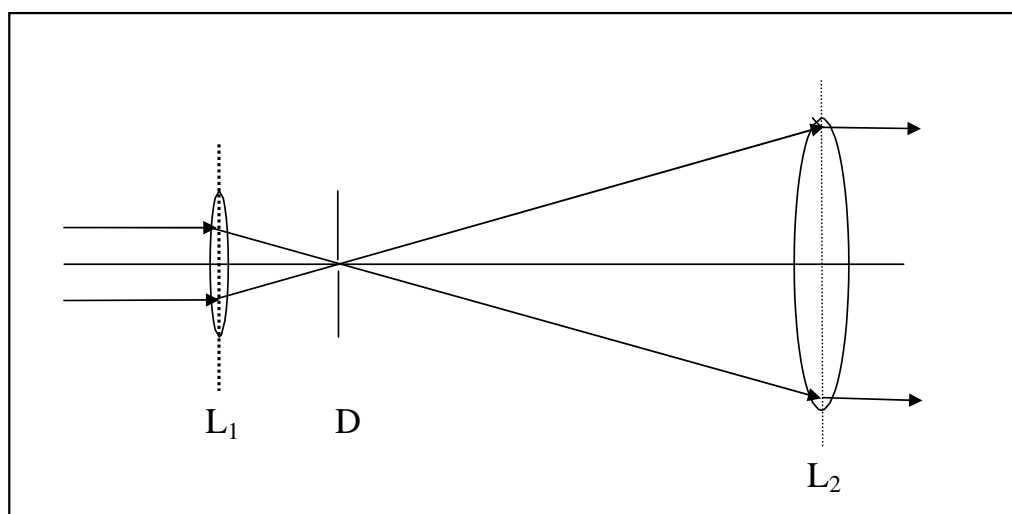


Рис.7. Оптическая схема устройства для фильтрации лазерного излучения от шумовых волн и формирования коллимированного лазерного пучка требуемого диаметра: L_1 и L_2 – линзы, или оптические системы, D – точечная диафрагма.



Рис.8.Пример оптико-механического узла, включающего микрообъектив и точечную диафрагму с трехкоординатной подвижкой, который осуществляет фильтрацию лазерного излучения от шумовых и рассеянных волн.

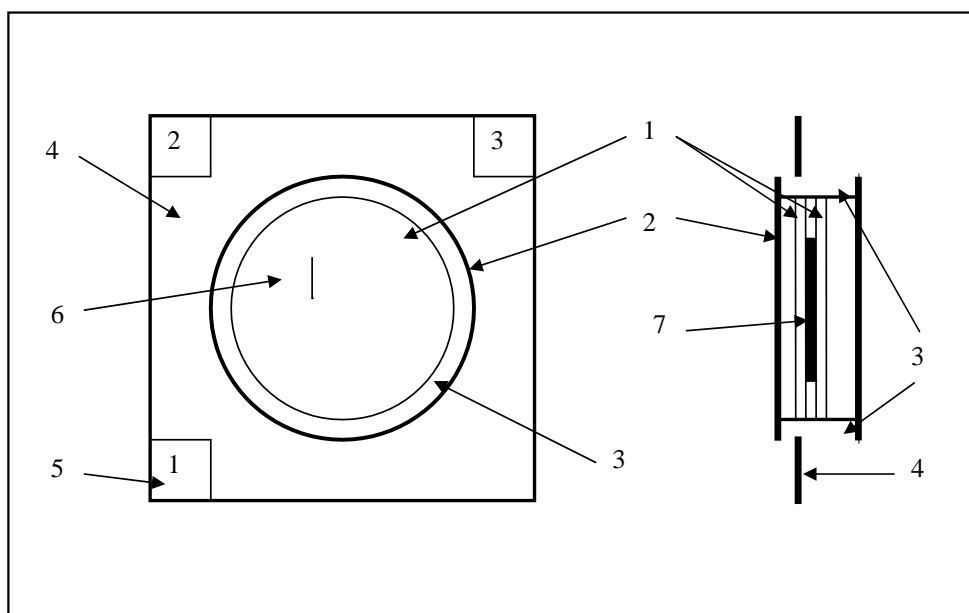


Рис.9.Устройство кассеты для записи голограмм на образцах объемной регистрирующей среды: 1 – защитные стекла (толщиной порядка 1-2 мм); 2 – прижимное кольцо; 3 – фторопластовая прокладка; 4 – металлическая основа кассеты; 5 – номер голограммы; 6 – пример расположения голограммы; 7 – образец.

В качестве источника излучения используется газовый ионный аргоновый лазер (ЛГН-503, мощностью до 1 Вт), генерация излучения в котором возможна на трех различных длинах волн: 456нм, 488нм и 514нм. Длину волны излучения следует уточнить у преподавателя перед началом эксперимента (как правило, используется излучение 488нм). Лазерный луч поворачивается двумя призмами (П1 и П2) и попадает в узел 3 (см. рис.5,7). Назначение этого узла – увеличение поперечного размера лазерного пучка (который при выходе из лазера имеет поперечные размеры порядка 2–3 мм), и формирование его волнового фронта. Узел, принципиальная оптическая схема которого приведена на рис.7, включает микрообъектив (L_1), микродиафрагму (D) и объектив (L_2). Лазерный пучок попадает в апертуру микрообъектива, в фокусе которого находится микродиафрагма. Микродиафрагма, осуществляющая пространственную фильтрацию излучения от шумовых и рассеянных волн, и объектив позволяют получить плоскую монохроматическую волну хорошего качества при правильной юстировке узла, что очень важно при получении ГОЭ. Диафрагма 4 (см. рис.5) диаметром порядка 10мм выделяет центральную часть коллимированного пучка, имеющего равномерное распределение интенсивности.

Все используемые механические узлы и оптические элементы хорошо закреплены, чтобы избежать их смещения во время записи голограммы. Все элементы схемы закреплены на массивном основании, в котором гаснут механические вибрации. В качестве дополнительной меры вся установка размещается на амортизаторах.

На стабильность интерференционной картины оказывает влияние воздушная турбулентность в помещении, где размещена установка. Движение воздуха в области интерферометра вызывает изменение разности фаз интерферирующих пучков, что приводит к сдвигу полос интерференционной картины. Чтобы не допустить турбулентности в помещении при записи голограммы необходимо прекратить на время записи все перемещения экспериментаторов, выключить все нагревательные приборы, закрыть двери и окна, отключить вентиляцию. Дополнительно обеспечивается стабильность в области пучков №1 и №2, выходящих из интерферометра, путем установки дополнительной акустической защиты на пространство от интерферометра до РС (как правило, используются кожухи из картона, поролон или других материалов, гасящих колебания воздушных потоков).

Устройство кассеты для крепления образцов во время регистрации голограмм, приведено на рис.9. Кассета с образцом в сборке, установленная в держатель на установке, обеспечивает необходимую стабильность образца во время экспозиции.

Внимание!

Лазер включается и выключается преподавателем.

В процессе проведения работы студенты должны соблюдать правила техники безопасности.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

а) Регистрация элементарной голограммы – одиночной голограммы-решетки.

Предварительные операции:

1. Ознакомиться с правилами техники безопасности на голографической установке.
2. Ознакомиться с оптической схемой конкретной установки, работой отдельных элементов и правилами их юстировки.
3. Получить у преподавателя задание на регистрацию конкретной голограммы и кассету с образцом регистрирующей среды. Используемый в эксперименте образец имеет идентификационный номер, который необходимо записать в рабочую тетрадь и в журнал экспериментальной установки.
4. Нарисовать таблицу 1 в рабочей тетради и в журнале установки.
5. Определить угол между интерферирующими пучками (2θ), измеряя расстояния r и L (см. рис.5). Рассчитать период интерференционной картины d , используя формулу Брэгга (см. «Условие Брэгга»). Полученное значение периода записать как исходные данные к таблице 1.
6. Измерить интенсивность (мощность) интерферирующих пучков, данные занести в таблицу 1 (столбцы 4 и 5).
7. Определить параметры экспозиции (см. «Экспозиция») $H = E \cdot t$, где H – количество освещения (поверхностная плотность энергии излучения), необходимое для регистрации голограммы, измеряется в Дж/м² (или Дж/см²); E – энергетическая освещенность регистрирующей среды (плотность мощности падающего излучения), измеряется в Вт/м² (Вт/см²); t – длительность облучения (длительность экспозиции). Величина H определяет параметры готовой голограммы и задается преподавателем (занести в столбец 6). Величина E определяется суммой значений E_1 и E_2 интерферирующих пучков; расчет E производится на основании измерений, занесенных в столбцы 4 и 5 таблицы 1: $E = E_1 + E_2$. Измерения с помощью измерителя мощности лазерного излучения

дают искомое значение величин E_1 и E_2 . При проведении измерений с помощью фотодиода, подключенного к измерительному прибору в режиме измерения тока, величина E определяется по формуле $E=k \cdot I$, где k – градуировочный коэффициент, который следует уточнить у преподавателя и вписать в исходные данные к таблице 1. (Например, $k=0,022 \text{ мВт/см}^2/\text{мкА}$, тогда $E=k(I_1+I_2)$ [Вт/см^2]). Время экспозиции ($t, \text{с}$) рассчитывается следующим образом: $t = H / E$.

8. Установить приемник излучения в одном из интерферирующих пучков за образцом для контроля $I_{\text{нач}}$, $I_{\text{кон}}$ (данные, которые заносят в процессе регистрации голограммы в столбцы 8-9 таблицы 1)

Таблица 1. Измерения параметров при регистрации голограмм на образце № _____. Дата регистрации _____.

Исходные данные: $d =$ _____; $k =$ _____

№	Участок Образца*	МВ	I _{пад} (E)		H, Дж/см ²	t, с	Определение τ			
			№1 (E ₁)	№2 (E ₂)			I _{нач}	I _{кон}	$\tau_{\text{нач}}$	$\tau_{\text{кон}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Пояснения к таблице 1.

1. В первый столбец записывается номер в хронологическом порядке эксперимента.
2. Участок образца определяется по номеру на кассете (при установке кассеты на столик нужный номер находится в левом нижнем углу кассеты, если смотреть со стороны падающего излучения).
3. Кассета с образцом устанавливается на поворотном столике, который вращается микрометрическим винтом (МВ). Отсчет, сделанный по шкале барабана микрометрического винта, заносится в третий столбец.
- 4,5. В четвертый и пятый столбцы заносятся значения показаний приемника излучения, полученных при измерении интенсивностей (мощности) интерферирующих пучков.

6. В шестом столбце указывается экспозиция, которую требуется обеспечить при записи голограммы. Ее значение определяется с преподавателем до начала эксперимента.
7. В седьмой столбец записывается время экспозиции, которое следует рассчитать в процессе выполнения работы (см. текст далее).
- 8,9. В данные столбцы заносят показания приемника излучения, установленного в один из пучков (№1 или №2 по указанию преподавателя) за образцом, снятые в начале и конце экспозиции (регистрации).
- 10,11. В данные столбцы заносят данные расчета пропускания образца в начале ($\tau_{\text{нач}}$) и в конце ($\tau_{\text{кон}}$) экспозиции (регистрации):

$$\tau_{\text{нач}} = I_{\text{нач}}/I_{\text{пад}}, \quad \tau_{\text{кон}} = I_{\text{кон}}/I_{\text{пад}}$$
 Значение $I_{\text{пад}}$ берется из столбца таблицы 4 или 5.
 Обратите внимание: значения $I_{\text{нач}}$, $I_{\text{кон}}$, $I_{\text{пад}}$ относятся к одному и тому же интерферирующему пучку.

Процесс регистрации голограммы:

1. Перекрыть затвором 2 (см. рис.5) лазерный пучок. Установить кассету с образцом на столике-платформе, плотно закрепить кассету в держателе.
2. После установки образца в голографическую схему все участники эксперимента занимают свои места и до открытия затвора выдерживают определенное время, необходимое для стабилизации условий записи интерференционной картины. Продолжительность периода стабилизации условий должна быть сопоставима с временем экспозиции. Во время этого периода и, особенно, во время экспонирования голограммы нельзя совершать действия, вызывающие вибрацию установки и турбулентность воздуха в помещении.
3. Открыть затвор и провести запись голограммы (экспонирование). Во время экспонирования необходимо осуществлять наблюдение за показаниями контролирующего прибора и занести в таблицу 1 данные ($I_{\text{нач}}$, $I_{\text{кон}}$).
4. Закрыть затвор и вынуть кассету с образцом из держателя. (При освещении образца можно наблюдать дифракцию на зарегистрированной голограмме).
5. Завернуть кассету с образцом в непрозрачный материал (черную бумагу) и подготовить к переносу на измерительную установку.

б) Регистрация мультиплексной голограммы – голограммы с наложенной записью.

Мультиплексная голограмма регистрируется путем наложенной записи элементарных голограмм на один и тот же участок светочувствительного материала. На рис.10 приведена использованная в работе принципиальная схема записи наложенных голограмм методом углового мультиплексирования. В данной установке на одном образце диаметром 40 мм можно записать 4 мультиплексные голограммы, каждая из которых может состоять из нескольких (N) наложенных голограмм, записанных на одном участке образца. Последовательность операций записи одной из "наложенных" голограмм совпадает с пунктами, описанными в предыдущем разделе.

Угол между интерферирующими пучками, экспозиция и положение на образце не меняется для всех элементарных голограмм, образующих мультиплексную голограмму - голограмму с "наложенной" записью. Все измеренные, рассчитанные значения, положение на образце, номер записываемой голограммы заносятся в таблицу 1.

После записи первой элементарной голограммы поворачивается столик, на котором установлена голограмма. Поворот осуществляется микрометрическим винтом с последующим занесением в таблицу 1 (столбец 3) нового отсчета его положения.

Аналогичным образом осуществляется запись каждой последующей элементарной голограммы и заполняется таблица данных с соответствующим номером голограммы. Угол поворота образца (сдвиг микрометрического винта) определяется исходя из условий эксперимента, толщины светочувствительного материала (образца). При использовании образцов толщиной 1-2 мм и пространственной частоты решетки 300-400 мм⁻¹ рекомендуется изменять положение микрометрического винта на 1мм между записью отдельных голограмм.

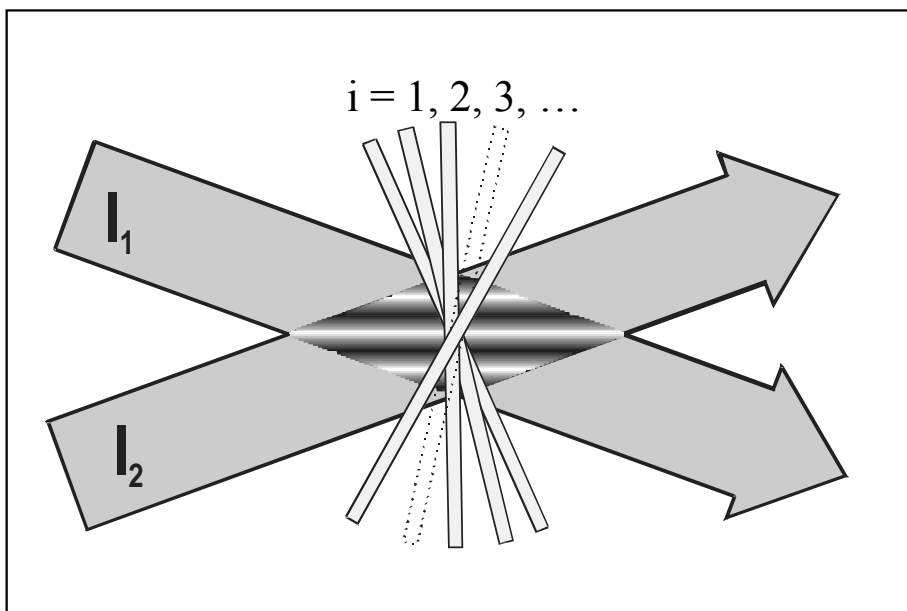


Рис.10. Принципиальная схема записи наложенных голограмм методом углового мультиплексирования. i – порядковый номер записи наложенной голограммы.

