

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

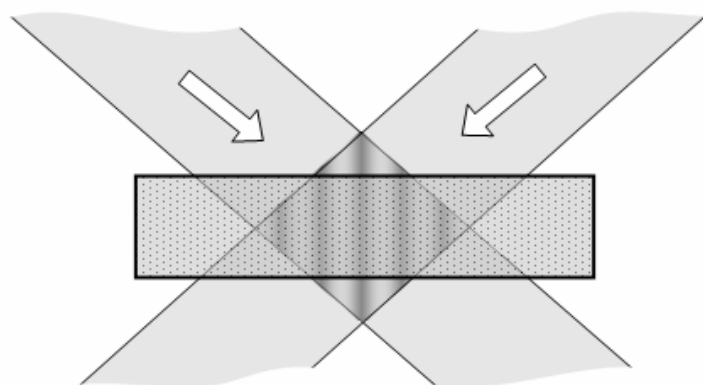


ПОБЕДИТЕЛЬ КОНКУРСА ИННОВАЦИОННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ВУЗОВ

О.В.Андреева, А.А.Парамонов, Н.В.Андреева

ПРИКЛАДНАЯ ГОЛОГРАФИЯ

Методические материалы
к экспериментальному практикуму



Санкт-Петербург

2008

Андреева О.В., Парамонов А.А., Андреева Н.В. ПРИКЛАДНАЯ ГОЛОГРАФИЯ. Методические материалы к экспериментальному практикуму, – СПб: СПбГУИТМО, 2008. – 120 с.

В пособии представлены методические материалы к экспериментальному практикуму по дисциплине «Прикладная голография». Даны описания лабораторных работ с кратким изложением теоретического материала и терминологический словарь, содержащий толкование 70 терминов и понятий, необходимых для подготовки к лабораторным работам.

Предназначено для бакалавров и магистров, обучающихся по направлению «Фотоника и оптоинформатика», а также для студентов оптических и информационных специальностей смежных направлений.

Рекомендовано УМО по образованию в области приборостроения и оптотехники в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 200600 – Фотоника и оптоинформатика.



В 2007 году СПбГУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2008 годы. Реализация инновационной образовательной программы «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий» позволит выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворить возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях экономики.

© Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, 2008

© Андреева О.В., Парамонов А.А., Андреева Н.В., 2008

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	4
Часть 1. Методические материалы к выполнению лабораторных работ экспериментального практикума ...	6
<i>Лабораторная работа №1</i>	
«Основные характеристики объемных голограмм»	7
<i>Лабораторная работа №2</i>	
«Получение изобразительных голограмм по методу Ю.Н. Денисюка»	17
<i>Лабораторная работа №3</i>	
«Получение голограмм на образцах объемного регистрирующего материала»	30
<i>Лабораторная работа №4</i>	
«Элементы оптической памяти на основе мультиплексных голограмм»	50
<i>Лабораторная работа №5</i>	
«Пространственная фильтрация излучения с помощью объемной голограммы»	67
Приложения к лабораторным работам	82
<i>Приложение 1</i>	
Методика определения дифракционной эффективности и угловой селективности голограмм	82
<i>Приложение 2</i>	
Регистрирующий материал «Диффен» для получения объемных голограмм	92
<i>Приложение 3</i>	
Измерение распределения интенсивности в поперечном сечении пучка лазерного излучения методом сканирующего ножа	104
Часть 2. Терминологический словарь	112
Страничка кафедры	148

Предисловие

Данное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению «Фотоника и оптоинформатика» и представляет учебно-методические материалы к экспериментальному практикуму по дисциплине «Прикладная голография». Пособие также может быть рекомендовано в качестве дополнительной литературы по смежным специальностям.

Представленный в пособии материал состоит из двух частей.

Первая часть содержит методические материалы к выполнению пяти лабораторных работ данного экспериментального практикума. Выполнение лабораторных работ данного практикума предусмотрено в учебной лаборатории прикладной голографии кафедры фотоники и оптоинформатики СПб ГУ ИТМО на экспериментальных стендах, разработанных авторами пособия.

Лабораторная работа №1 посвящена практическому знакомству с основными характеристиками голограмм и выполняется фронтально. Работа №2 посвящена получению изобразительных голограмм по методу Ю.Н.Денисюка и знакомит студентов с богатым научным наследием основателя отечественной и мировой школы трехмерной голографии. Работа №3 формирует практические навыки получения объемных голограмм, используемых в качестве оптических элементов. Работа №4 знакомит студентов с элементами оптической памяти на основе голограмм с наложенной записью. Работа №5 посвящена пространственной фильтрации излучения с помощью объемной голограммы-решетки и дает практические навыки применения голографии в задачах оптической обработки информации. Большинство представленных работ основывается на научных методиках, разработанных в коллективе,

который возглавлял Ю.Н.Денисюк, в том числе и при непосредственном участии авторов пособия.

Часть методических материалов, необходимых для выполнения лабораторных работ, вынесена в приложение к первой части. В приложении №1 дано подробное описание методик измерения дифракционной эффективности и угловой селективности голограмм, которые используются в ряде лабораторных работ. В приложении №2 представлена информация о регистрирующем материале «Диффен» для получения объемных голограмм, используемых в работах №1, №3, №4, №5. Приложение №3 включает методику измерения распределения интенсивности в сечении лазерного пучка, необходимую при выполнении работы №5. (Данная методика используется также в экспериментальном практикуме по оптоинформатике учебной лаборатории той же кафедры).

Вторая часть представляет собой подробный терминологический словарь, содержащий все необходимые для подготовки к лабораторным работам понятия по курсу «Прикладная голография». Словарь включает более 70 терминов, является оригинальным материалом и отражает представления русской научной школы голографии, на протяжении многих лет возглавляемой Ю.Н.Денисюком.

Освоение теоретического и экспериментального материала при выполнении данного практикума поможет студентам овладеть практическими навыками проведения голографического эксперимента и использования голограммных элементов в оптических информационных технологиях и научно-исследовательской деятельности.

Авторы выражают надежду на то, что знакомство с техникой проведения голографического эксперимента будет стимулировать повышение интереса студентов к этой области научно-технической деятельности.

Часть 1. Методические материалы к выполнению лабораторных работ экспериментального практикума

ПРИКЛАДНАЯ ГОЛОГРАФИЯ

Лабораторная работа №1

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.

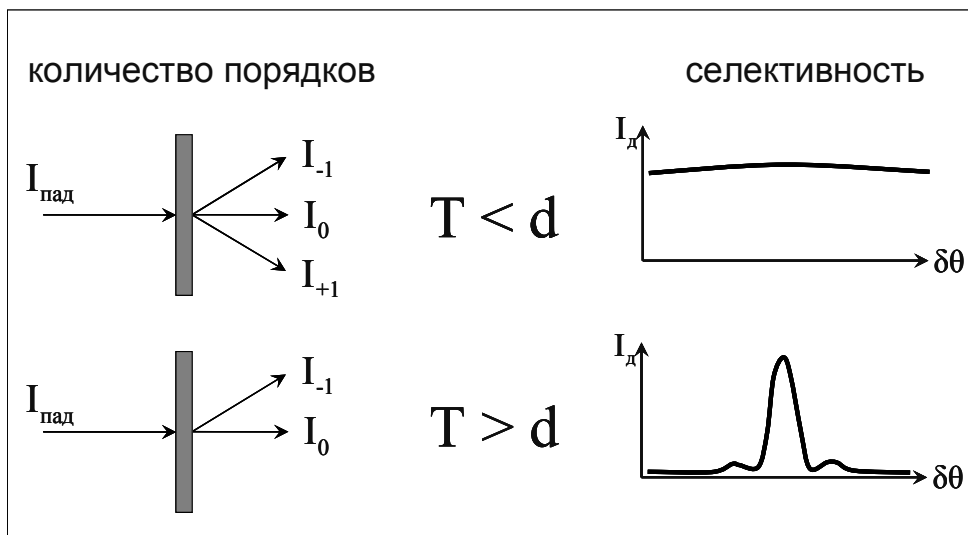


Рис.1. Влияние толщины регистрирующей среды на свойства голограмм (селективность продемонстрирована на примере угловой селективности).

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).

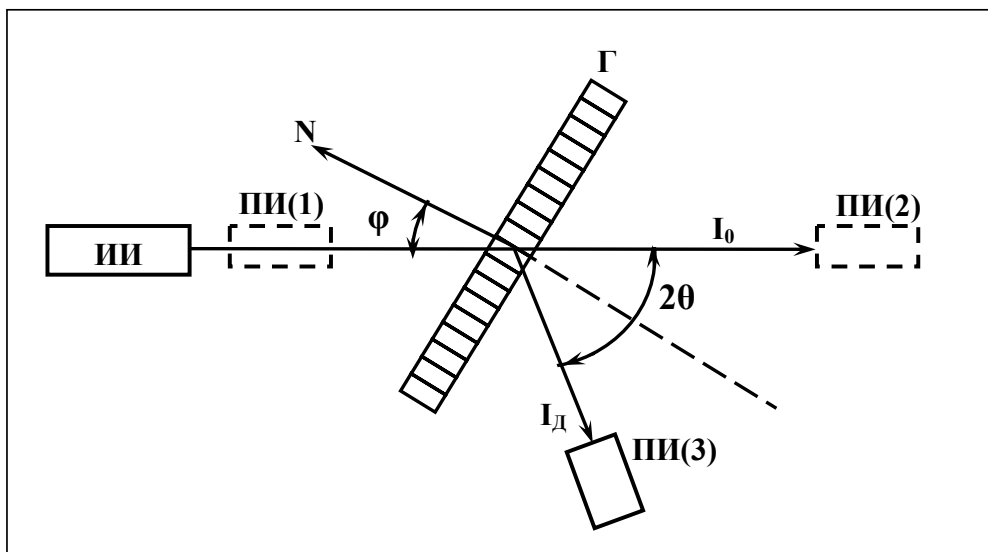


Рис.2. Оптическая схема установки для измерения дифракционной эффективности и контура угловой селективности пропускающей голограммы-решетки. ИИ – источник излучения; ПИ – приемник излучения, который может быть установлен в положения 1,2,3; Γ – голограмма; N – нормаль к поверхности голограммы; I_0 и I_d – 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).