Примечание: Тип регистрируемой голограммы определяется преподавателем в начале работы.

в) Контроль параметров голограммы после регистрации и в процессе постэкспозиционной обработки.

До завершения полного цикла постэкспозиционной обработки образец остается светочувствительным, поэтому его следует защищать от коротковолнового излучения в области спектра поглощения фенантренхинона ($\lambda < 530$ нм, см. приложение 2). Контроль параметров голограммы производится излучением лазера с длиной волны $\lambda = 655$ нм, которая находится вне полосы поглощения ФХ, т.е. вне диапазона спектральной чувствительности данного материала, что позволяет проводить измерения, не внося искажения в записанную голограмму.

После регистрации голограммы образец остается в оправе, которая имеет цифровые метки - зная положение меток при записи, легко определить примерное расположение голограммы на образце, а также оценить положение образца относительно падающего пучка и направление нулевого и дифрагированного пучков за голограммой.

Контролируемыми параметрами зарегистрированной голограммы до ее последующей обработки являются дифракционная эффективность (обязательный параметр) и угловая селективность (определяется по

указанию преподавателя). Методика измерения и определения параметров голограмм приведена в приложении 1 первой части данного пособия.

На этом первая часть лабораторной работы, которая выполняется за одно занятие, заканчивается.

Рабочая тетрадь студента должна содержать схему записи голограммы, заполненную таблицу 1, данные измерений и расчетов, которые представляются в отчете.

Постэкспозиционная обработка образца занимает большой объем времени (несколько суток) и, как правило, проводится без участия студентов.

Полная программа выполнения данной работы включает измерения параметров голограмм после проведения прогрева образцов (диффузионного усиления голограмм), проведение фиксирования голограмм и измерение их параметров после фиксирования.

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Отчет по выполнению работы должен содержать:

1. Схему записи голограммы; номер образца и номер голограммы.
2. Рабочую таблицу данных при регистрации голограммы с необходимыми пояснениями и расчетами.
3. Данные измерений параметров голограммы на различных этапах ее получения, проведенные по программе, согласованной с преподавателем.
4. Анализ возможностей голограммы при ее использовании в качестве конкретного голограммного оптического элемента: делителя лазерного пучка по амплитуде; углового селектора; фильтра пространственных частот и т.п.

ЛИТЕРАТУРА

1. Суханов В.И. Трехмерные глубокие голограммы и материалы для их записи //Оптич. журн. – 1994. – №1. – С.61-70.
2. Андреева О.В. Объемные регистрирующие среды для голографии на основе пористого стекла с галоидным серебром и полимера с фенантренхиноном //Проблемы когерентной и нелинейной оптики; – Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики. – СПб, 2004. – С.58-88.
3. 3D лазерные информационные технологии. Отв. ред. Твердохлеб П.Е. – Новосибирск, 2003. – С.551
4. Твердохлеб П.Е. Голография и оптическая память //Ю.Н.Денисюк – основоположник отечественной голографии: Сборник трудов Всероссийского семинара – СПб, 2007. – С.65-77
5. Kogelnik H. Coupled Wave Theory for Thick Hologram Gratings //The Bell System Technical Journal. – 1969. – Vol.48. No9. – P.2909-2947. (А также в книге: Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. – М.:Мир. – 1973. – 686с.)

Элементы оптической памяти на основе мультиплексных голограмм

Цель работы: Знакомство с характеристиками объемных наложенных голограмм, предназначенных для использования в системах архивной оптической памяти, и условиями их получения.

Объект исследования: Образец объемной полимерной регистрирующей среды «Диффен», на одном участке которого произведена запись нескольких наложенных голограмм (3-5 голограмм) методом углового мультиплексирования.

Задачи, решаемые в работе:

1. Измерить зависимость интенсивности дифрагированного пучка от угла поворота образца-носителя относительно падающего пучка и определить контуры угловой селективности наложенных голограмм, зарегистрированных на данном участке образца.
2. Определить основные параметры каждой из наложенных голограмм: дифракционную эффективность и угловую селективность.
3. Оценить увеличение информационной емкости единицы площади элемента оптической памяти (которым является образец-носитель) за счет использования наложенной записи голограмм.

СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

При подготовке к работе необходимо ознакомиться с терминами и их толкованием, которые приведены во второй части пособия: *голограмма, голограмма статическая, голограмма трехмерная (объемная), голограмма фазовая, голографическая схема, регистрирующие среды для голографии, селективность голограммы, считывание голограммы, условие Брэгга.*

Научно-технический прогресс мирового сообщества идет по пути быстрого и постоянно увеличивающегося роста потока информации. В связи с этим непрерывно растут требования к плотности хранения и скорости обработки данных. Одним из путей решения данной проблемы является привлечение оптических технологий.

В настоящее время в системах записи, хранения и воспроизведения информации широко используется так называемая оптическая память в форме дисков CD (compact disk), DVD (digital versatile disk), HD-DVD (high definition digital versatile disk) и Blu-ray Disc. Такая форма памяти позволяет записывать и хранить колоссальные объемы информации – до 100Гб и производить считывание со скоростью до 140 Мбит/с. На таких дисках информация записывается и считывается лучом полупроводникового лазера, сфокусированным в световое пятно малого размера (порядка одного и даже менее микрона). При этом большая информационная емкость в каждом последующем типе оптических дисков достигается за счет использования более короткой длины волны света и многослойности самих носителей. О сегодняшних параметрах оптических дисков лет 10 назад можно было только мечтать, но перспектив дальнейшего значительного увеличения информационной емкости таких дисков не прогнозируется. Дальнейшие перспективы увеличения плотности записи информации ориентированы на использование и применение голографических методов в этой научно-технической области. В таблице 1 приведено сравнение характеристик различных типов оптических дисков, предназначенных для систем хранения информации.

Таблица 1. Сравнение характеристик различных типов дисков для систем хранения информации.

Тип оптического диска	Логотип	Емкость носителя	Скорость записи
компакт-диск		700 Мб	1,4 Мбит/с
DVD-диск		4,7-9,4 Гб	10 Мбит/с
оптические диски для видео высокой четкости		15-108 Гб	140 Мбит/с
голографический диск		200-4000 Гб	до 15 Гбит/с

Прогноз фирмы IBM относительно развития запоминающих устройств различных типов (см. рис.1) отводит на ближайшие 10-15 лет ведущее место в этой научно-технической области голографическим методам.

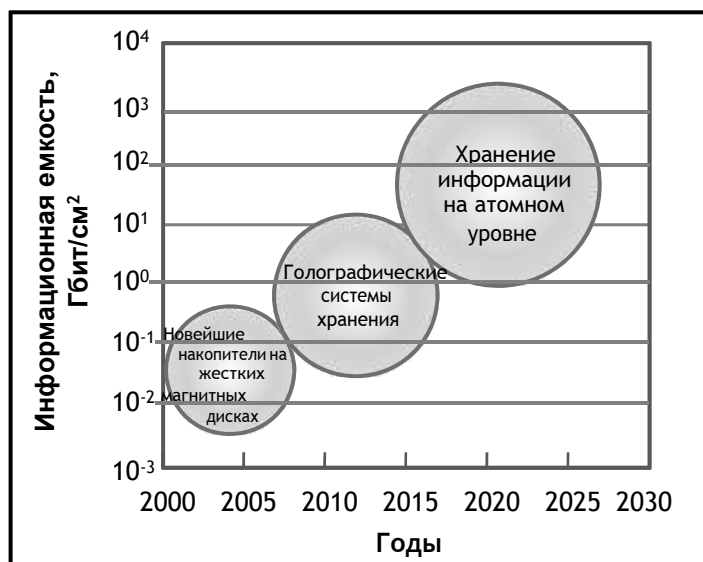


Рис.1. История и перспективы развития емкости запоминающих устройств (по данным IBM).

Научно-исследовательские компании всего мира в течение ряда лет уже ведут разработки в области оптической голографической памяти и многие из них рекламируют свои коммерческие разработки (см.рис.2).



Рис.2. Голографические системы хранения информации, предлагаемые разными фирмами-изготовителями.

InPhase Technologies (США), Optware (Япония), Dow Corning (США), NTT (Япония), IBM (США), Polight Technologies (Великобритания), Hitachi Maxwel (Япония) уже объявили о создании оптической памяти на голографических принципах с параметрами, существенно превышающими параметры существующих систем или конкурирующими с ними (см.рис.2).

Фирма InPhase Technologies совместно с фирмой Hitachi Maxwel в 2008 году приступила к продажам своей голографической системы Tapestry 300r, в состав которой входит однократно записываемый 130мм голографический диск емкостью 300 Гб. Хотя до сих пор до конца не решена проблема тиражирования дисков (технология штамповки с диска-оригинала миллионов идентичных копий пока не разработана), но производитель собирается в течении 3-4 лет довести емкость голографического диска до 1,6Тб (см.табл.2) и анонсирует перезаписываемые голографические диски.

Таблица 2. Прогноз увеличения емкости и скорости считывания голографического диска фирмы InPhase Technologies.

Год	Название системы хранения	Емкость диска для записи и чтения	Скорость считывания, Мбит/с
2008	Tapestry 300r	300Гб	240
2009-2010	Tapestry 800r	800Гб	640
2011-2012	Tapestry 1600r	1,6Тб	960

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

Идея создания голографической памяти была выдвинута еще в 1966-67гг. и тогда же частично реализована в виде лабораторных систем и устройств с использованием плоских носителей. Принципиальная схема устройства голографической памяти ЭВМ, опубликованная в журнале BSTJ в 1967г., где используется плоский носитель, приведена на рис.3а; принципиальная схема записи и считывания отдельной голограммы в

современных системах архивной голографической памяти на основе объемных наложенных голограмм приведена на рис.3б.

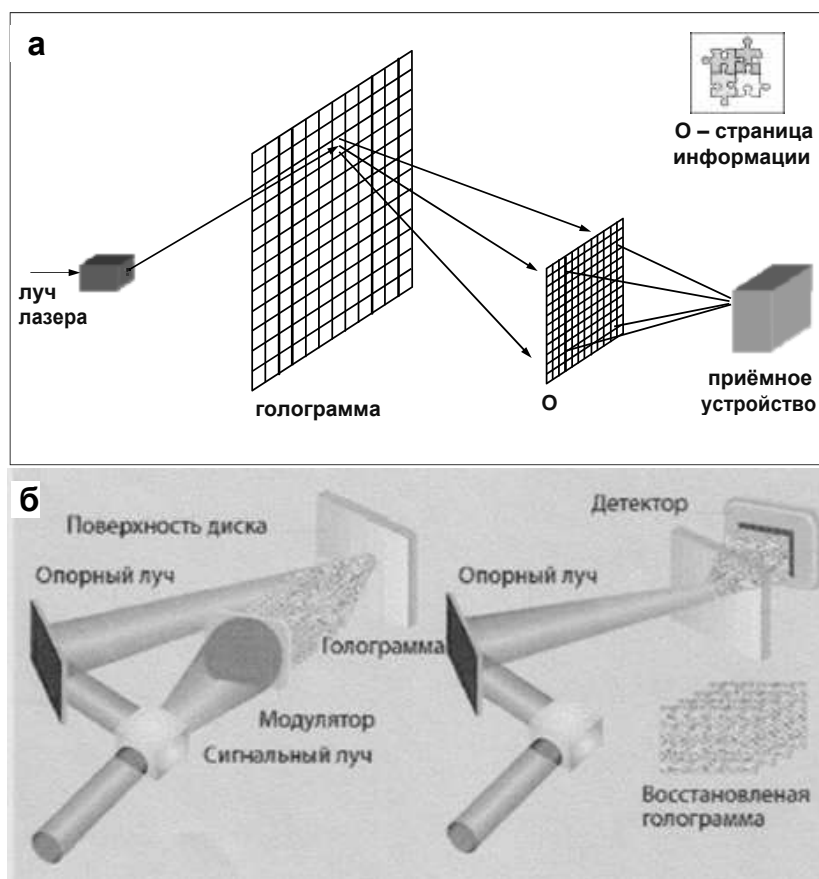


Рис.3.а – принципиальная схема устройства голографической памяти (1967 г. – плоский носитель-2D). **б** – запись и считывание голограммы в системах архивной памяти (2006 г. – объемный носитель - 3D).

Перспективность использования голографического метода для хранения и считывания информации обусловлена следующими специфическими особенностями, связанными с реализацией данного метода:

1. Возможность записи и хранения документов в аналоговом формате без предварительного кодирования.
2. Возможность параллельной записи и считывания больших объемов информации (не отдельных битов, а целых страниц).
3. Увеличение надежности и сохранности записанной информации за счет распределенной, а не локальной формы записи. Избыточность информации при голографической записи обеспечивает повышенную стойкость к локальным повреждениям носителя.

4. Снижение требований к электромеханическим системам управления и к их быстродействию за счет того, что ширина спиральных дорожек на голографических дисках в 10-100 раз больше, чем в существующих оптических дисках (запись происходит не побитово, а постранично).
5. Увеличение информационной емкости за счет использования постраничной, а не побитовой записи информации и за счет использования наложенной записи, то есть записи на отдельном локальном участке диска нескольких голограмм, каждая из которых может содержать значительный объем информации, например, страницу текста.

Полностью возможности и преимущества голографического метода при создании систем хранения информации могут быть реализованы только при использовании объемных голограмм и объемных регистрирующих сред в качестве носителя.

Несмотря на чрезвычайную важность всех компонент объемной (3D) голографической памяти (таких как, управляемые транспаранты, фотодиодные матрицы, дефлекторы света, фазовые маски, полупроводниковые лазеры и др.), проблема регистрирующей среды всегда определяла конечные результаты любого исследования и проекта в этом направлении. Успехи фирм – лидеров в области разработки и создания образцов такой современной техники определяются в первую очередь достижениями в создании регистрирующих сред для записи информации, которые должны обеспечивать необходимые технические параметры устройств.

По мнению специалистов при создании систем голографической памяти в настоящее время наиболее развитой и продвинутой является технология записи наложенных голограмм в объемных безусадочных полимерных материалах с толщиной 1-2 мм. Данная ситуация подготовлена усилиями ряда фирм и организаций. Разработанный в последние десятилетия XX-го века в Государственном Оптическом институте им. С.И.Вавилова принципиально новый полимерный регистрирующий материал для записи высокоэффективных объемных голограмм на основе органического красителя фенантренхинона также рассматривается специалистами в качестве рабочей среды для систем архивной голографической памяти, а его модификации, несомненно, являются прототипами ряда материалов, используемых современными исследователями. К таким модификациям относится материал «Диффен», образцы которого использованы в данной работе.

Принцип действия памяти при использовании технологии записи наложенных голограмм предусматривает работу с отдельными информационными массивами в формате страниц $N \times N$ бит. Таким образом, технология записи наложенных голограмм является «странично-ориентированной»

Для создания элементов, имитирующих носитель информации для голографической памяти, в настоящей работе используются образцы регистрирующей среды «Диффен», толщиной порядка 1,5мм. На каждый рабочий участок образца записано несколько (от трех до десяти) голограмм-решеток методом углового мультиплексирования. Голограмма-решетка (элементарная голограмма) регистрируется при взаимодействии двух плоских волн. При создании реальных элементов производится запись голограммы более сложного объекта, например, одна из интерферирующих волн содержит информацию о странице текста. Но с помощью голограммы-решетки можно наиболее простым образом на практике продемонстрировать возможности объемных голограмм с наложенной записью осуществлять регистрацию больших объемов информации и независимое считывание фрагментов.

На рис.4 приведена оптическая схема установки для записи голограмм-решеток, которые используются в данной работе.

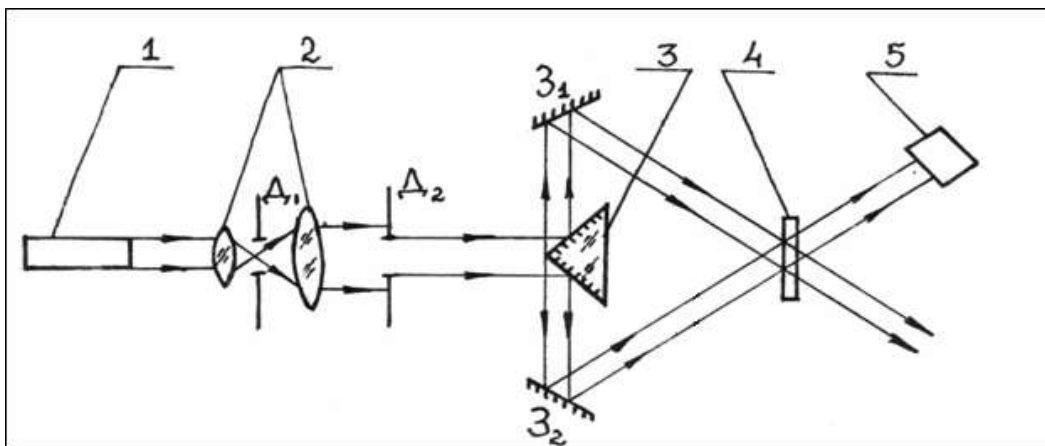


Рис.4.Схема записи пропускающих элементарных голограмм (голограмм-решеток): 1 – источник излучения; 2 – телескопическая система для расширения лазерного пучка; 3 – элемент для деления и поворота лазерного пучка (прямоугольная призма с алюминиевым покрытием); 4 – регистрирующая среда; 5 – приемник излучения; Δ_1 и Δ_2 – диафрагмы; $З_1$ и $З_2$ – зеркала.

Схема, поясняющая каким образом производится угловое мультиплексирование при получении наложенных голограмм в данной работе, приведена на рис.5.

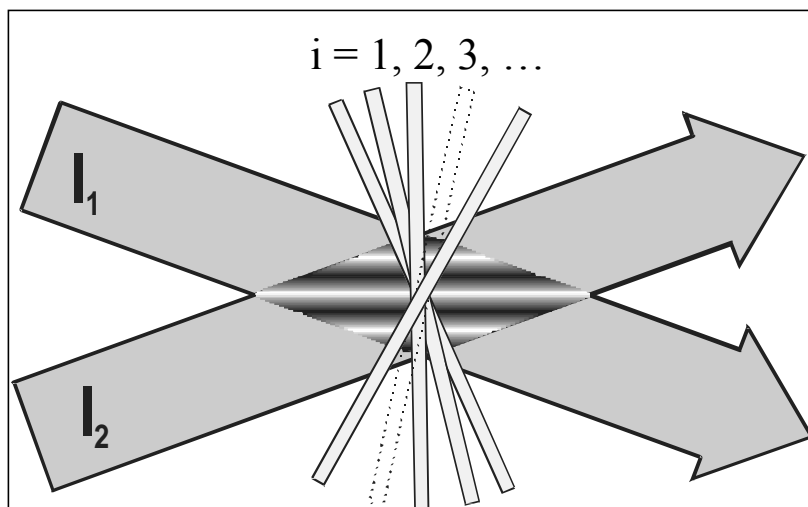


Рис.5. Принципиальная схема записи наложенных голограмм методом углового мультиплексирования. i – порядковый номер записи наложенной голограммы.

Голограммы №1; №2; №3 и т.д. записываются на один и тот же участок регистрирующей среды при различной ориентации образца-носителя относительно регистрируемой интерференционной картины. (На рисунке указан вариант, при котором для записи каждой последующей голограммы поворот образца-носителя производится по часовой стрелке.)

Возможность независимого считывания каждой из наложенных голограмм обусловлена таким свойством объемных голограмм как селективность. Селективность – свойство голограммы, связанное с уменьшением интенсивности дифрагированной (восстановленной) волны (I_d) при отклонении условий освещения голограммы от оптимальных, определяемых условием Брэгга. Селективностью обладают только трехмерные голограммы. Двумерные голограммы (как и традиционные плоские дифракционные решетки) неселективны. Различают спектральную селективность голограммы, связанную с изменением длины волны восстанавливающего излучения и угловую селективность, обусловленную изменением пространственного спектра восстанавливающей волны. Максимум интенсивности волны, дифрагированной на объемной элементарной голограмме, наблюдается при угле Брэгга (θ_{Br}) и длине волны Брэгга (λ_{Br}). При отклонении от условий Брэгга ($\theta = \theta_{Br} < \pm \delta\theta < \dots$ и $\lambda = \lambda_{Br} < \pm \delta\lambda$) интенсивность

дифрагированной волны уменьшается (см. рис.6). В данной работе необходимо произвести измерения контура угловой селективности каждой из наложенных голограмм и определить ее угловую селективность - $\Delta\theta$, которая количественно определяется интервалом углов плоской монохроматической восстанавливающей волны на голограмму, в пределах которого интенсивность дифрагированной волны превышает половину ее максимального значения (см.рис.6).

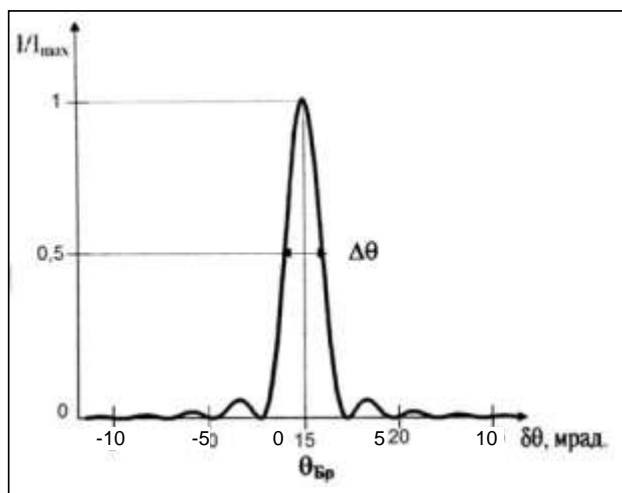


Рис.6.Изменение интенсивности дифрагированного излучения при отклонении от условий Брэгга при считывании голограммы монохроматическим излучением – контур угловой селективности голограммы (толщина голограммы порядка 1 мм). $\Delta\theta$ – угловая селективность голограммы.

Условие Брэгга определяет условие получения максимальной интенсивности дифрагированной волны при взаимодействии плоской волны с одномерной решеткой, зарегистрированной в объемной среде, и записывается следующим образом: $2d \sin \theta = k\lambda$ где d - постоянная решетки, θ - угол между направлением распространения волны и плоскостью решетки, λ - длина волны излучения, $k = 1, 2, 3 \dots$ - порядок дифракции. Это соотношение, установленное для дифракции рентгеновских лучей на атомных плоскостях в кристалле, известно в физике как закон Вульфа-Брэгга - по имени Г.В.Вульфа и У.Л.Брэгга, одновременно и независимо получивших это выражение в 1913г.

В голографии условие Брэгга широко используется при рассмотрении дифракции излучения на объемной голограмме. При $k = 1$ условие Брэгга определяет для элементарной объемной голограммы условие образования главного максимума дифрагированной волны: выбор угла падения ($\theta_{Бр}$) задает длину волны ($\lambda_{Бр}$) падающего на голограмму излучения, и наоборот. При отклонении от условий Брэгга ($\theta = \theta_{Бр} \pm \delta\theta$ и $\lambda = \lambda_{Бр} \pm \delta\lambda$) интенсивность дифрагированной волны падает (см.рис.6).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для измерения параметров мультиплексной голограммы используется установка, принципиальная оптическая схема которой приведена на рис.7.

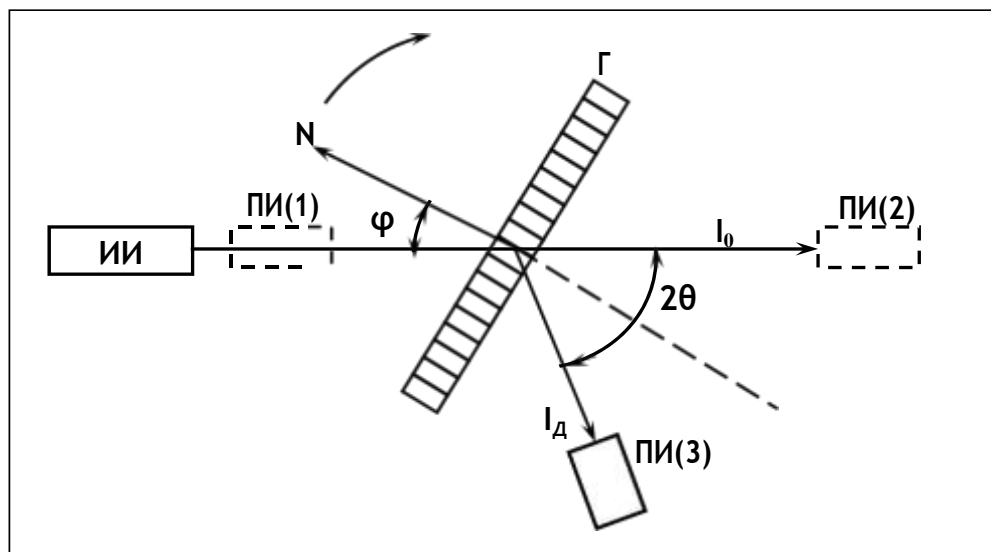


Рис.7. Оптическая схема установки для измерения дифракционной эффективности и контура угловой селективности пропускающей голограммы-решетки. ИИ – источник излучения; ПИ – приемник излучения, который может быть установлен в положения 1,2,3; Г – голограмма; N – нормаль к поверхности голограммы; I_0 и I_d – нулевой и дифрагированный пучки излучения; φ – угол поворота образца относительно падающего пучка; 2θ – угол между нулевым и дифрагированным пучками излучения (измерения проводятся при $\theta = \theta_{бр}$).

На рис.8 приведена зависимость интенсивности дифрагированного пучка (I_d) от угла поворота голограммы относительно считывающего (падающего) пучка для образца, на котором зарегистрированы три наложенные голограммы методом углового мультиплексирования. Приемник излучения в этом случае находится в положении «ПИ(3)» (см.рис.7). В этом случае при установке угла между носителем информации (образцом) и считывающим пучком (φ) равным φ_1 на приемнике излучения получаем информацию, записанную на голограмме №1. Если $\varphi = \varphi_2$, то на приемник излучения попадает информация, записанная на голограмме №2, для того, чтобы получить на приемнике излучения (детектирующем устройстве) информацию, записанную на

голограмме №3, необходимо далее носитель информации (или считывающий пучок) повернуть на угол $\otimes\varphi = \varphi_3 - \varphi_2$.

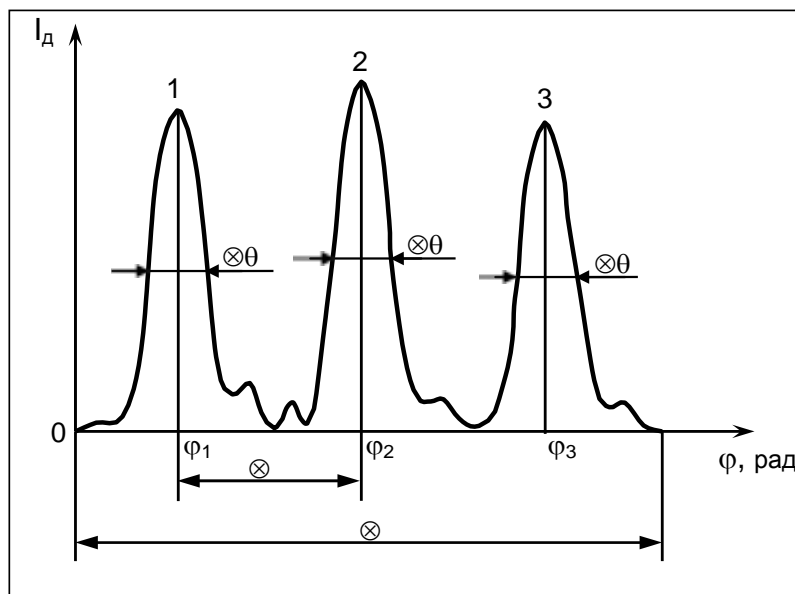


Рис.8. Зависимость интенсивности дифрагированного излучения (I_d), детектируемого приемником излучения (ПИ-3, рис.7), от угла поворота голограммы относительно считывающего (падающего) пучка (φ): φ_1 ; φ_2 ; φ_3 – угол поворота, соответствующий считыванию голограмм №1; №2; №3 (поворот образца по часовой стрелке); $\otimes\theta_i$ – угловая селективность отдельной, i -й, голограммы (определяется по уровню интенсивности дифрагированного пучка $I_d = 0,5 \cdot I_{\max}$); $\otimes\varphi$ – угол поворота образца между считыванием двух соседних наложенных голограмм; $\otimes\Phi$ – диапазон углов поворота образца-носителя, необходимый для считывания всех зарегистрированных голограмм.

Чтобы обеспечить независимое считывание каждой отдельной наложенной голограммы и избежать влияния помех, создаваемых соседними наложенными голограммами, угол поворота образца между считыванием двух соседних наложенных голограмм ($\otimes\varphi$) должен ~~бы~~ больше, чем величина угловой селективности отдельной голограммы ($\otimes\theta$). Угол $\otimes\varphi$ задается условиями регистрации наложенных голограмм. ~~Как~~ правило, на практике при мультиплексировании обеспечивают такие условия эксперимента, чтобы $\otimes\varphi = (2 \div 5) \cdot \otimes\theta$.

В работе необходимо исследовать зарегистрированную на образце-носителе мультиплексную голограмму как элемент странично-ориентированной голографической памяти, и оценить ее возможности,

предполагая, что отдельная наложенная голограмма несет фрагмент информации, равный одной странице текста.