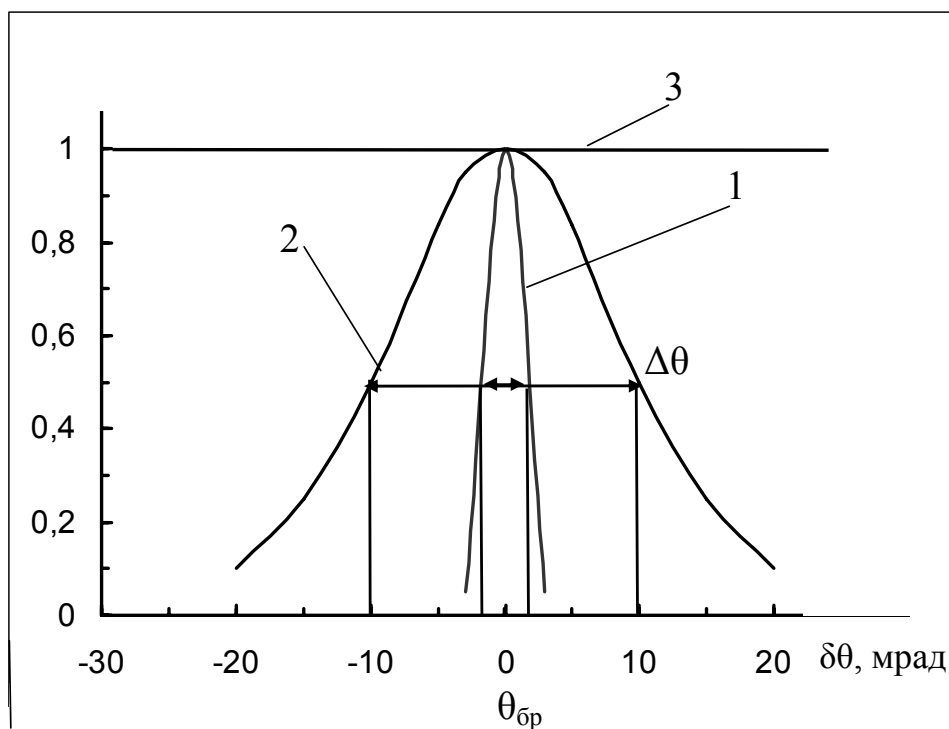


Рис.3. Сравнение контуров угловой селективности голограмм с различной толщиной, нормированных на «1» и сориентированных по углу Брэгга ($\theta_{\text{бр}}$); $\delta\theta$ – отклонение от угла Брэгга; $\Delta\theta$ – угловая селективность голограмм.

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 $\theta = \theta_{\text{Бр}}$, I, мкА		ДЭ, %
		$(I_d)_{\text{max}}$	$I_{\text{пад}}$	
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 МВ - $q = \underline{\hspace{2cm}}$ радиан/мм (или $q^1 = \underline{\hspace{2cm}}$ 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

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 $\Delta\theta$ для каждой из них. Данные занести в табл.3. В отчете 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	$\Delta\theta, \text{рад}$	$T_{эфф}$	Q , параметр объемн.
Исследуемые голограммы	1	360	1	?	?	?
	2	360	1	?	?	?
	3	360	>2	?	T^*	?
Виртуальные голограммы	Двумерная (2D)	360	>2	$>90^\circ$	?	≤ 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 неотлично 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.

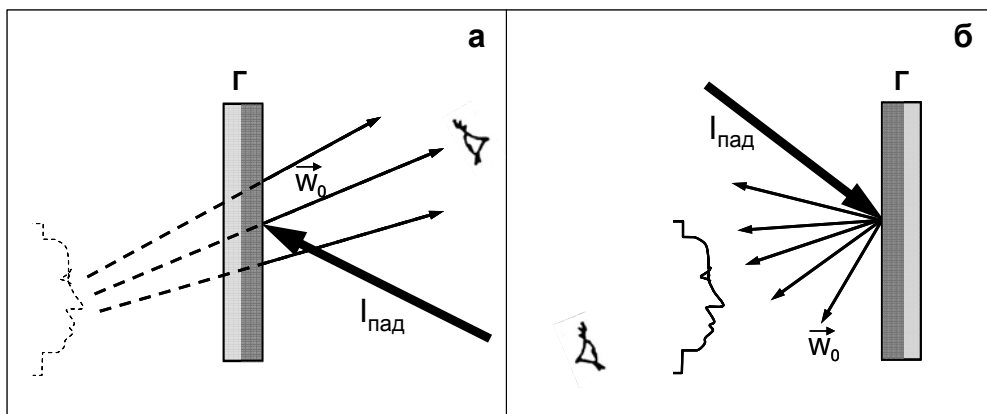


Рис.2. Наблюдение изображения объекта с помощью голограммы Денисюка при использовании исходной опорной волны (а) и обращенной (б). $I_{\text{пад}}$ – падающая на голограмму волна, предназначенная для считывания информации; W_0 – восстановленная объектная волна, формирующая при наблюдении мнимое (а) и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

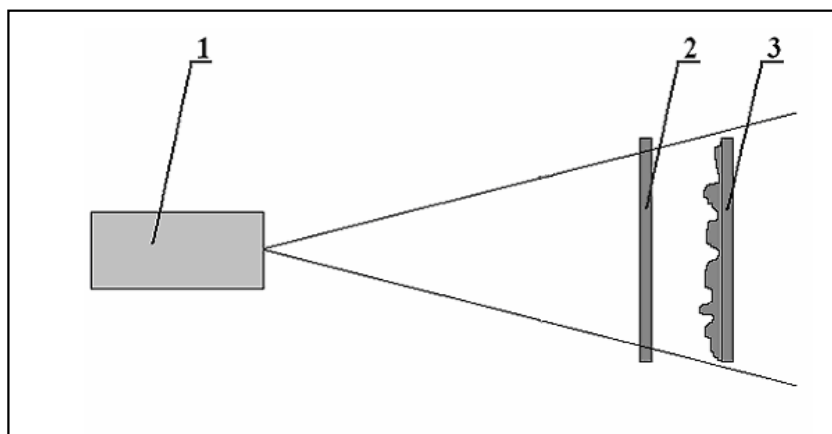


Рис.3.Принципиальная схема записи голограмм Денисюка: 1 – узел источника излучения с системой формирования пучка; 2 - регистрирующая среда (фотопластинка), 3 – объект-композиция.

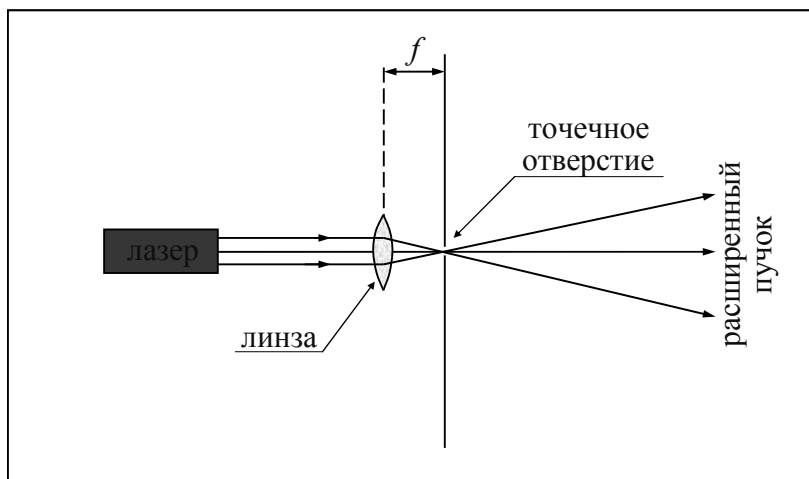


Рис.4.Схема, используемая для расширения коллимированного пучка лазерного излучения: формирование сферического пучка и его фильтрация с помощью точечной диафрагмы.