При рассмотрении свойств отдельной голограммы основным измеряемым параметром, характеризующим ее качество, является дифракционная эффективность (см. «Терминологический словарь»). Именно дифракционная эффективность (ДЭ) голограммы определяет мощность источника излучения и чувствительность приемника излучения (приемной аппаратуры) при считывании информации с данного элемента архивной памяти. Кроме того, контроль ДЭ необходим в процессе разработки и создания таких элементов при сравнительном анализе свойств голограмм, зарегистрированных на различных материалах при различных условиях; а также при обеспечении определенных требований к качеству считываемой информации (например, необходимость обеспечить требуемое качество текста или изобразительного материала по всей площади считываемой страницы информации).

Дифракционная эффективность определяется обычно как отношение потока излучения в дифрагированной волне данного порядка дифракции $(P_d)_n$ к падающему на голограмму потоку излучения $(P_{пад})$. Для характеристики голограмм, имеющих потери (на поглощение, рассеяние, отражение и т.д.), используют также приведенные, или нормированные, значения дифракционной эффективности, определяемые как отношение $(P_d)_n$ к сумме потоков излучения всех порядков дифракции, включая нулевой. В этом случае для объемной голограммы, формирующей один дифракционный порядок, $ДЭ = (P_d)_1 / \{ (P_d)_1 + (P_d)_0 \}$. Дифракционная эффективность зависит от типа голограммы, свойств регистрирующей среды и методов постэкспозиционной обработки, условий регистрации и освещения голограммы и является важнейшей характеристикой при количественной оценке ее свойств.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

а) Подготовка эксперимента.

1. Включить источник излучения – лазер.
2. Включить измерительный прибор – мультиметр в режиме измерения тока.
3. Проверить подключение к мультиметру приемника излучения (фотодиод ФД-24К).
4. Закрепить образец (оптический элемент) на поворотном столике так, чтобы рабочая область элемента с зарегистрированными голограммами оказалась в сечении светового пучка.

б) Измерение дифракционной эффективности.

Дифракционная эффективность (ДЭ) голограммы в данной работе определяется как отношение потока излучения в дифрагированной волне (P_d) к падающему на голограмму потоку излучения ($P_{\text{пад}}$). Поток излучения (P) пропорционален интенсивности излучения (I) и измеряется в относительных единицах.

1. Подготовить таблицу 1 для записи результатов измерений.
2. Установить приемник излучения в положение «1», соответствующее измерению интенсивности (потока) падающего излучения. Проверить перпендикулярность положения входного окна приемника относительно падающего пучка. Измерить интенсивность падающего излучения $I_{\text{пад}}$ в относительных единицах (измеряется ток в цепи приемника излучения, пропорциональный интенсивности или потоку, излучения). Данные занести в столбец 4 таблицы 1.
3. Установить приемник излучения в положение «3», соответствующее измерению интенсивности дифрагированного излучения. Проверить перпендикулярность входного окна приемника излучения относительно падающего пучка. Поворачивая голограмму (вращением барабана микрометрического винта) относительно падающего пучка, найти максимальное значение интенсивности дифрагированного пучка первой наложенной голограммы. Данные занести в столбец 3.
4. Повторить п.2 и п.3 для голограммы №2.
5. Повторить п.2 и п.3 для голограммы №3.

Таблица 1. Данные для определения дифракционной эффективности отдельных наложенных голограмм

№ голограммы	Направление поворота образца	I_d (max)	$I_{\text{пад}}$	ДЭ, %
1	2	3	4	5
Голограмма №1	По часовой стрелке			
Голограмма №2	“			
Голограмма №3	“			

в) Измерение зависимости интенсивности дифрагированного излучения (I_d), детектируемого приемником излучения в положении ПИ(3), от угла поворота голограммы (φ). (Данные для получения контуров угловой селективности наложенных голограмм и оценки их угловой селективности)

1. Подготовить таблицу 2 для записи результатов измерений.
2. Установить приемник излучения в положение ПИ(3) для измерения интенсивности дифрагированного пучка.
3. Определить цену деления барабана микрометрического винта (МВ) в угловых единицах (q , рад/мм), измерив расстояние от вертикальной оси вращения столика с голограммой до горизонтальной оси вращения сердцевинки микрометрического винта (МВ). Занести результат в исходные данные к таблице 2.
4. Оценить диапазон углов поворота $\otimes \Phi$ (см.рис.8), необходимый для считывания всех зарегистрированных голограмм.
5. Определить, с каким шагом необходимо проводить измерения, чтобы при построении контура для каждой голограммы имелось 20-30 экспериментальных точек. «Шаг измерений» – расстояние между двумя измерениями по барабану микрометрического винта – может быть постоянным при проведении измерений контура голограммы (например, 2; 5; 10 делений барабана МВ) и увеличен при измерениях вне контура голограммы.
6. Провести измерение исходной зависимости, заполнив столбцы 1 и 2 таблицы 2.

Таблица 2. Данные для построения зависимости $I_d(\varphi)$ и оценки угловой селективности наложенных голограмм.

Исходные данные: цена деления барабана МВ - $q = \underline{\hspace{2cm}}$ радиан/мм

Отсчет по барабану МВ, N_i , мм	Интенсивность дифрагированного пучка, I_d , мкА	φ , рад
1	2	3

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Определить дифракционную эффективность (ДЭ) каждой из наложенных голограмм ($i=1,2,\dots$), используя формулу:

$$ДЭ_i = (I_d)_{i \max} / I_{\text{пад}} \quad (1),$$

где $(I_d)_{i \max}$ – максимальное значение интенсивности дифрагированного излучения i -той голограммы, $I_{\text{пад}}$ – интенсивность падающего излучения. Данные занести в табл.1 и табл.3.

2. Рассчитать φ , заполнив столбец 3 в таблице 2. Расчет производить по формуле:

$$\varphi = (N_i - N_0) \cdot q \text{ [радиан]} \quad (2),$$

где рекомендуется использовать $(N_i - N_0)$ [мм] и q [радиан/мм].

3. Построить график зависимости $I_d(\varphi)$ для исследуемой мультиплексной голограммы, как показано на рис.8.
4. Определить угловую селективность ($\otimes\theta_i$) каждой из наложенных голограмм. $\otimes\theta_i$ определяется как полуширина соответствующего (i -того) пика зависимости $I_d(\varphi)$ как показано на рис.8. $\otimes\theta_i$ оценить в мрад. Данные занести в табл.3.
5. Оценить информационную емкость (V) единицы площади виртуального оптического элемента – голографического диска, который может быть изготовлен на основе использованного в данной работе образца регистрирующей среды, заполнив таблицу 4.
6. Проанализировать полученные результаты и сделать выводы.

Таблица 3. Параметры наложенных голограмм.

№ наложенной голограммы	Дифракционная эффективность	Угловая селективность, $\otimes\theta_{\perp}$, мрад	Примечания
1			
2			
3			
....			

Таблица 4. Информационная емкость единицы площади виртуального голографического компакт-диска при различных условиях считывания.

№ п/п	Форма записи	Изменение угла падения считывающего пучка – $\Delta\Phi$	Инф.емкость на ед. площади, V	
			Страниц	Бит
1	Постранично	0 (без изменения)	1	50
2	Постранично	1 град		
3	Постранично	0,1 радиан		
4	Постранично	5 град		
5	Постранично	0,01 радиан		

Исходные данные для заполнения таблицы 4.

- Одна голограмма представляет собой один фрагмент регистрируемой информации, т.е. одну страницу текста;
- При записи одной голограммы (одной страницы текста) информационная емкость единицы площади виртуального диска - $V_1=50$ бит;
- Угловое расстояние между соседними голограммами при считывании отдельных наложенных голограмм ($\otimes\Phi$) составляет величину $2,5\otimes\theta$;
- $\otimes\theta$ определяется как среднее измеренное значение по табл.3.
- Элемент рассчитан на работу в заданном диапазоне углов падения ($\otimes\Phi$) считывающего пучка на образец-носитель (данные в столбце 3 таблицы 4).

- Информационная емкость единицы площади диска V определяется количеством наложенных голограмм на данном участке диска, которые могут быть зарегистрированы при заданном $\otimes\Phi$, и значением угловой селективности отдельных голограмм $\otimes\theta$. Расчет производится по формуле:

$$V = V_1 (\otimes\Phi/\otimes\varphi) = V_1(\otimes\Phi/ 2,5\otimes\theta) \quad (3).$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Проблемы когерентной и нелинейной оптики. – СПб: СПб ГУ ИТМО. – 2006. – С.6-36.
2. Денисюк Ю.Н. Принципы голографии. – Л.:ГОИ. – 1978. – С.125
3. Акаев А. Оптические методы обработки информации. – СПб: СПб ГУ ИТМО. – 2005.
4. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. – М.:Мир. – 1973. – С.686
5. Оптическая голография.: Под ред. Колфилда Г. – М.:Мир. –1982. – Т.1, т.2.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключаются преимущества использования голографической памяти?
2. Что такое наложенная запись голограмм, и для какого типа голограмм она возможна?
3. За счет чего производится уплотнение информации в устройствах хранения информации?
4. Основные свойства объемных голограмм?
5. Что такое «селективность голограммы»?
6. Как записываются наложенные голограммы?
7. Дать определение дифракционной эффективности голограммы.
8. Дать определение условия Брэгга.
9. Как изменяется угол Брэгга ($\theta_{\text{бр}}$) при переходе от одной наложенной голограммы к другой в данной работе?

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 (ξ , η , ζ), которые обратно пропорциональны периодам волны, измеренным по осям x , y и z , соответственно:

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

где α , β , γ – 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; λ – 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).

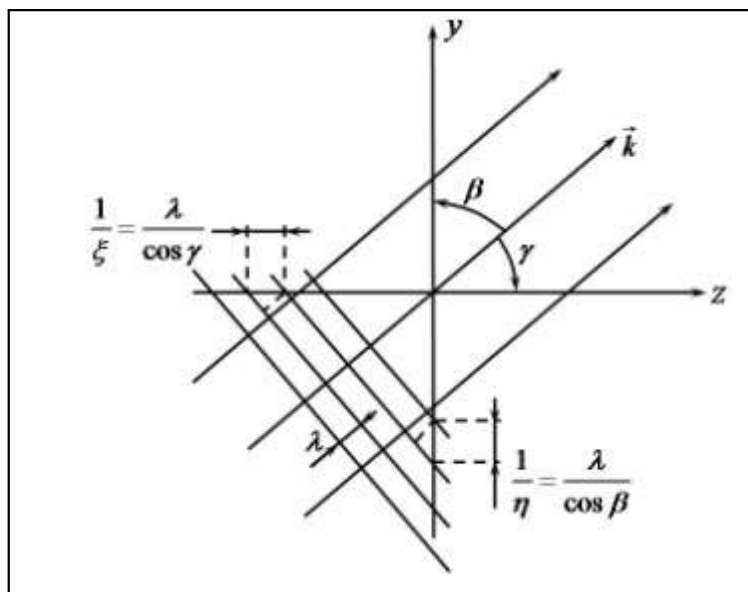


Рис.1. Распространение плоской монохроматической волны с волновым вектором \mathbf{k} в плоскости yz .

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° 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.)

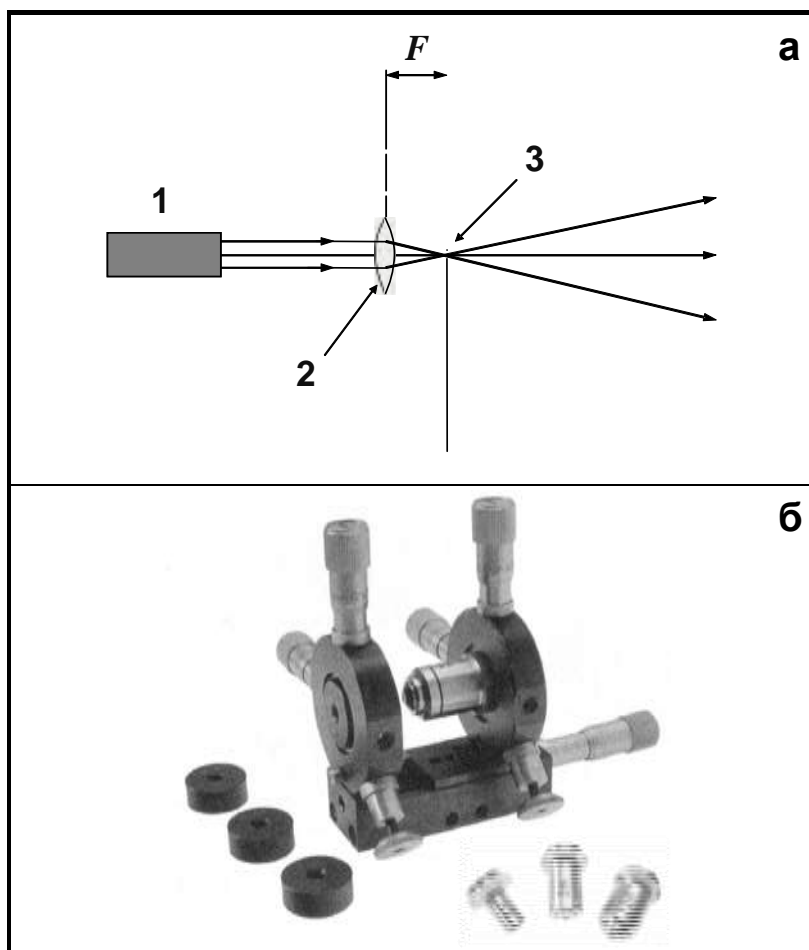


Рис.2.Пространственная фильтрация лазерного излучения. а – принципиальная оптическая схема: 1 – лазер, 2 – линза (микрообъектив), 3 – диафрагма; б – оптико-механический узел в сборке.

Размер диафрагмы определяется параметрами используемой оптики и требуемой степенью однородности пучка. В лабораторной практике в качестве точечной диафрагмы, как правило, используют круглые отверстия диаметром $(10 \div 30)$ 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.

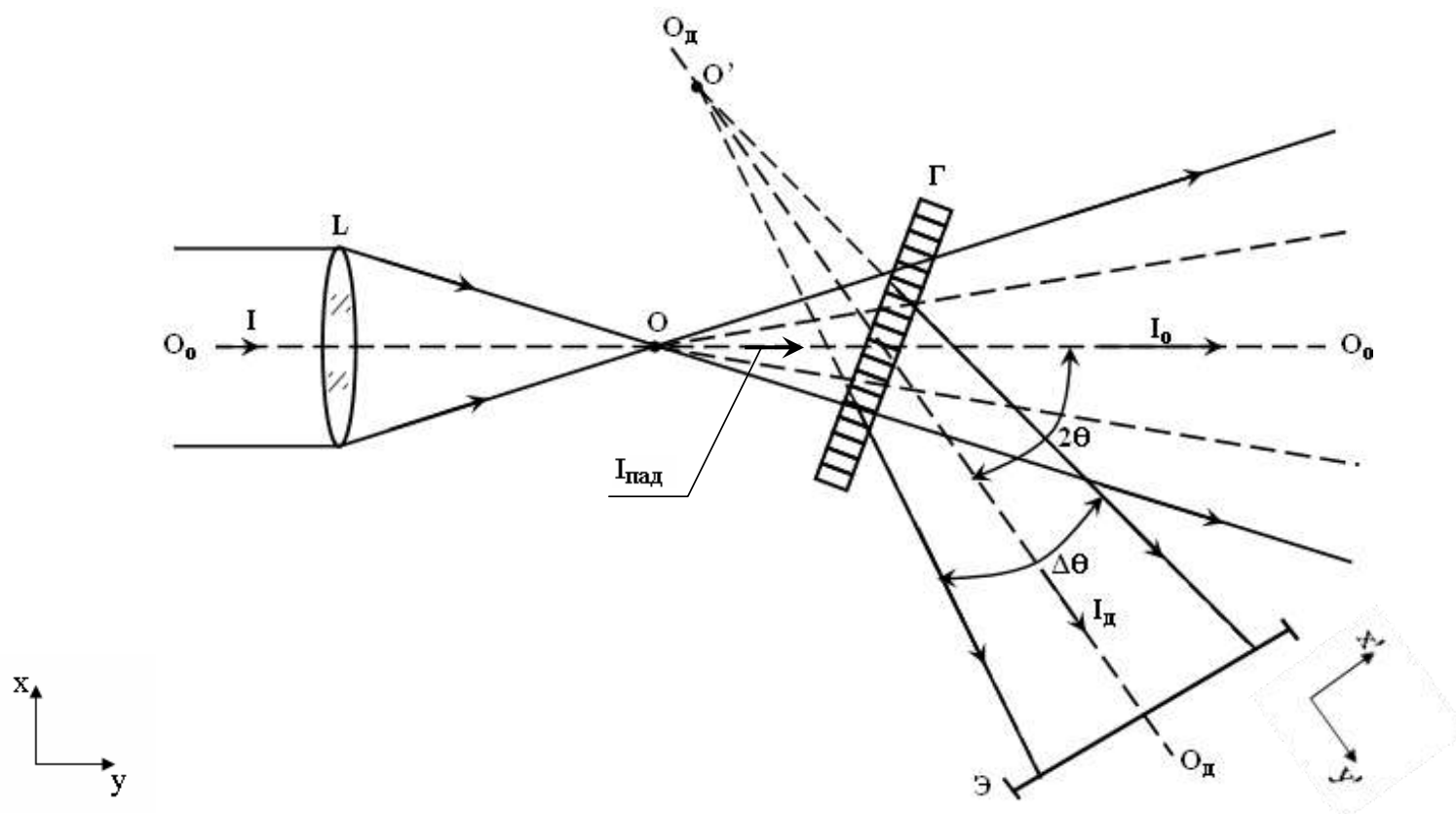


Рис.3. Оптическая схема для демонстрации пространственной фильтрации излучения объемной голограммой в плоскости xy : « $O - O_0$ » - главная оптическая ось (ось y); « $O_d - O_d'$ » - вспомогательная оптическая ось (ось y'); L - линза с фокусом в точке « O » (« O' »); Γ - голограмма, \mathcal{E} - экран, 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 « $0 - 0$ », и имеет относительно этой оси пространственную частоту равную нулю ($\eta = 0$). На оптической оси расположена линза L с фокусом в точке « 0 », формирующая сферический пучок излучения с набором пространственных частот (от $-\eta$ до $+\eta$), который освещает голограмму-решетку (вектор решетки расположен в плоскости чертежа – плоскость xu). При установке голограммы относительно падающего пучка таким образом, чтобы угол 2θ между

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 « $0_d - 0_d$ » (осью y'), так как на ней находится мнимый фокус ($0'$) линзы L . Пространственную частоту дифрагированного излучения (η') 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.

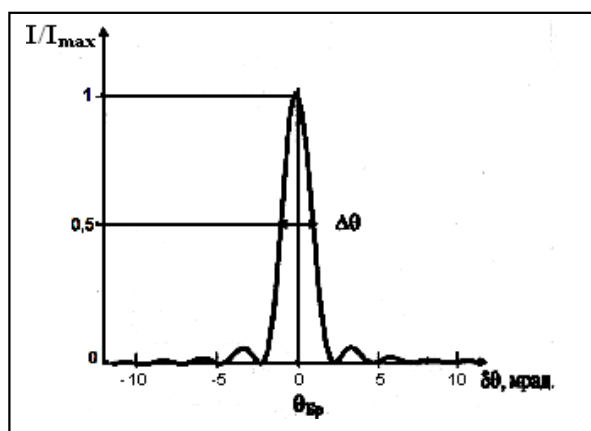


Рис.4. Распределение интенсивности дифрагированного излучения по оси x' в угловых единицах при считывании голограммы в «условиях Брэгга».

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).

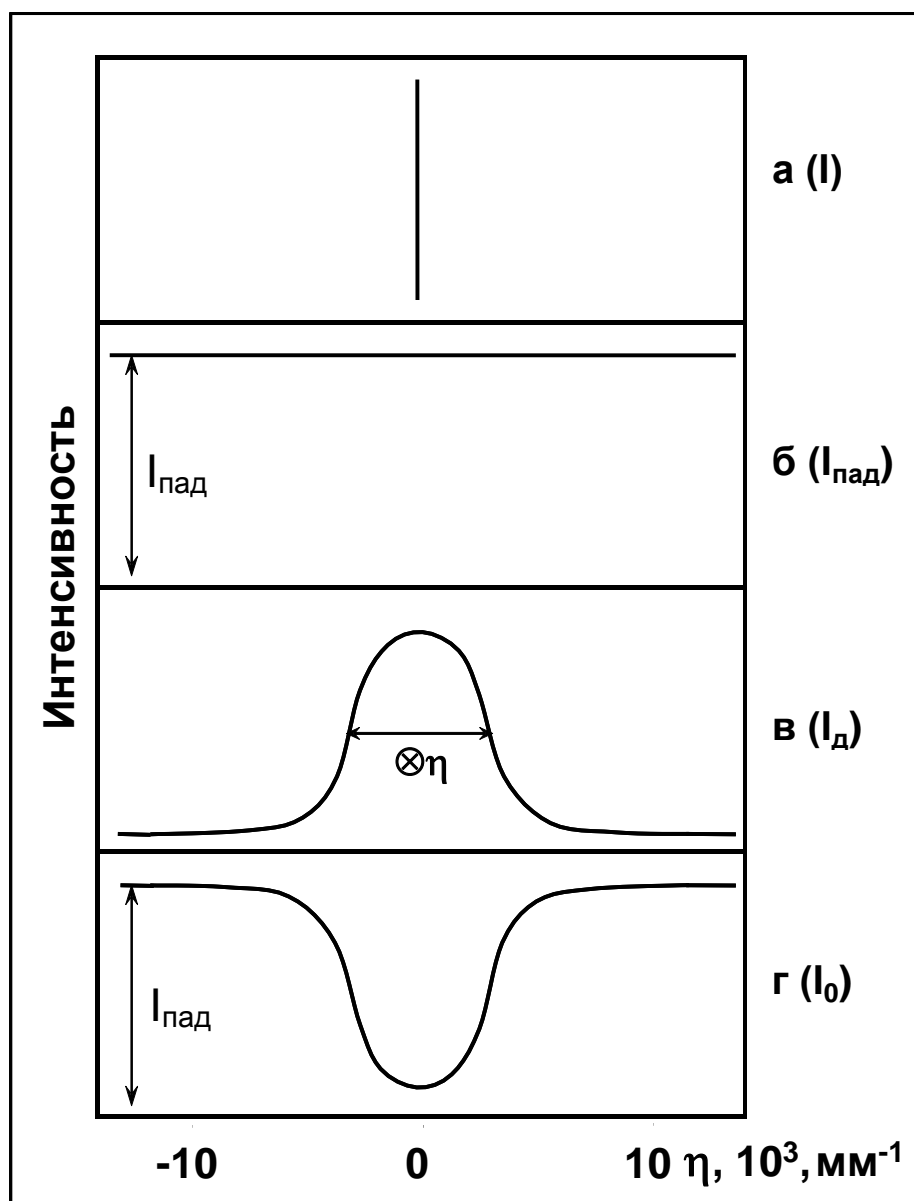


Рис.5. Схематическое представление спектров пространственных частот, измеренных относительно оптической оси (в соответствии со схемой рис.3): а – исходный лазерный пучок (I); б – считывающее голограмму излучение ($I_{\text{пад}}$); в – дифрагированное излучение ($I_{\text{д}}$), $\Delta\eta$ – ширина полосы частот дифрагированного излучения; г – излучение,

прошедшее голограмму без изменения направления (I_0). Пространственная частота дифрагированного излучения (η') 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 (η) 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.

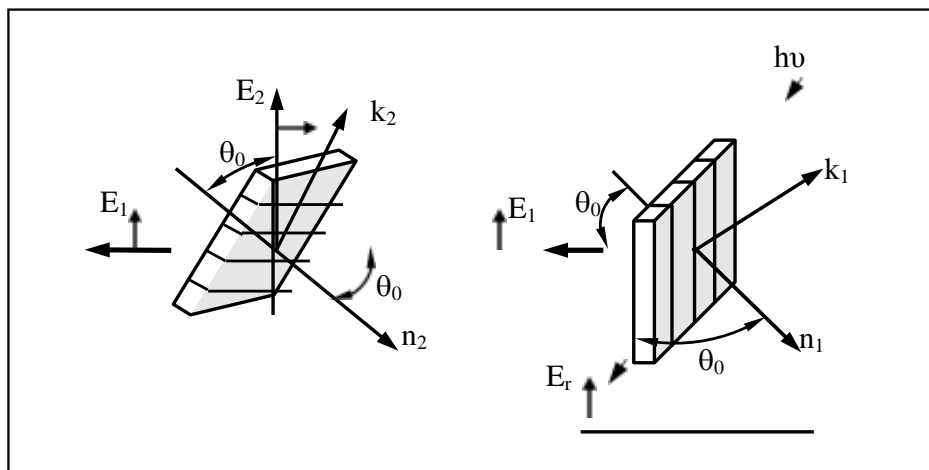


Рис.6. Голографический двухкоординатный фильтр пространственных частот излучения: n_1, n_2 - нормали к поверхности голограммы; $\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2$ - векторы решетки; \mathbf{E}_r - электрический вектор падающего пучка; $\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2$ - электрические векторы дифрагированных волн.

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.

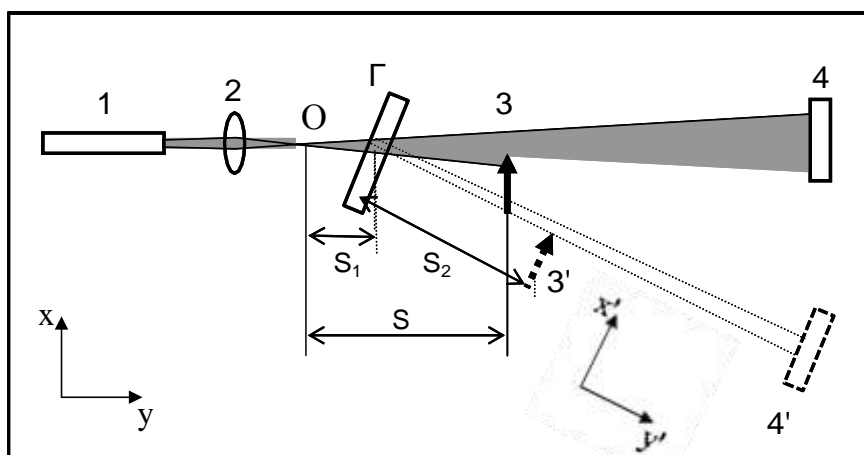


Рис.7. Оптическая схема установки для исследования фильтрующих свойств объемной голограммы-решетки: 1 – источник излучения (лазер), 2 – цилиндрическая линза, 3(3') – нож, 4(4') – приемник излучения; 0 – фокус линзы, Г – голограмма.

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.

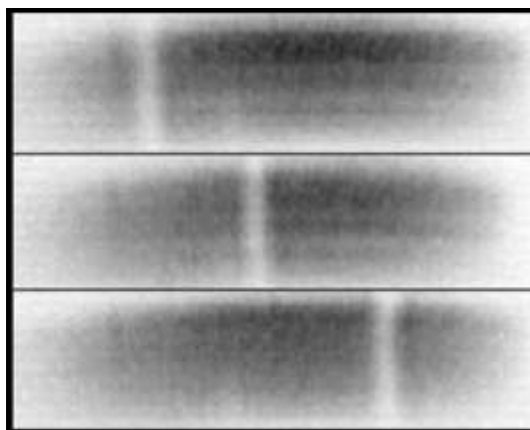


Рис.8.Нулевой порядок дифракции - наблюдение полосы, обусловленной дифракцией излучения в первый порядок (на рисунке приведено негативное изображение картины, экспериментально наблюдаемой на экране).

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 $R_{н}$ 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 устанавливать 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 $R_{н}$ 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 МВ (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 освещающей голограмму пучке ($I_{\text{пад}}$), (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 МВ, 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 МВ (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: $R_n =$ _____; $S =$ _____.

№ п/п	Положение барабана MB, мм	Смещение ножа, L_n , мм	Положение ножа на оси x, мм	Простр. частота, η , 10^3 , 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: $R_n =$ _____; $S_1 =$ _____; $S_2 =$ _____.

№ п/п	Положение барабана MB, мм	Смещение ножа, L_n , мм	Положение ножа на оси x, мм	Простр. частота, η , 10^3 , 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

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

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

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

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?

ПРИЛОЖЕНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

Приложение 1. Методика определения дифракционной эффективности и угловой селективности голограмм.

1.1. Описание экспериментальной установки.

Для измерения параметров пропускающих голограмм-решеток в монохроматическом свете используется установка, оптическая схема которой приведена на рисунке 1.

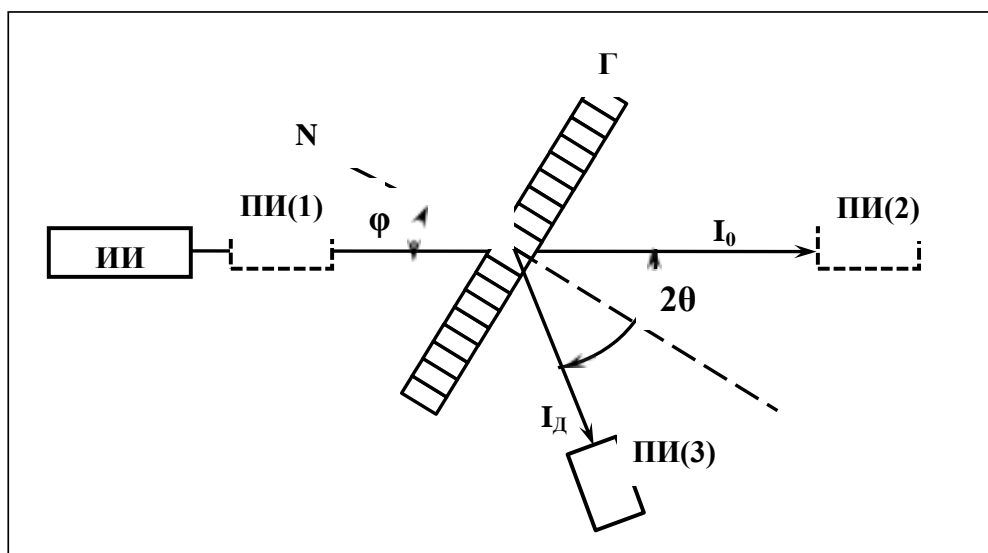


Рис.1. Оптическая схема установки для измерения дифракционной эффективности и контура угловой селективности пропускающей голограммы-решетки. ИИ – источник излучения; ПИ – приемник излучения, который может быть установлен в положения 1,2,3; Г – голограмма; N – нормаль к поверхности голограммы; I_0 и I_d – нулевой и дифрагированный пучки излучения; φ – угол поворота образца относительно падающего пучка; 2θ – угол между нулевым и дифрагированным пучками излучения.