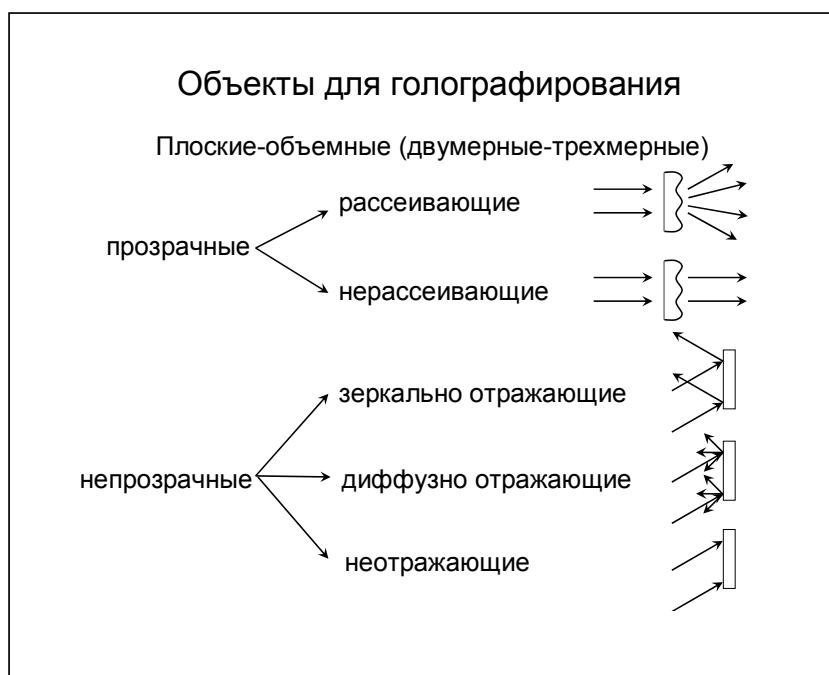
При получении голограмм Денисюка расстояние между интерференционными полосами сравнимо с длиной волны используемого излучения. Во время регистрации голограммы (ее экспонирования) сдвиг фотопластинки (или любого другого регистрирующего материала) должен быть существенно меньше, чем значение наибольшей 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.



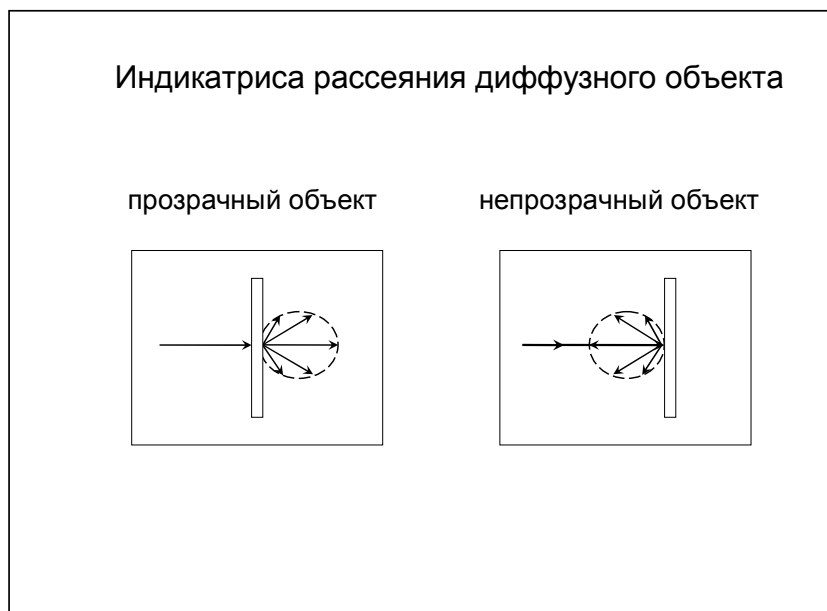


Рис.5. Индикатриса рассеяния прозрачного и непрозрачного объектов.

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.

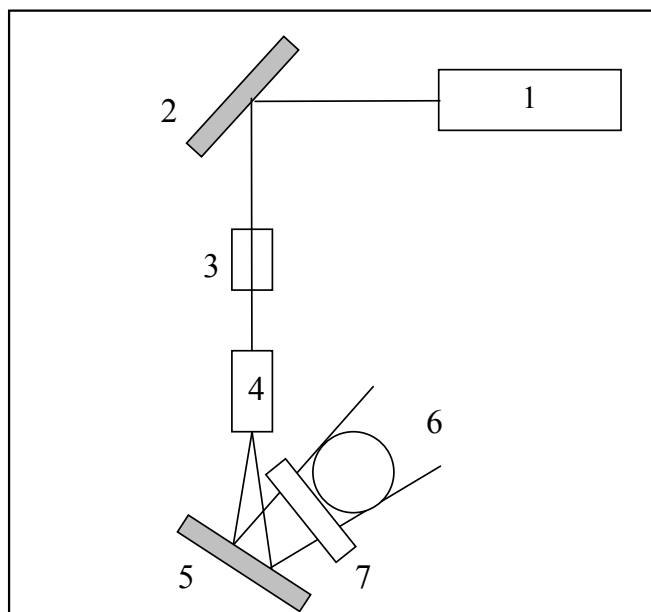


Рис.6. Принципиальная оптическая схема для получения голограмм по методу Ю.Н.Денисюка. 1 – лазер; 2,5 – зеркала; 3 – затвор; 4 – система формирования пучка; 6 – объект-композиция; 7 – регистрирующая среда (фотопластинка).

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 получаются, 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 76x76мм; 102x102мм; 90x120мм.

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).

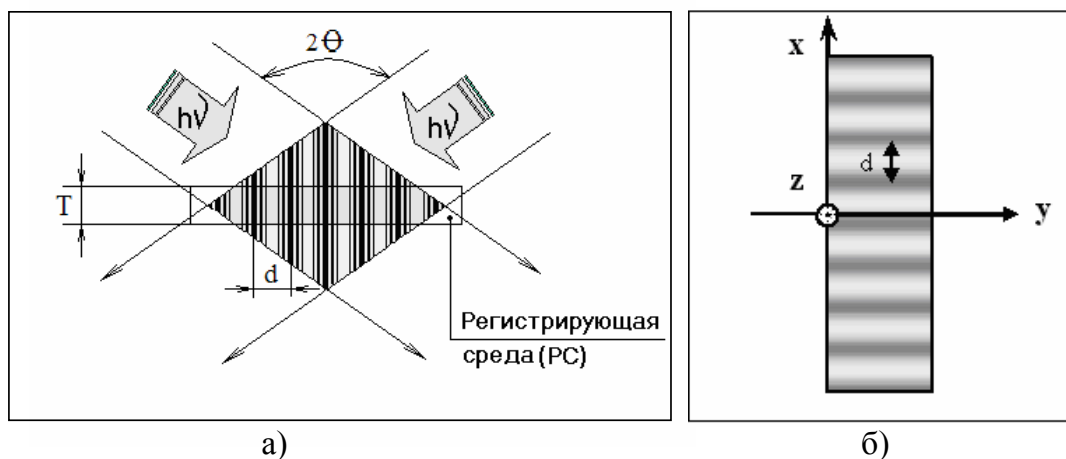


Рис.1. Принципиальная схема получения пропускающих голограмм-решеток (а) и зарегистрированная голограмма-решетка (б).

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:

$$\eta = \sin^2 \sqrt{\xi^2 + \varphi_1^2} / \left(\frac{\xi^2}{\varphi_1^2} + 1 \right) \quad (2),$$

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).

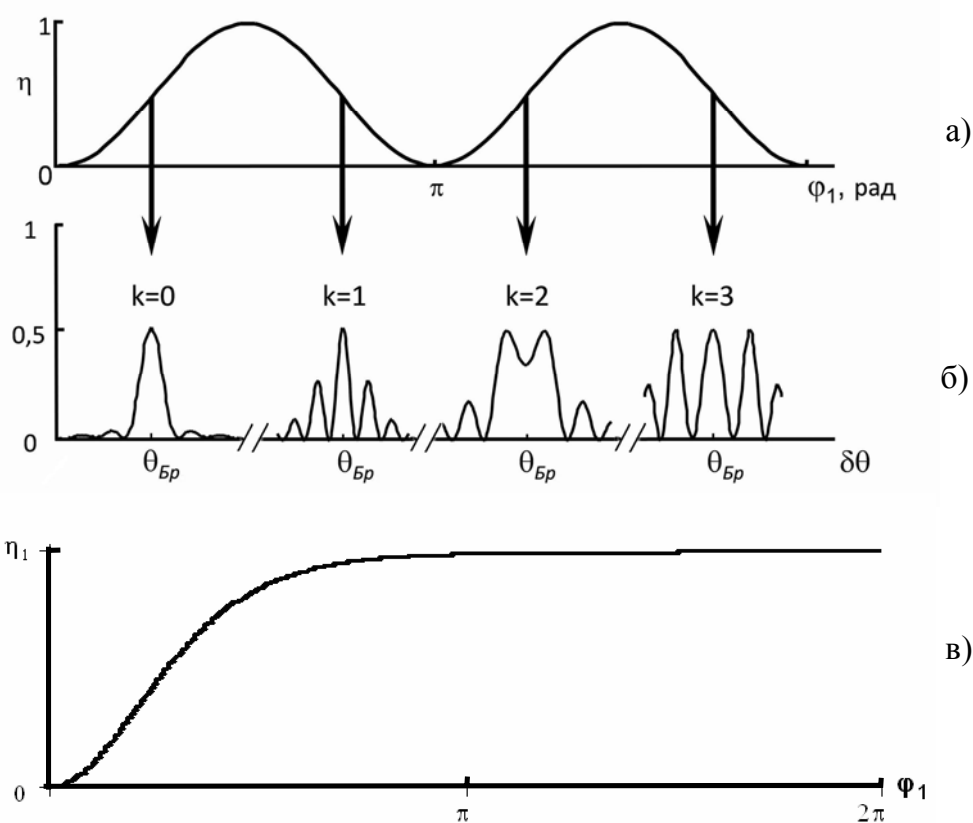


Рис.2.Зависимость дифракционной эффективности от величины фазовой модуляции для пропускающей (а) и отражательной (в) фазовой голограммы-решетки. б – форма контура угловой селективности голограммы с ДЭ = 50% и различным значением фазовой модуляции.