Освещение голограммы производится коллимированным монохроматическим излучением с длиной волны $\lambda_{\text{счит}}$ (кроме термина - $\lambda_{\text{счит}}$ - «длина волны считывающего излучения» используется также термин «рабочая длина волны» - $\lambda_{\text{раб}}$ - длина волны, при которой производится оценка параметров голограммы). В качестве источника излучения, как правило, используется лазер с излучением определенной длины волны, необходимой для проведения данного эксперимента.

Голограмма (Г) располагается на столике, позволяющем осуществлять поворот образца вокруг вертикальной оси с необходимой точностью. Вращение столика осуществляется микрометрическим винтом (МВ). Излучение лазера должно проходить через ось вращения столика. Приемник излучения (ПИ) подключен к измерительному (регистрирующему) прибору. При использовании в качестве измерительного прибора мультиметра рекомендуется проводить измерения по шкале измерения токов (А), так как показания амперметра прямо пропорциональны потоку излучения, падающему на входное окно приемника излучения. При проведении измерений приемник излучения ставится в положения (1), (2) и (3) в зависимости от поставленной задачи. Обязательным условием в каждом случае является перпендикулярность пучка измеряемого излучения поверхности входного окна приемника излучения.

Угол между нулевым и дифрагированным пучками – 2θ , соответствующий максимальному значению интенсивности дифрагированного излучения, определяется условием Брэгга:

$$2d \sin\theta_{\text{бр}} = \lambda < < \quad (1),$$

где d – период голограммы-решетки, θ – угол между направлением распространения волны и плоскостью решетки, λ – длина волны излучения.

1.2. Дифракционная эффективность и ее определение.

Дифракционная эффективность (ДЭ) является параметром, который характеризует КПД голограммы, то есть долю потока излучения, направляемую в дифрагированную волну: при освещении трехмерных голограмм существует только один порядок дифракции, определяющий величину ДЭ данной голограммы; при освещении двумерных – несколько порядков, в этом случае ДЭ голограммы определяется для каждого порядка дифракции. ДЭ зависит от типа голограммы, свойств регистрирующей среды, методов постэкспозиционной обработки, условий регистрации и освещения голограммы и является ее важнейшей количественной характеристикой.

Обычно дифракционную эффективность голограммы в данном порядке дифракции определяют как отношение потока излучения в дифрагированной волне данного порядка дифракции $(P_{\text{д}})_n$ к падающему на голограмму потоку излучения $(P_{\text{пад}})$:

$$\text{ДЭ} = (P_{\text{д}})_n / (P_{\text{пад}}) \quad (2).$$

Для характеристики параметров голограмм, имеющих потери (на поглощение, рассеяние, отражение и так далее), используют приведенные,

или нормированные значения ДЭ, определенные как отношение $(P_d)_n$ к сумме потоков излучения всех порядков дифракции, включая нулевой. В этом случае для объемной голограммы, формирующей один дифракционный порядок, использую выражение:

$$ДЭ = (P_d)_1 / \{(P_d)_1 + (P_d)_0\} \quad (3).$$

Необходимо учитывать, что при использовании различных вариантов определения, значения ДЭ одной и той же голограммы могут существенно различаться между собой. Поэтому в дальнейшем будем называть определение ДЭ по формуле (2) «Вариант 1», а определение ДЭ по формуле (3) – «Вариант 2».

На практике, при проведении голографических экспериментов, когда необходимо характеризовать зависимость ДЭ голограммы от ряда параметров (экспозиции, пространственной частоты, длины волны считывающего излучения, времени и условий эксплуатации голограммы и т.д.) зачастую используют значения ДЭ в относительных единицах. Корректное сравнение параметров голограмм в абсолютных единицах, в том числе и сравнение по значениям ДЭ, можно проводить только для голограмм-решеток.

При проведении измерений наравне с понятием потока излучения – P зачастую используют понятие интенсивности излучения – I , что при проведении измерений потока излучения в относительных единицах является вполне корректным.

Порядок проведения эксперимента при определении ДЭ по формуле (2) – «Вариант 1».

1. Установить образец на поворотный столик таким образом, чтобы излучение лазера попадало на исследуемую голограмму.
2. Установить голограмму в положение, при котором выполняются условия Брэгга, т.е. $\theta = \theta_{Br}$: поворачивая голограмму относительно падающего излучения, найти положение, при котором дифрагированное излучение (-1)-го порядка имеет максимальную яркость при визуальном контроле (см. рис.1).
3. Подготовить таблицу для записи результатов измерений – типичный вид записи результатов измерений представлен в таблице 1.
4. Установить приемник излучения в положение «3», соответствующее измерению интенсивности дифрагированного пучка (-1)-го порядка (см. рис.1). Проверить перпендикулярность положения фотоприемника относительно падающего пучка.

5. Поворачивая голограмму вокруг вертикальной оси относительно падающего пучка с помощью микрометрического винта, найти максимальное значение интенсивности дифрагированного пучка – $(I_d)_{\max}$ и записать его. (При использовании в качестве измерительного прибора мультиметра измерения рекомендуется проводить по шкале мультиметра «А»; результат записать в столбец 3 таблицы 1).
6. Установить приемник излучения в положение «1» и измерить интенсивность падающего излучения - $I_{\text{пад}}$. (Результат записать в столбец 4 таблицы 1)
7. Если имеются несколько порядков дифракции, определить аналогичным образом значение дифракционной эффективности наиболее ярких из них, например, +1 и ± 2 порядков, при положении голограммы, в котором производилось измерения ДЭ (-1)-го порядка.
8. Вычислить значение ДЭ по формуле (2). Результат записать в столбец 5 таблицы 2.

Таблица 1. Измерение дифракционной эффективности голограмм – «Вариант 1».

№	№ дифр. порядка	Поток излучения при $\theta = \theta_{\text{бр}}$, I, мкА		ДЭ = $(I_d)_{\max}/(I_{\text{пад}})$, %
		$(I_d)_{\max}$	$I_{\text{пад}}$	
1	2	3	4	5
Голограмма № _____				
Образец № _____				

Порядок проведения эксперимента при определении ДЭ трехмерных голограмм по формуле (3) – «Вариант 2».

1. Установить образец на поворотный столик таким образом, чтобы излучение лазера попадало на исследуемую голограмму.
2. Установить голограмму в положение, при котором выполняются условия Брэгга, т.е. $\theta = \theta_{\text{бр}}$: поворачивая голограмму относительно падающего излучения, найти положение, при котором дифрагированное излучение (-1)-го порядка имеет максимальную яркость при визуальном контроле (см. рис.1).

3. Подготовить таблицу для записи результатов измерений – типичный вид записи результатов измерений представлен в таблице 2.
4. Установить приемник излучения в положение «3», соответствующее измерению интенсивности дифрагированного пучка (-1)-го порядка (см.рис.1). Проверить перпендикулярность положения фотоприемника относительно падающего пучка.
5. Поворачивая голограмму вокруг вертикальной оси относительно падающего пучка с помощью микрометрического винта, найти максимальное значение интенсивности дифрагированного пучка – $(I_d)_{\max}$ и записать его в столбец 3 таблицы 2. (При использовании в качестве измерительного прибора мультиметра измерения рекомендуется проводить по шкале мультиметра «А».)
6. Установить приемник излучения в положение «2» (см. рис.1) и измерить интенсивность нулевого дифракционного порядка излучения – I_0 . Результат записать в столбец 4 таблицы 1.
7. Вычислить значение ДЭ по формуле (3). Результат записать в столбец 5 таблицы 2.

Таблица 2. Измерение дифракционной эффективности трехмерных голограмм – «Вариант 2».

№	№ дифр. Порядка	Поток излучения при $\theta = \theta_{\text{Бр}}$, I, мкА		ДЭ = $(I_d)_{\max} / \{(I_d)_{\max} + I_0\}$, %
		$(I_d)_{\max}$	I_0	
1	2	3	4	5
Голограмма № Образец № _____				

Измерение ДЭ высокоселективных объемных голограмм.

Как известно (см. «Условие Брэгга»), максимум интенсивности волны, дифрагированной на объемной голограмме-решетке с периодом d , наблюдается при угле Брэгга ($\theta_{\text{Бр}}$) и длине волны Брэгга ($\lambda_{\text{Бр}}$). При отклонении от условий Брэгга ($\theta = \theta_{\text{Бр}} \pm \delta\theta$ и $\lambda = \lambda_{\text{Бр}} \pm \delta\lambda$) интенсивность дифрагированной волны уменьшается (см. рис.2). При использовании высокоселективных объемных голограмм для того, чтобы при проведении измерений вывести голограмму из условий Брэгга, необходимы очень небольшие изменения $\delta\theta$ и $\delta\lambda$. С одной стороны, это предъявляет

высокие требования к параметрам измерительных стендов, с другой стороны, дает возможность производить измерения ДЭ при установке приемника излучения в нулевом пучке, не меняя его положения при проведении измерений, что является предпочтительным для повышения точности измерений. В этом случае при повороте голограммы относительно падающего пучка находится минимальное значение I_0 , которое регистрируется при угле Брэгга ($\theta_{\text{Бр}}$) и обозначается как $(I_0)_{\text{Бр}}$. Затем голограмма выводится из условий Брэгга и при достижении $I_d = 0$ регистрируется $(I_0)_{\text{внеБр}}$, которое является максимальным значением интенсивности нулевого пучка при данном положении голограммы относительно падающего пучка. Поворот объемной высокоселективной голограммы при проведении двух измерений $(I_0)_{\text{Бр}}$ и $(I_0)_{\text{внеБр}}$ составляет всего несколько угловых минут, что позволяет производить расчет $(I_d)_{\text{Бр}} = (I_d)_{\text{max}}$ без учета изменения френелевского отражения по формуле:

$$(I_d)_{\text{Бр}} = (I_0)_{\text{вне Бр}} - (I_0)_{\text{Бр}} \quad (4).$$

$$\text{При этом} \quad (I_0)_{\text{вне Бр}} = (I_0)_{\text{Бр}} + (I_d)_{\text{max}} \quad (5),$$

что позволяет определить ДЭ голограммы, используя формулу (3) - «по варианту 2»:

$$\text{ДЭ} = \{(I_0)_{\text{вне Бр}} - (I_0)_{\text{Бр}}\} / (I_0)_{\text{внеБр}} \quad (6).$$

Порядок проведения эксперимента при определении ДЭ высокоселективных объемных голограмм по формуле (6) – «Вариант 2»..

1. Установить образец на поворотный столик таким образом, чтобы излучение лазера попадало на исследуемую голограмму.
2. Установить голограмму в положение, при котором выполняются условия Брэгга, т.е. $\theta = \theta_{\text{Бр}}$ (см. рис.1): вращая голограмму вокруг вертикальной оси, найти положение, при котором дифрагированное излучение (-1)-го порядка имеет максимальную яркость при визуальном контроле.
3. Подготовить таблицу для записи результатов измерений – типичный вид записи результатов измерений в этом случае представлен в таблице 3.
4. Установить приемник излучения в положение «2», соответствующее измерению интенсивности пучка (0)-го порядка дифракции (см. рис.1), т.е. пучка излучения, прошедшего голограмму без изменения направления. Проверить перпендикулярность положения фотоприемника относительно падающего пучка.
5. Поворачивая голограмму относительно падающего пучка с помощью микрометрического винта, найти минимальное значение

интенсивности нулевого пучка, соответствующее $(I_0)_{\text{Бр}}$, (при котором значение интенсивности дифрагированного пучка максимально), и записать его в столбец 2 таблицы 3).

6. Поворачивая голограмму, вывести ее из положения, при котором выполняются условия Брэгга - $(I_0)_{\text{внеБр}}$ регистрируется при исчезновении дифракции излучения на экране - визуальный контроль вести по интенсивности дифрагированного пучка. Результат измерения записать в столбец 3 таблицы 3.
7. Вычислить значение $(I_d)_{\text{Бр}}$ по формуле (4). Результат записать в столбец 4 таблицы 2.
8. Вычислить значение ДЭ по формуле (6). Результат записать в столбец 5 таблицы 3.

Таблица 3. Измерение дифракционной эффективности высоко-селективных объемных голограмм при установке приемника излучения в нулевом пучке – «Вариант 2».

№	Поток излучения I_0 , мкА		$(I_d)_{\text{Бр}}$	ДЭ = $(I_d)_{\text{Бр}}/(I_0)_{\text{внеБр}}$, %
	$(I_0)_{\text{Бр}}$	$(I_0)_{\text{внеБр}}$		
1	2	3	4	5
Голограмма №				
Образец №				

1.3. Селективность голограммы и ее определение.

Селективность голограммы (СГ) – свойство голограммы, заключающееся в уменьшении интенсивности дифрагированной (восстановленной) волны (I_d) при отклонении условий считывания голограммы от оптимальных, определяемых условием Брэгга. Различают спектральную селективность голограммы, связанную с изменением длины волны восстанавливающего излучения и угловую селективность, обусловленную изменением пространственного спектра восстанавливающей волны. Высокой селективностью обладают объемные голограммы. Плоские голограммы (как и плоские дифракционные решетки) неселективны. Количественно СГ можно оценить только для элементарной голограммы, голограммы-решетки, полученной при взаимодействии двух плоских волн. Максимум интенсивности дифрагированной волны наблюдается при угле Брэгга ($\theta_{\text{Бр}}$) и длине волны

Брэгга ($\lambda_{\text{Бр}}$). При отклонении от условий Брэгга ($\theta = \theta_{\text{Бр}} \pm \delta\theta \ll$ и $\lambda = \lambda_{\text{Бр}} \pm \delta\lambda$) интенсивность дифрагированной волны уменьшается (см.рис.2).

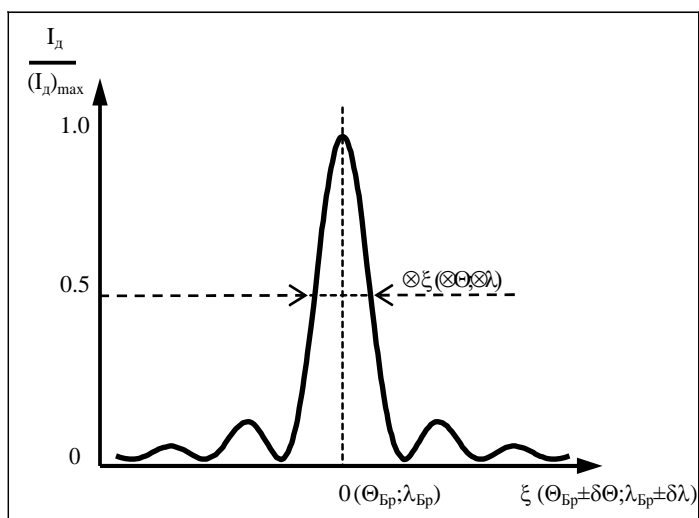


Рис.2.Изменение интенсивности дифрагированного излучения при отклонении от условий Брэгга.