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).

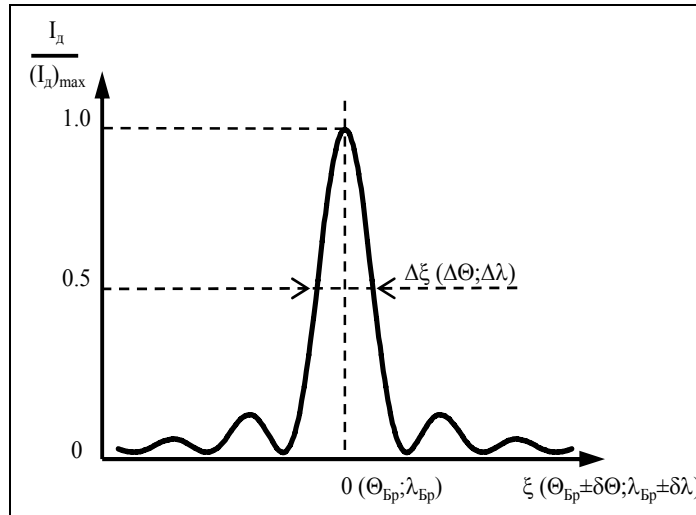


Рис.3.Изменение интенсивности дифрагированного излучения при отклонении от условий Брэгга при считывании голограммы.

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 , Дж/см ²	φ_1 , рад.	n_1 , 10^{-3}
1	2	3
0,25	0,26 π	0,23
0,50	0,37 π	0,33
1,0	0,62 π	0,56
2,0	1,16 π	1,04
4,0	1,28 π	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 $\varphi_1 \cong 0,75$ рад, в то время как при записи голограмм на голографический диск необходимая ДЭ, как правило, не превышает 1%.

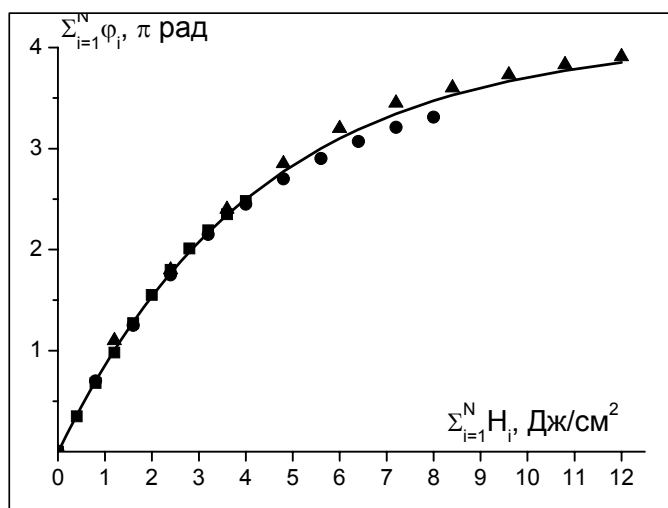


Рис.4. Зависимость суммарной амплитуды фазовой модуляции наложенных голограмм от их суммарной экспозиции (условные обозначения экспериментальных точек соответствуют голограммам с различными экспозициями).

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.

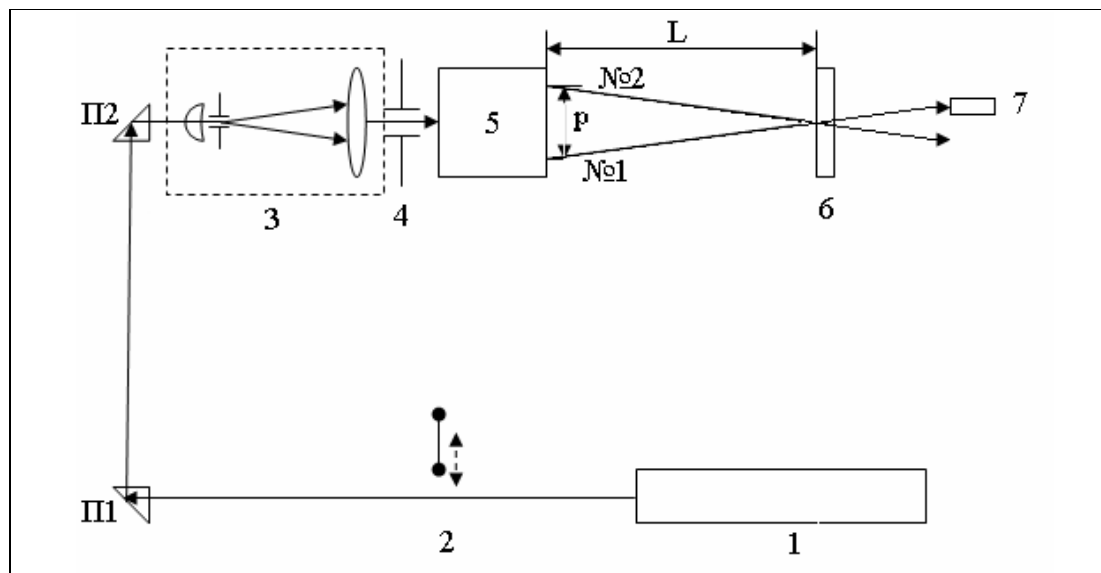


Рис.5.Схема установки для регистрации голограмм-решеток: 1 – лазер, 2 – затвор, П1 и П2 – поворотные призмы, 3 – узел формирования рабочего пучка излучения (более детально приведен на рис.7); 4 – диафрагма; 5 – делитель лазерного излучения (призмный интерферометр - см. рис.6); 6 – регистрирующая среда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

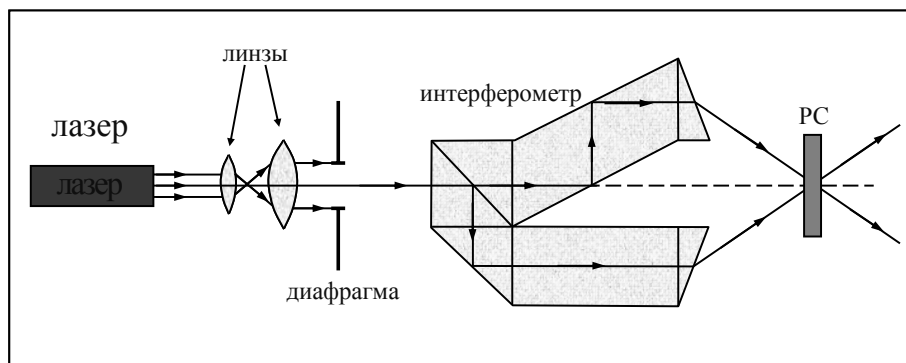


Рис.6. Принципиальная голографическая схема с призмным интерферометром для деления лазерного пучка по амплитуде и формирования интерференционной картины в плоскости регистрирующей среды (РС), используемая в данном эксперименте.

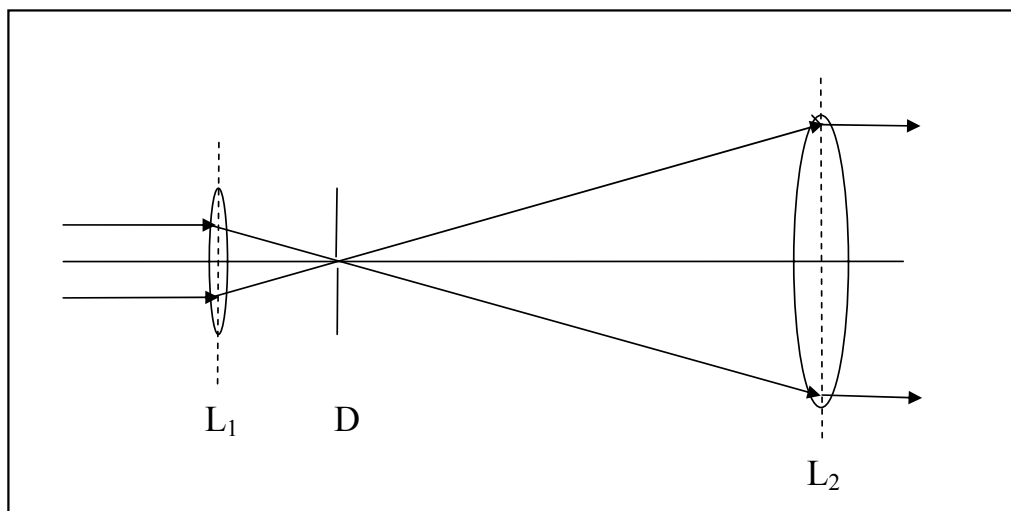


Рис.7. Оптическая схема устройства для фильтрации лазерного излучения от шумовых волн и формирования коллимированного лазерного пучка требуемого диаметра: L_1 и L_2 – линзы, или оптические системы, D – точечная диафрагма.