Количественно угловая селективность голограммы определяется как интервал углов падения плоской монохроматической восстанавливающей волны на голограмму ($\Delta\theta$), в котором интенсивность дифрагированной волны превышает половину ее максимального значения. Зависимость интенсивности дифрагированного излучения от угла поворота голограммы представляет собой контур угловой селективности голограммы, при экспериментальном получении которого можно провести измерение угловой селективности, определив значение $\Delta\theta$, представляющее собой полуширину данного контура (см.рис.3).

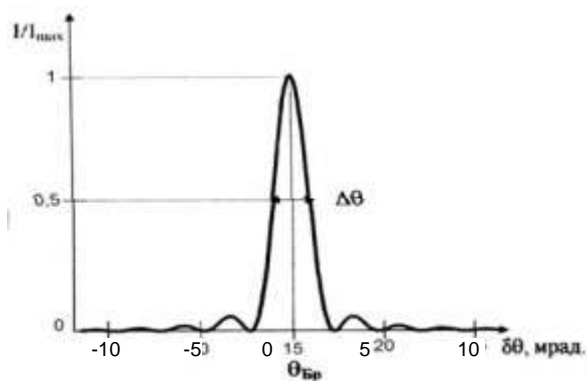


Рис.3.Контур угловой селективности голограммы, нормированный на «1». $\Delta\theta$ - угловая селективность голограммы.

Селективность зависит от параметров голограммы, важнейшими из которых являются пространственная частота голограммы (ν) и ее толщина (T). $\Delta\theta$ и $\Delta\lambda$ изменяются пропорционально $1/T$, в то время как зависимость от ν носит более сложный характер.

Для исследования угловой селективности объемных голограмм используется оптическая схема, приведенная на рис.1, которая позволяет проводить измерения углового распределения интенсивности дифрагированного пучка – $I_d(\theta)$, необходимые для построения контура угловой селективности голограммы – см. рис.3.

Измерение контура угловой селективности трехмерной голограммы

1. Для записи результатов измерений рекомендуется использовать таблицу в форме «таблица 4».
2. Установить фотоприемник в положение (3) (см.рис.1) для измерения интенсивности дифрагированного пучка (-1)-го порядка дифракции.
3. Определить цену деления барабана микрометрического винта (МВ) в угловых единицах (q , рад/мм), измерив расстояние от вертикальной оси вращения столика с голограммой до горизонтальной оси вращения сердцевинки микрометрического винта. Занести результат в исходные данные к таблице 4.
4. Определить диапазон углов поворота, необходимый для построения контура угловой селективности данной голограммы и рассчитать, с каким шагом необходимо проводить измерения, чтобы при построении контура имелось 20-30 экспериментальных точек. «Шаг измерений» - расстояние между двумя измерениями по барабану МВ – может быть постоянным при проведении измерений одного контура (например, 2; 5; 10 и т.п. делений барабана МВ) или различным на разных участках контура – например, на «крыльях» контура шаг может быть больше, чем в середине контура.
5. Провести измерение контура угловой селективности голограммы, заполнив столбцы 1 и 2 таблицы 4.
6. Рассчитать $\delta\theta$, заполнив столбец 4 в таблице 4. Расчет производить с учетом следующих факторов: при величине $(I_d)_{отн} = 1$ выполняются условия Брэгга для дифракции излучения на голограмме, при этом $\theta = \theta_{бр}$, и, следовательно, $\delta\theta = 0$, и $N_i = N_0$. Тогда значение $\delta\theta$ для всех остальных значений N_i можно вычислить, используя формулу:

$$\delta\theta = (N_i - N_0) \cdot q \text{ [радиан]} \quad (7),$$

где рекомендуется использовать $(N_i - N_0)$ [мм] и q [радиан/мм]

7. Построить график зависимости $I_d(\delta\theta)$ для исследуемой голограммы и определить $\otimes\theta$, как показано на рис.3.

Таблица 4. Данные для построения контура угловой селективности голограммы.

Исходные данные: цена деления барабана МВ - $q =$ _____ радиан/мм
(или $q^1 =$ _____ рад/деление МВ)

Отсчет по барабану МВ, N_i , мм	Интенсивность дифрагированного пучка		$\delta\theta$, рад
	I_i , мкА	$(I_d)_{отн} = I_i / I_{max}$	
1	2	3	4

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 (ξ , η , ζ), 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 α , β , γ – 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; λ – 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).

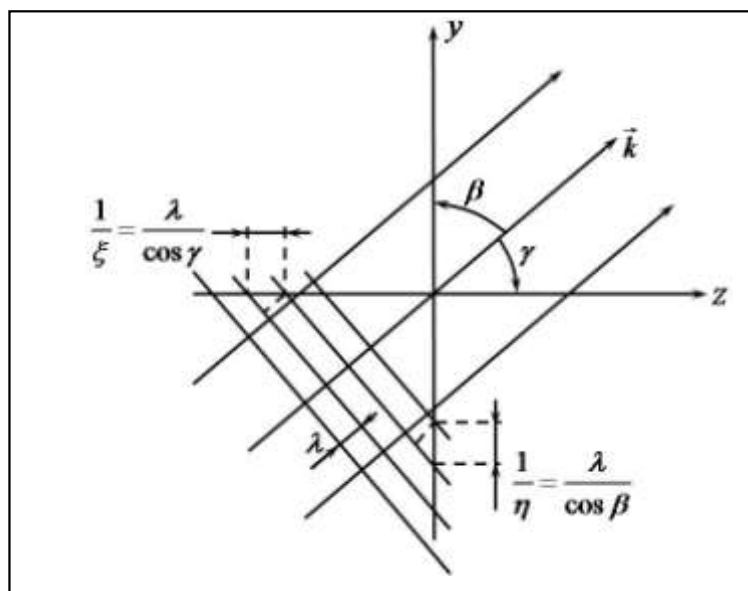


Рис.1. Распространение плоской монохроматической волны с волновым вектором \mathbf{k} в плоскости yz .

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° 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.)

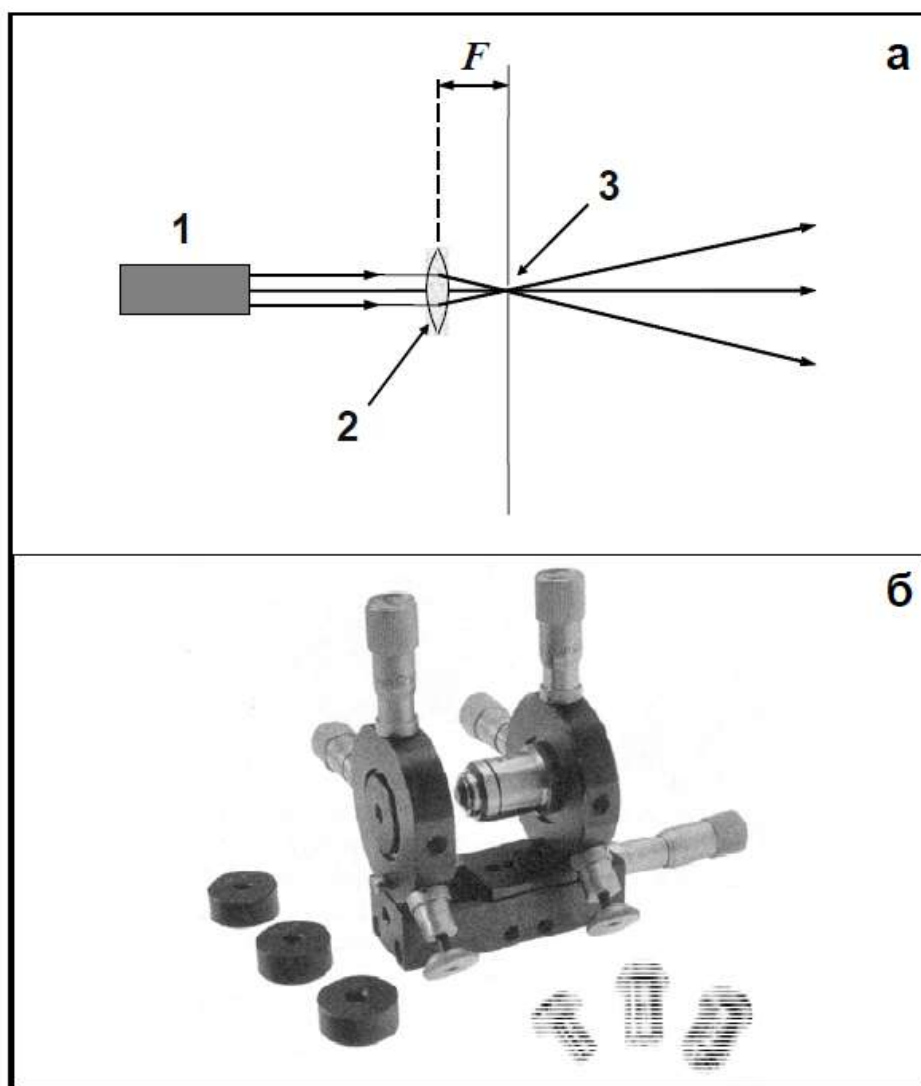


Рис.2.Пространственная фильтрация лазерного излучения. а – принципиальная оптическая схема: 1 – лазер, 2 – линза (микрообъектив), 3 – диафрагма; б – оптико-механический узел в сборке.

Размер диафрагмы определяется параметрами используемой оптики и требуемой степенью однородности пучка. В лабораторной практике в качестве точечной диафрагмы, как правило, используют круглые отверстия диаметром $(10 \div 30)$ 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.

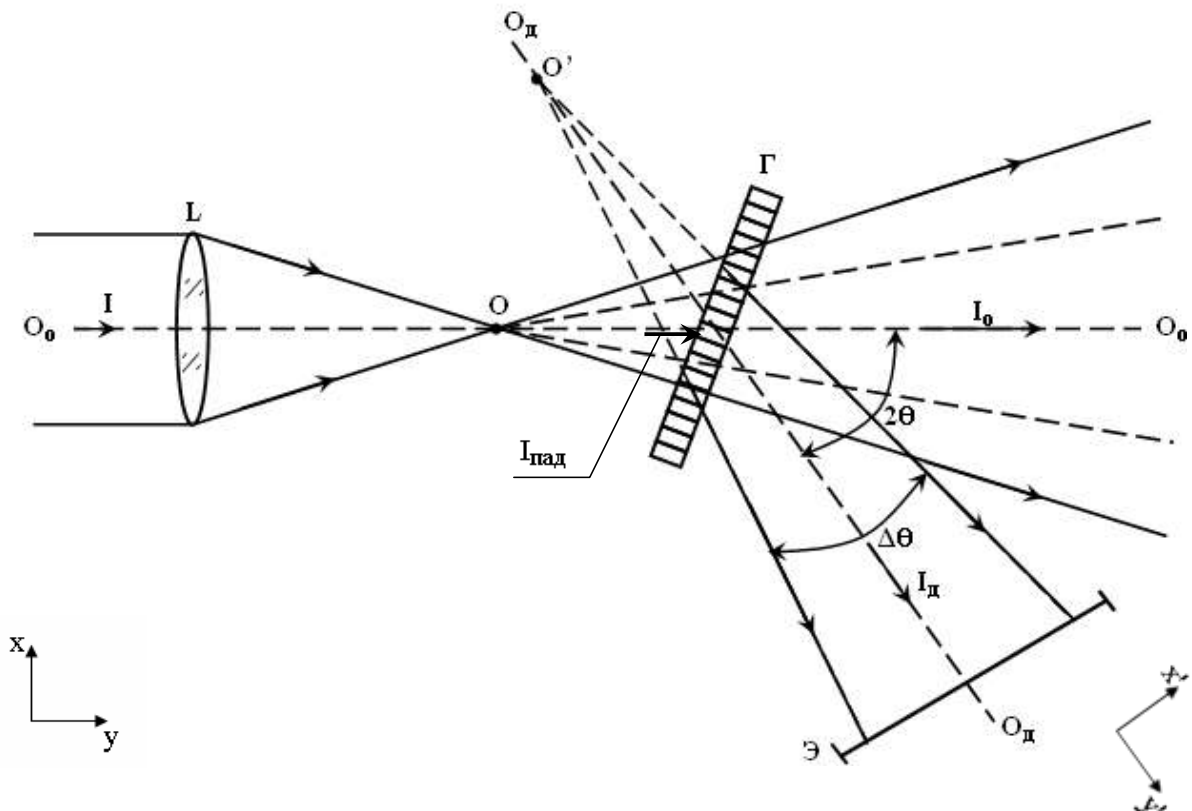


Рис.3. Оптическая схема для демонстрации пространственной фильтрации излучения объемной голограммой в плоскости xy : «0 - 0» - главная оптическая ось (ось y); «0_д-0_д» - вспомогательная оптическая ось (ось y'); L - линза с фокусом в точке «0» («0'»); Г - голограмма, Э- экран, I - плоский монохроматический пучок излучения; I_{пад} - пучок излучения, падающий на голограмму; I₀ - пучок излучения, прошедший голограмму без изменения направления; I_д - дифрагированный пучок. Вектор решетки (**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 «0 - 0», и имеет относительно этой оси пространственную частоту равную нулю ($\eta = 0$). На оптической оси расположена линза L с фокусом в точке «0», 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 2θ между центральным лучом

пучка, прошедшего голограмму без изменения направления (I₀), и центральным лучом дифрагированного пучка (I_д) соответствовал выполнению условия Брэгга данной голограммы-решетки, наблюдается максимальная интенсивность дифрагированной волны. Направление распространения максимума дифрагированной волны будем считать вспомогательной оптической осью «0_д-0_д» (осью y'), так как на ней находится мнимый фокус (0') линзы L. Пространственную частоту дифрагированного излучения (η') 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.

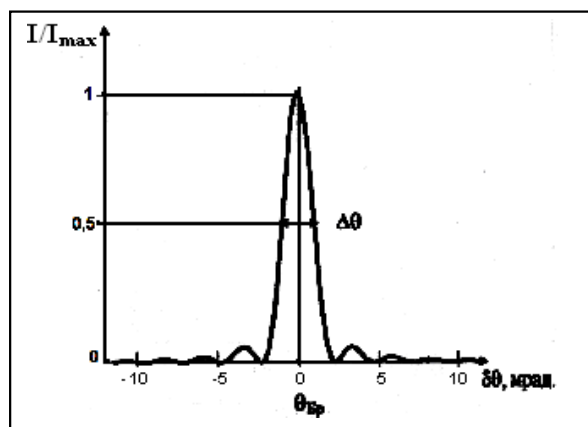


Рис.4. Распределение интенсивности дифрагированного излучения по оси x' в угловых единицах при считывании голограммы в «условиях Брэгга».

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).