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

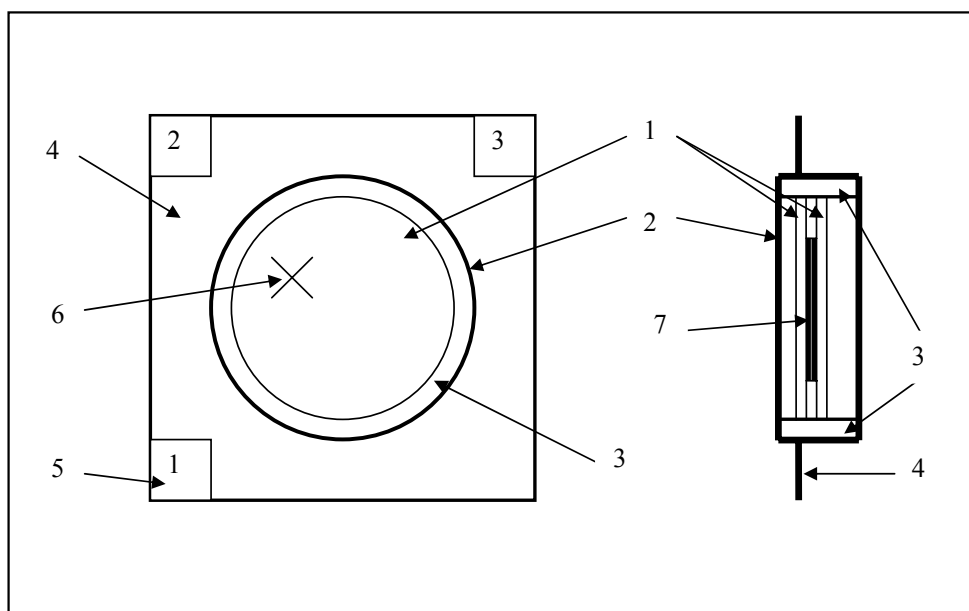


Рис.9.Устройство кассеты для записи голограмм на образцах объемной регистрирующей среды: 1 – защитные стекла (толщиной порядка 1-2 мм); 2 – прижимное кольцо; 3 – фторопластовая прокладка; 4 – металлическая основа кассеты; 5 – номер голограммы; 6 – пример расположения голограммы; 7 – образец.

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 $E=k(I_1+I_2) [\text{Вт/см}^2]$). 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	$I_{\text{пад}} (E)$		$H,$ Дж/см^2	$t,$ с	Определение τ			
			№1 (E_1)	№2 (E_2)			$I_{\text{нач}}$	$I_{\text{кон}}$	$\tau_{\text{нач}}$	$\tau_{\text{кон}}$
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.

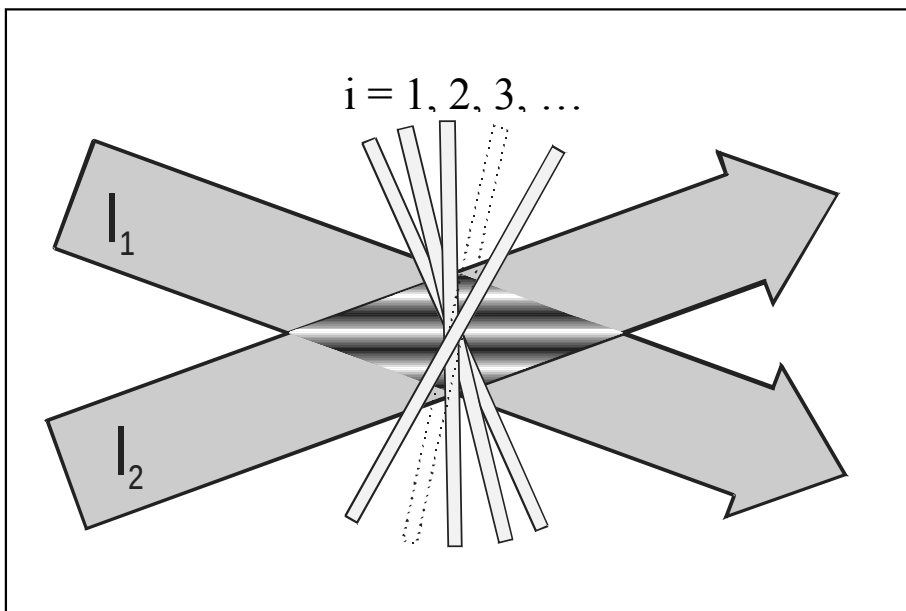


Рис.10. Принципиальная схема записи наложенных голограмм методом углового мультиплексирования. i – порядковый номер записи наложенной голограммы.

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 ($\lambda < 530\text{ нм}$, см. приложение 2). Контроль параметров голограммы производится излучением лазера с длиной волны $\lambda = 655\text{ нм}$, 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.

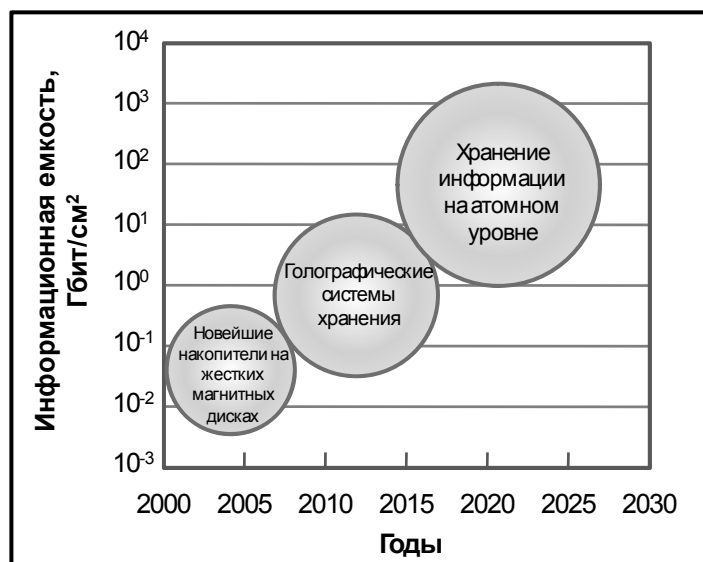


Рис.1.История и перспективы развития емкости запоминающих устройств (по данным IBM).

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 Maxwell (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 Maxwell 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.

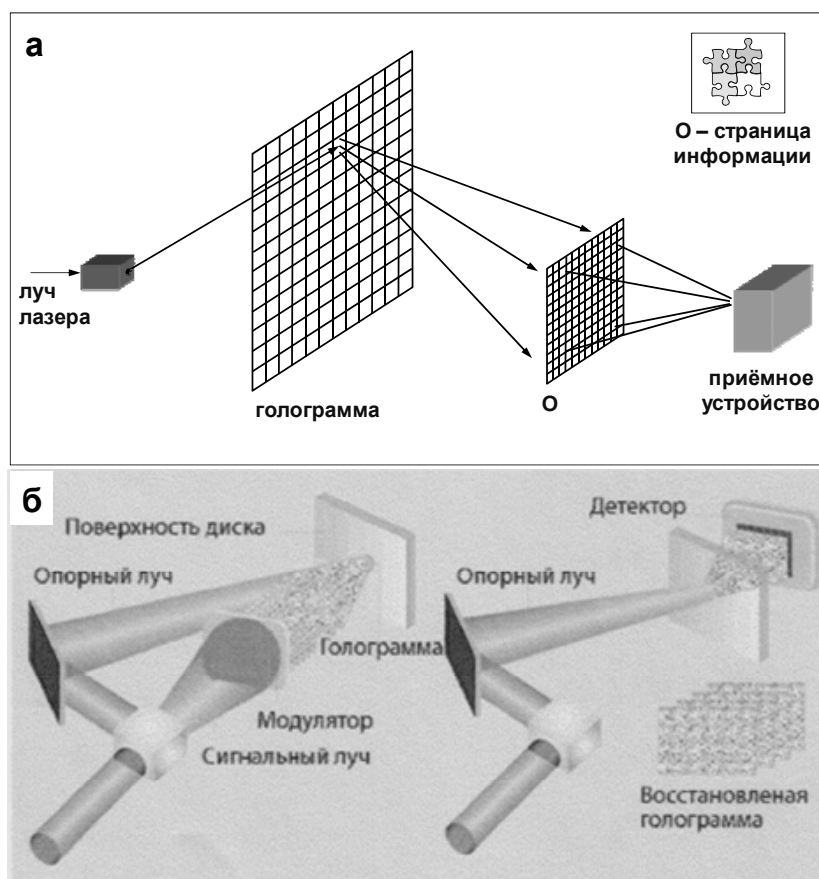


Рис.3.а – принципиальная схема устройства голографической памяти (1967 г. – плоский носитель-2D). **б** – запись и считывание голограммы в системах архивной памяти (2006 г. – объемный носитель - 3D).

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.

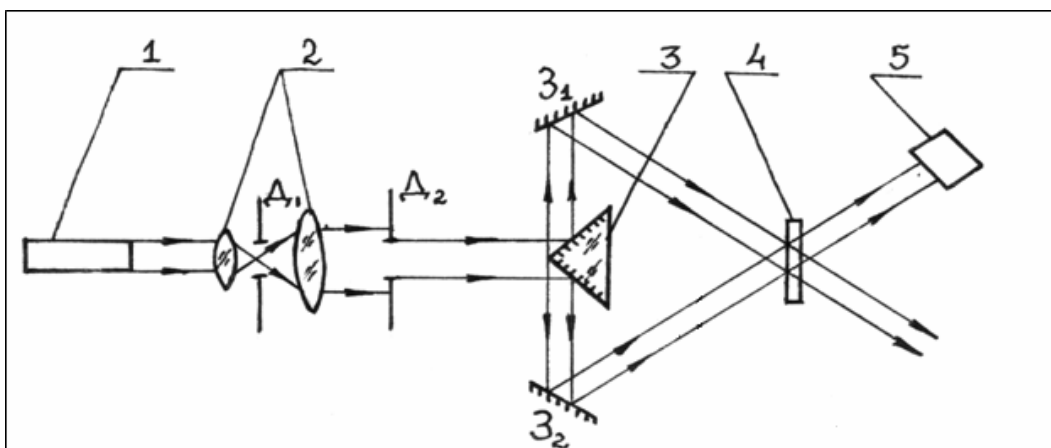


Рис.4.Схема записи пропускающих элементарных голограмм (голограмм-решеток): 1 – источник излучения; 2 – телескопическая система для расширения лазерного пучка; 3 – элемент для деления и поворота лазерного пучка (прямоугольная призма с алюминиевым покрытием); 4 – регистрирующая среда; 5 – приемник излучения; Δ_1 и Δ_2 – диафрагмы; 3₁ и 3₂ – зеркала.

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

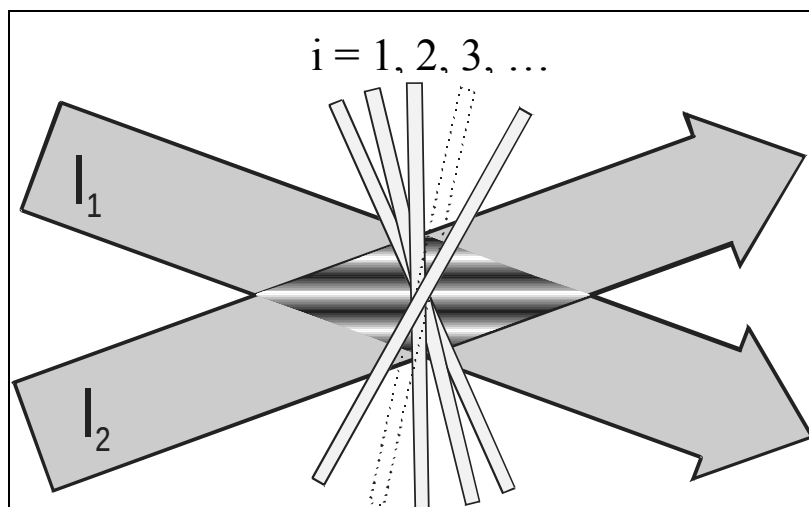


Рис.5.Принципиальная схема записи наложенных голограмм методом углового мультиплексирования. i – порядковый номер записи наложенной голограммы.

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 ($\theta = \theta_{Br} \pm \delta\theta$ 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 падения плоской монохроматической восстанавливающей волны на голограмму, в пределах которого интенсивность дифрагированной волны превышает половину ее максимального значения (см.рис.6).

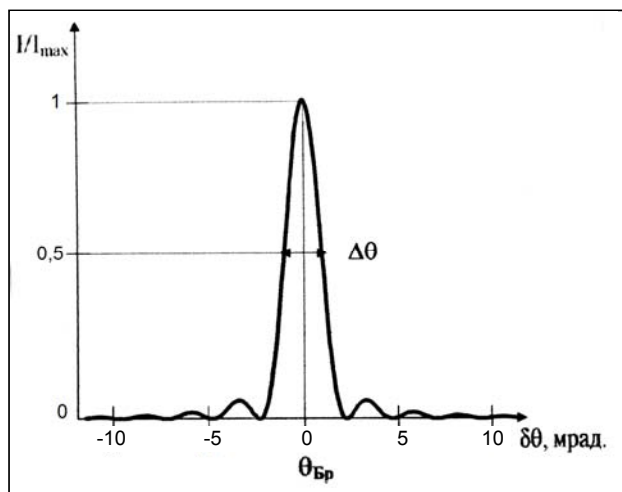


Рис.6.Изменение интенсивности дифрагированного излучения при отклонении от условий Брэгга при считывании голограммы монохроматическим излучением – контур угловой селективности голограммы (толщина голограммы порядка 1 мм). $\Delta\theta$ – угловая селективность голограммы.

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 (θ_{Br}) задает длину волны (λ_{Br}) падающего на голограмму излучения, и наоборот. При отклонении от условий Брэгга ($\theta = \theta_{Br} \pm \delta\theta$ и $\lambda = \lambda_{Br} \pm \delta\lambda$) интенсивность дифрагированной волны падает (см.рис.6).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

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

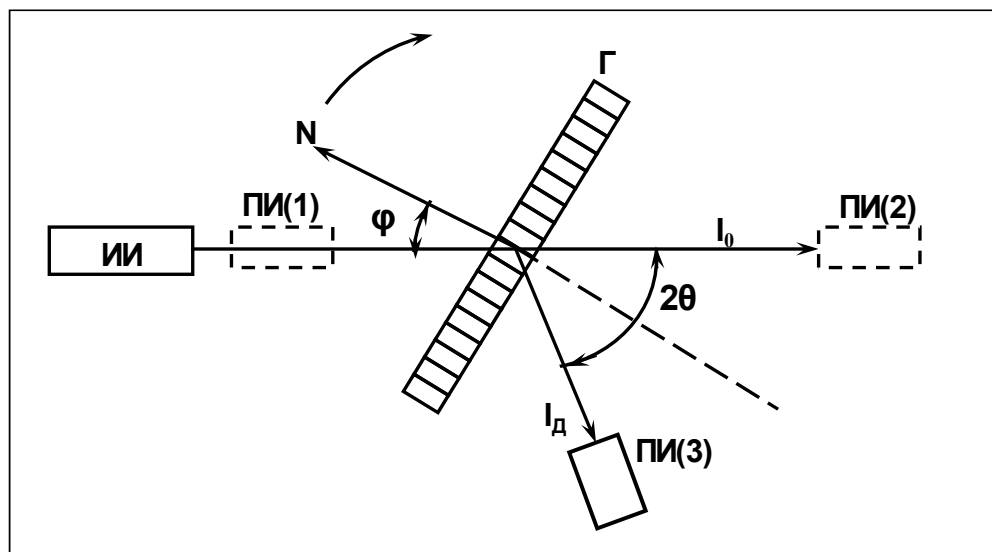


Рис.7. Оптическая схема установки для измерения дифракционной эффективности и контура угловой селективности пропускающей голограммы-решетки. ИИ – источник излучения; ПИ – приемник излучения, который может быть установлен в положения 1,2,3; Г – голограмма; N – нормаль к поверхности голограммы; I_0 и I_d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

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 $\Delta\varphi = \varphi_3 - \varphi_2$.

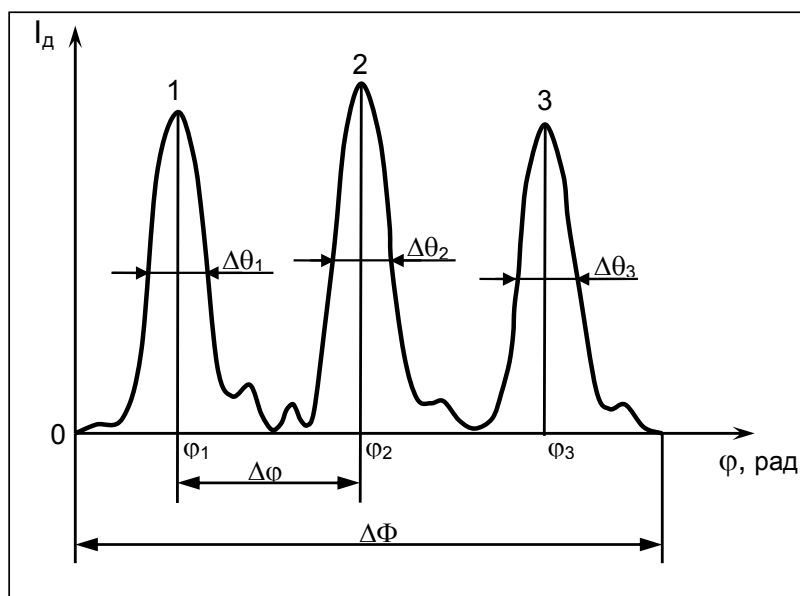


Рис.8. Зависимость интенсивности дифрагированного излучения (I_d), детектируемого приемником излучения (ПИ-3, рис.7), от угла поворота голограммы относительно считывающего (падающего) пучка (φ): φ_1 ; φ_2 ; φ_3 — угол поворота, соответствующий считыванию голограмм №1; №2; №3 (поворот образца по часовой стрелке); $\Delta\theta_i$ — угловая селективность отдельной, i -й, голограммы (определяется по уровню интенсивности дифрагированного пучка $I_d = 0,5 \cdot I_{\max}$); $\Delta\varphi$ — угол поворота образца между считыванием двух соседних наложенных голограмм; $\Delta\Phi$ — 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 ($\Delta\varphi$) должен быть больше, чем величина угловой селективности отдельной голограммы ($\Delta\theta$). Угол $\Delta\varphi$ задается условиями регистрации наложенных голограмм. Как правило, на практике при мультиплексировании обеспечивают такие условия эксперимента, чтобы $\Delta\varphi = (2 \div 5) \cdot \Delta\theta$.