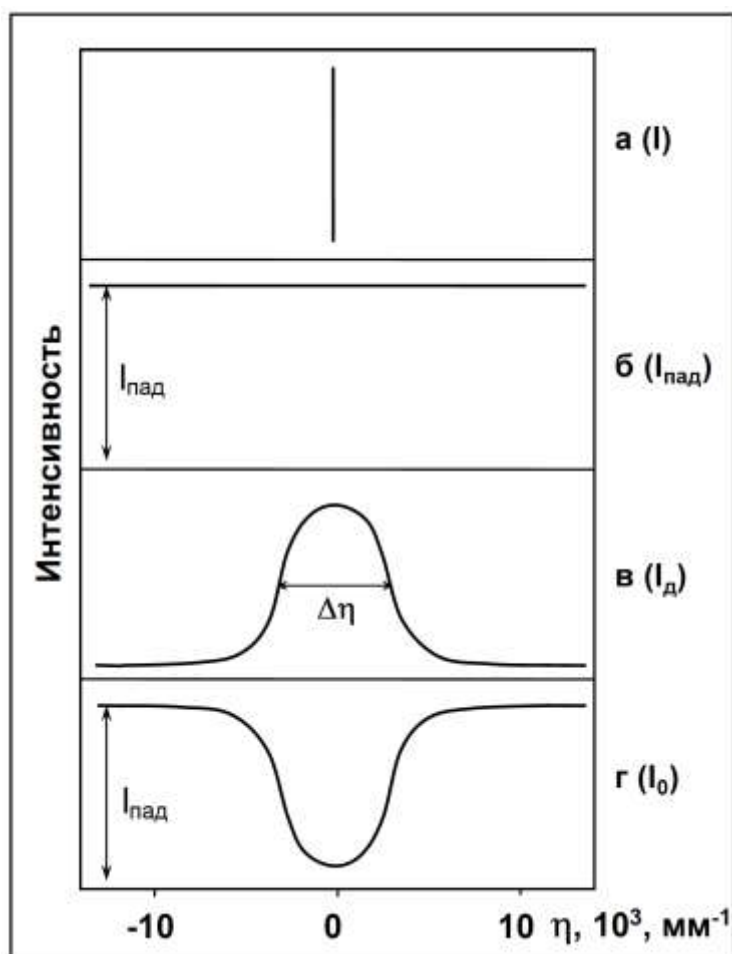


Рис.5. Схематическое представление спектров пространственных частот, измеренных относительно оптической оси (в соответствии со схемой рис.3): а – исходный лазерный пучок (I); б – считывающее голограмму излучение ($I_{\text{пад}}$); в – дифрагированное излучение (I_d), $\Delta\eta$ – ширина полосы частот дифрагированного излучения; г – излучение, прошедшее голограмму без изменения направления (I_0). Пространственная частота дифрагированного излучения (η') 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 (η) 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.

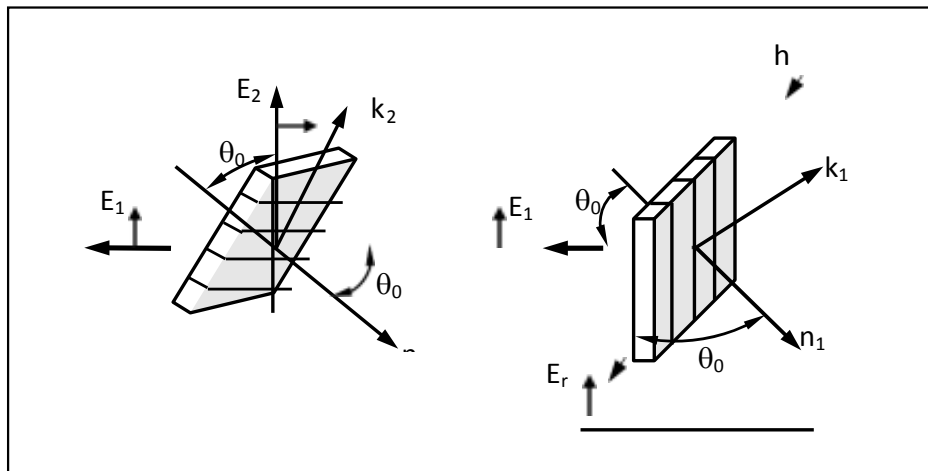


Рис.6. Голографический двухкоординатный фильтр пространственных частот излучения: n_1, n_2 - нормали к поверхности голограммы; $\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2$ - векторы решетки; \mathbf{E}_r - электрический вектор падающего пучка; $\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2$ - электрические векторы дифрагированных волн.

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.

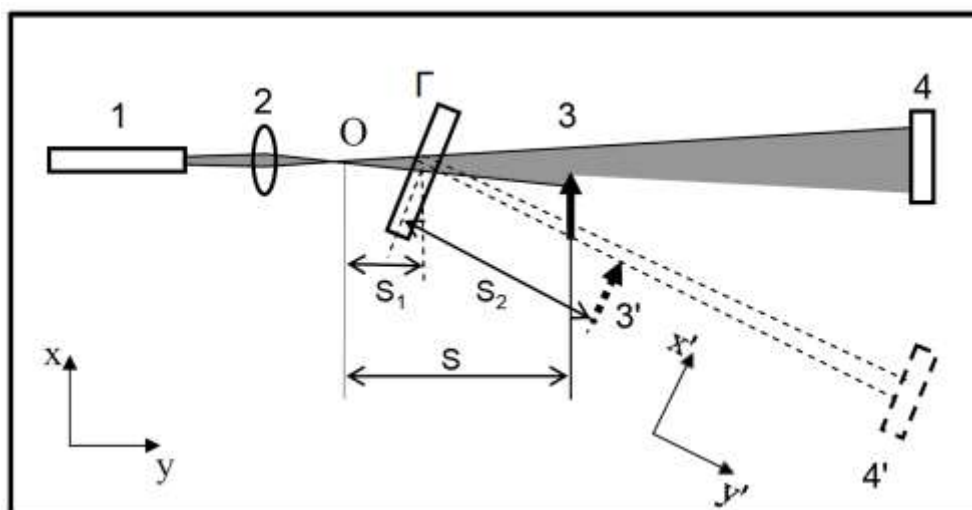


Рис.7. Оптическая схема установки для исследования фильтрующих свойств объемной голограммы-решетки: 1 – источник излучения (лазер), 2 – цилиндрическая линза, 3(3') – нож, 4(4') – приемник излучения; 0 – фокус линзы, Г – голограмма.

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.

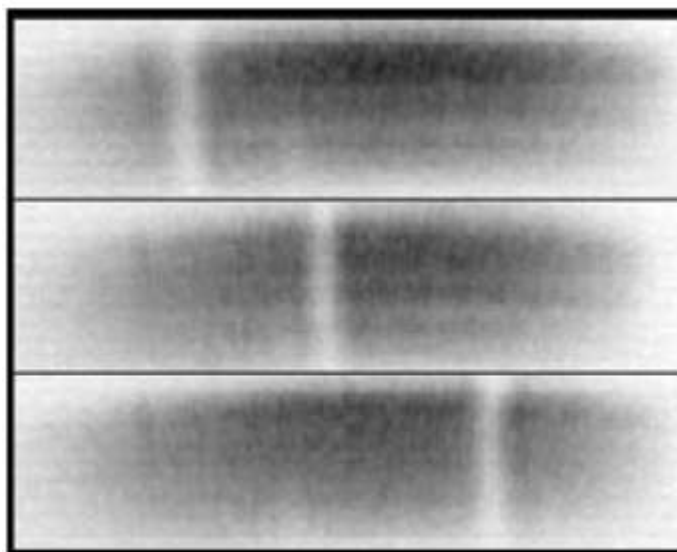


Рис.8.Нулевой порядок дифракции - наблюдение полосы, обусловленной дифракцией излучения в первый порядок (на рисунке приведено негативное изображение картины, экспериментально наблюдаемой на экране).

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 устанавливать 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, η , 10^3 , 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, η , 10^3 , 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?

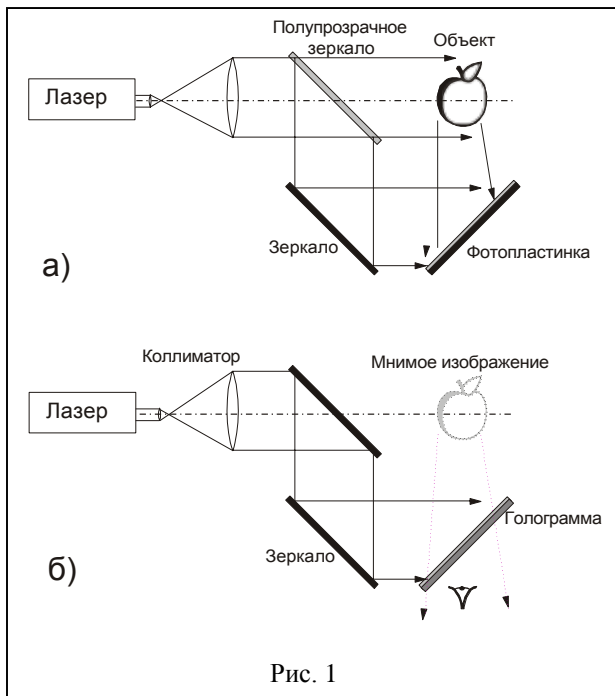
Лабораторная работа № 4

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

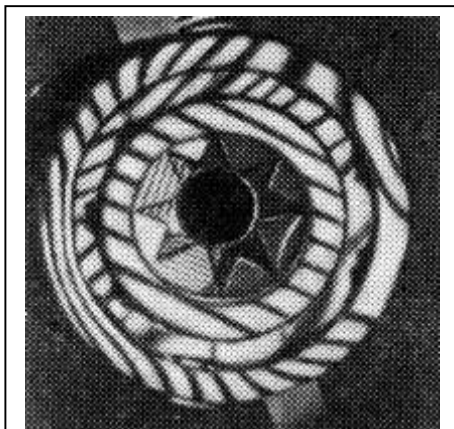


Рис. 2

сложной голограммы опорной волной возникают два световых поля, одно из которых отвечает недеформированному объекту (эталону), 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.

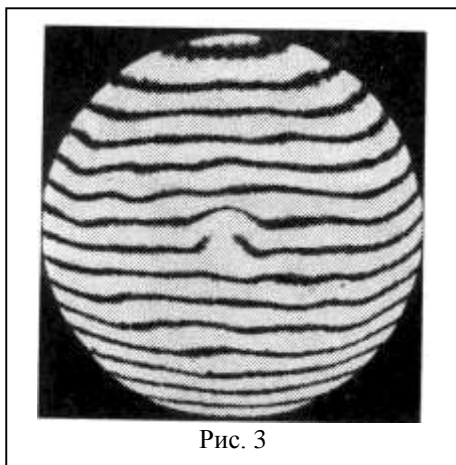


Рис. 3

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 ψ , то голограмма представляет собой дифракционную решетку с периодом

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

где λ_p - длина световой волны при регистрации голограммы.

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

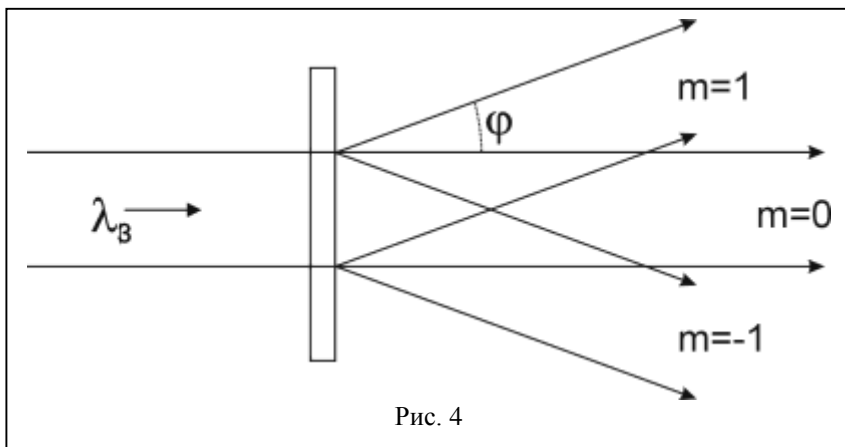


Рис. 4

интенсивности в которой находятся под углами дифракции φ , 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 φ 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

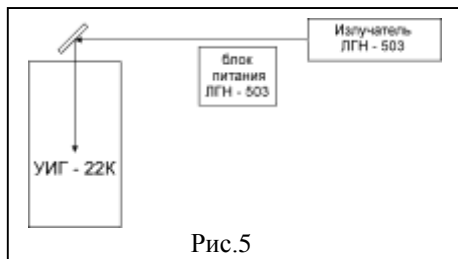


Рис.5

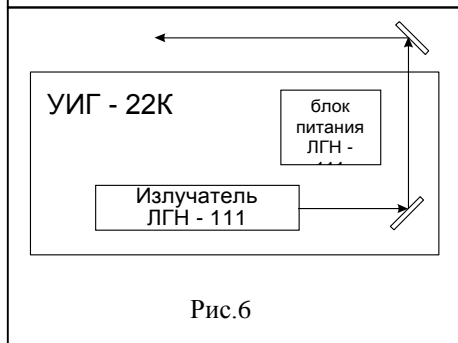


Рис.6

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.

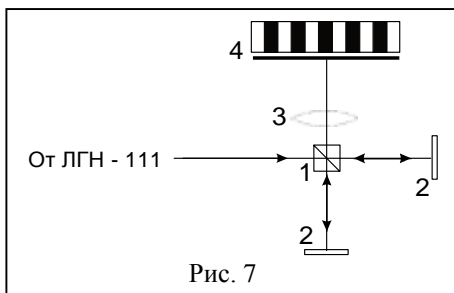
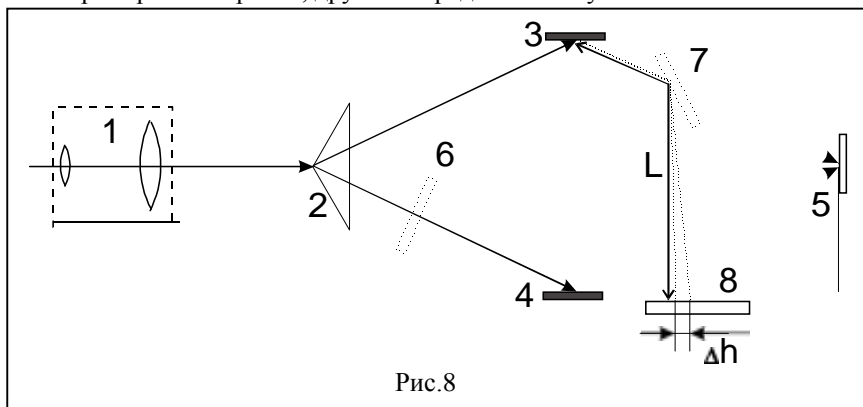


Рис. 7

- 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

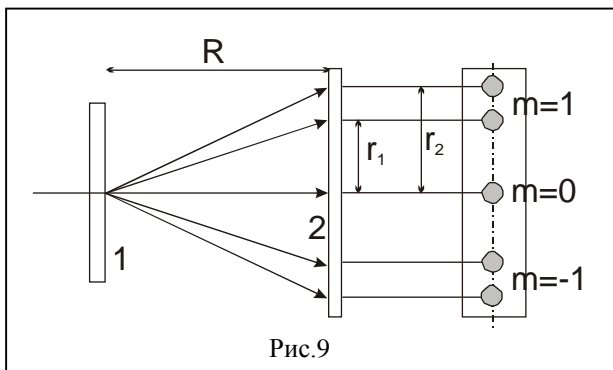


Рис.9

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.