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 $\Delta\varphi$ (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 ($\Delta\theta_i$) каждой из наложенных голограмм. $\Delta\theta_i$ определяется как полуширина соответствующего (i -того) пика зависимости $I_d(\varphi)$ как показано на рис.8. $\Delta\theta_i$ 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, $\Delta\theta_i$, 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 ($\Delta\theta$) составляет величину $2,5\Delta\theta$;
- $\Delta\theta$ определяется как среднее измеренное значение по табл.3.
- Элемент рассчитан на работу в заданном диапазоне углов падения ($\Delta\Phi$) 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 $\Delta\Phi$, и значением угловой селективности отдельных голограмм $\Delta\theta$. Расчет производится по формуле:

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

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 ($\theta_{бр}$) 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 $\vec{k}$, 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).

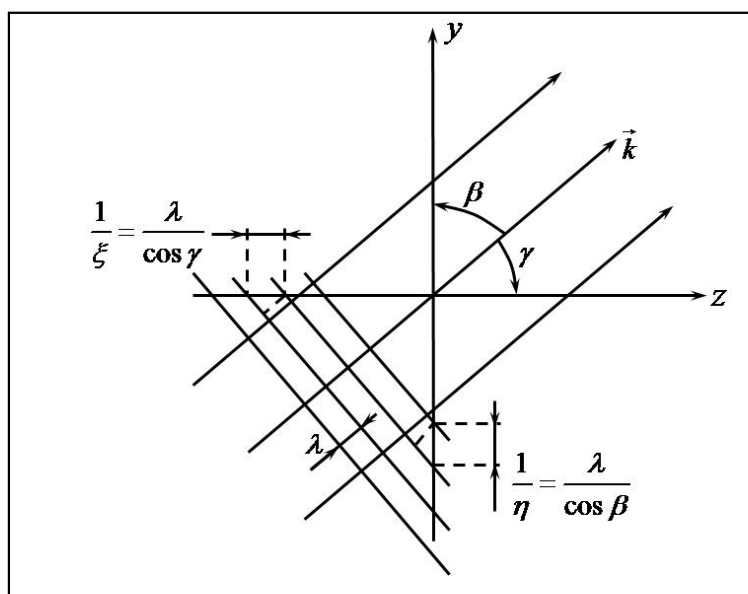


Рис.1. Распространение плоской монохроматической волны с волновым вектором $\vec{k}$ в плоскости yz .

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 $\vec{k}$ (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.)

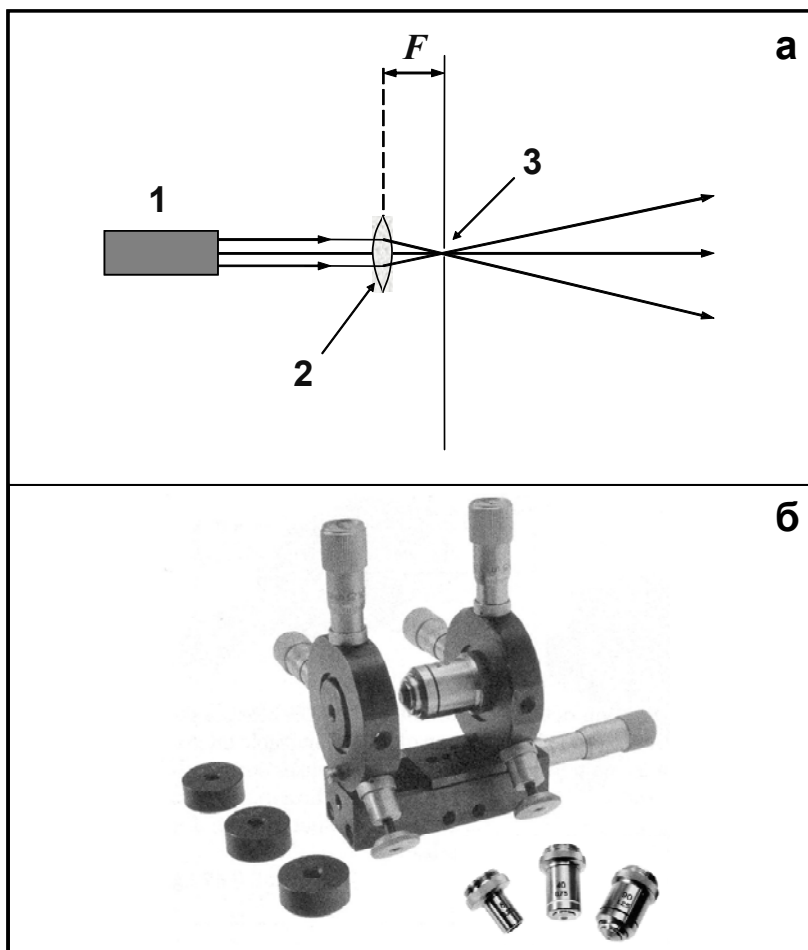


Рис.2.Пространственная фильтрация лазерного излучения. а – принципиальная оптическая схема: 1 – лазер, 2 – линза (микрообъектив), 3 – диафрагма; б – оптико-механический узел в сборке.

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.

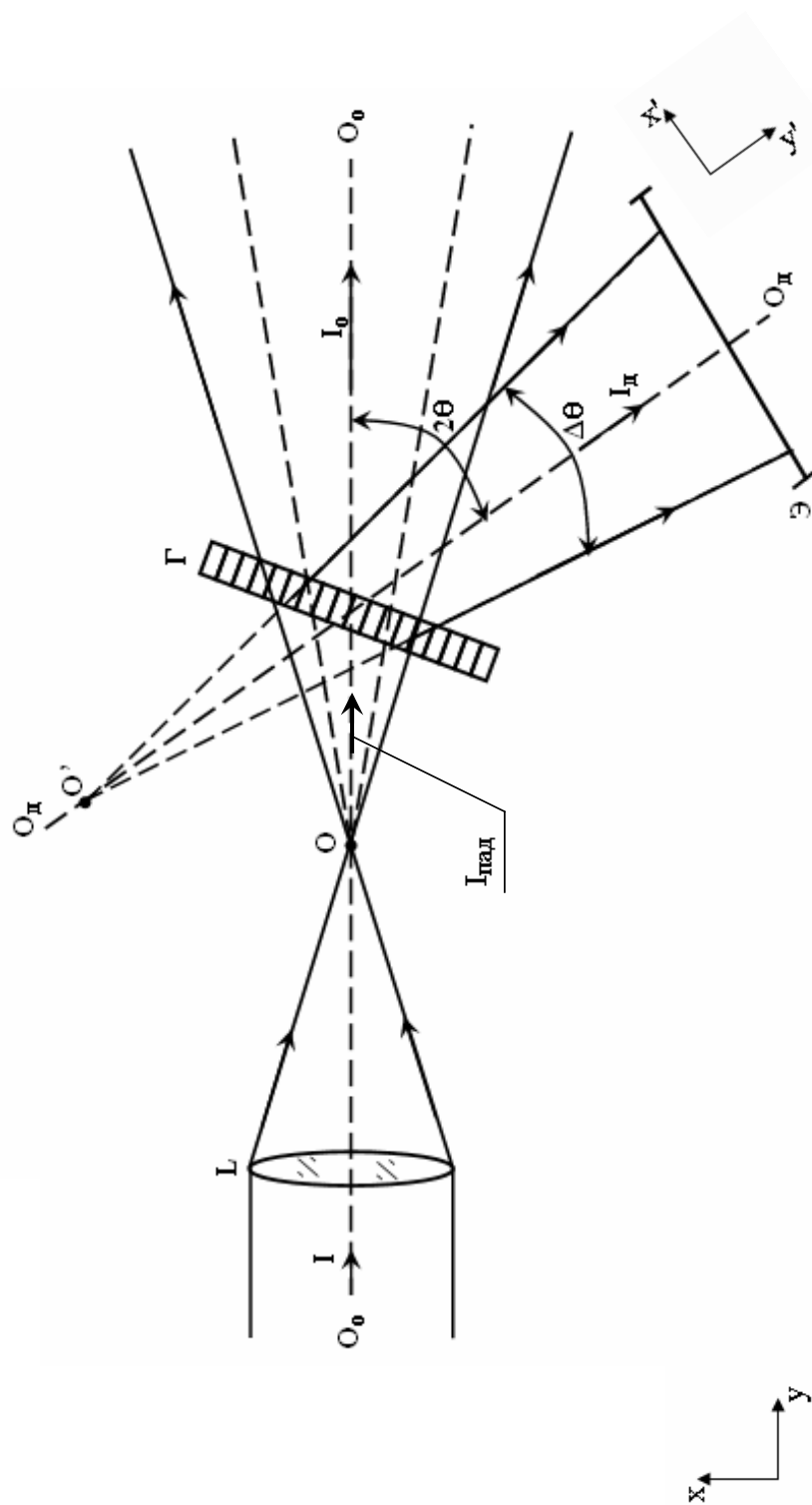


Рис.3. Оптическая схема для демонстрации пространственной фильтрации фильтрации излучения объемной голограммой в плоскости ху: «0 - 0» - главная оптическая ось (ось у) ; «0_д-0_д» - вспомогательная оптическая ось (ось у'); L - линза с фокусом в точке «0» («0'»); Γ - голограмма, Э- экран, I - плоский 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 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_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.

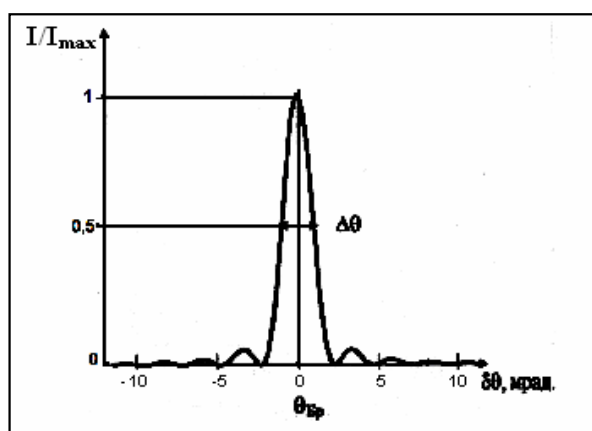


Рис.4. Распределение интенсивности дифрагированного излучения по оси x' в угловых единицах при считывании голограммы в «условиях Брэгга».

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).

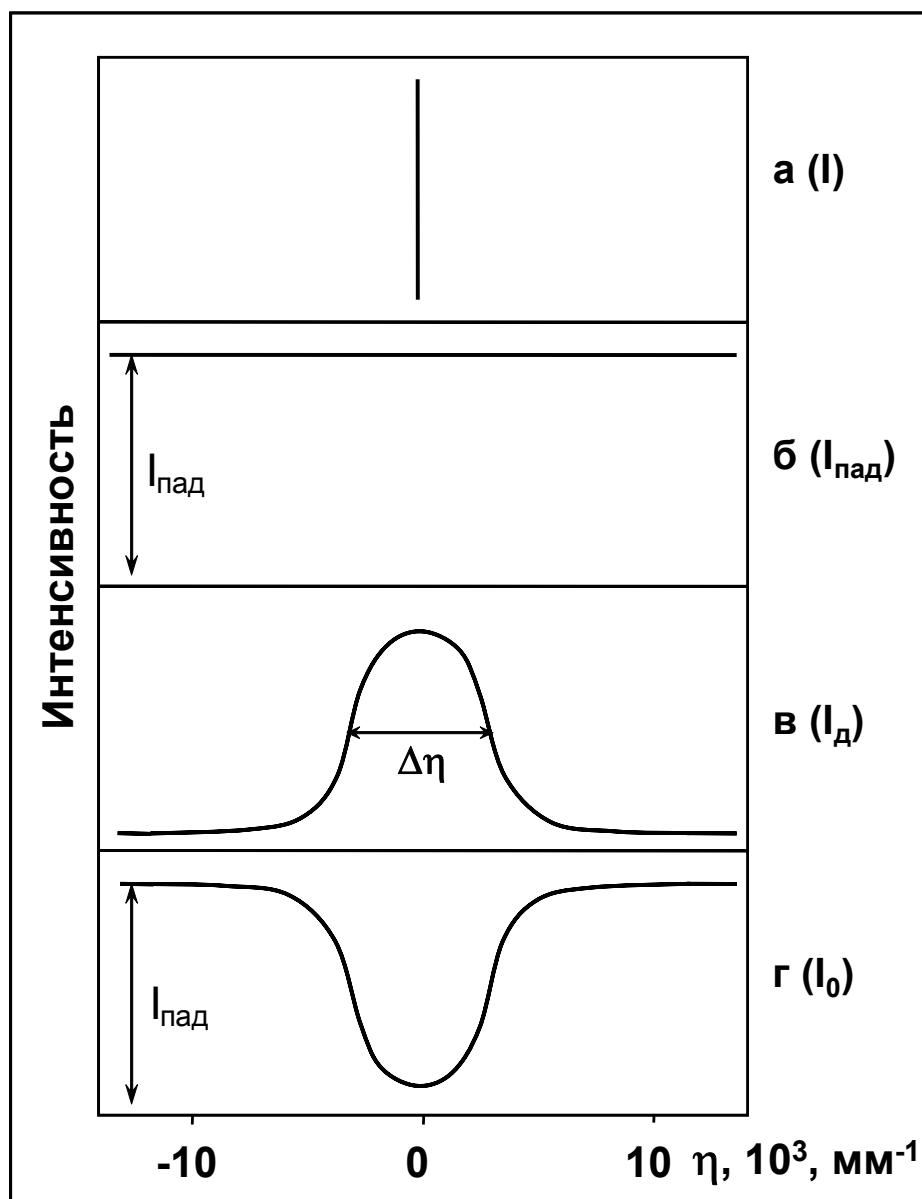


Рис.5. Схематическое представление спектров пространственных частот, измеренных относительно оптической оси (в соответствии со схемой рис.3): а – исходный лазерный пучок (I); б – считывающее голограмму излучение ($I_{\text{пад}}$); в – дифрагированное излучение ($I_{\text{д}}$), $\Delta\eta$ – ширина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

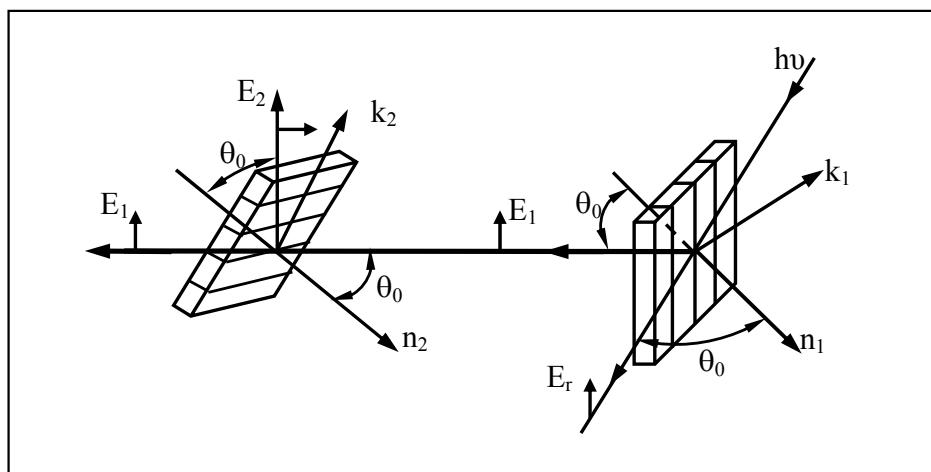


Рис.6. Голографический двухкоординатный фильтр пространственных частот излучения: n_1, n_2 - нормали к поверхности голограммы; $\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2$ - векторы решетки; $\mathbf{E}_r$ - электрический вектор падающего пучка; $\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2$ - электрические векторы дифрагированных волн.

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.

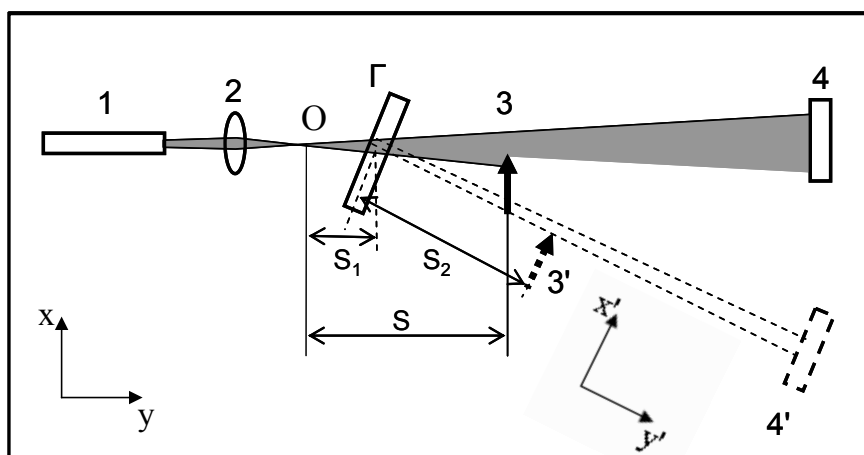


Рис.7. Оптическая схема установки для исследования фильтрующих свойств объемной голограммы-решетки: 1 – источник излучения (лазер), 2 – цилиндрическая линза, 3(3') – нож, 4(4') – приемник излучения; 0 – фокус линзы, Г – голограмма.

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.

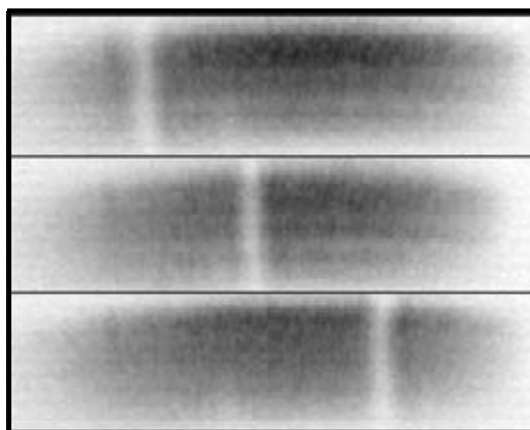


Рис.8.Нулевой порядок дифракции - наблюдение полосы, обусловленной дифракцией излучения в первый порядок (на рисунке приведено негативное изображение картины, экспериментально наблюдаемой на экране).

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

№ 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: $R_n = \underline{\hspace{2cm}}$; $S_1 = \underline{\hspace{2cm}}$; $S_2 = \underline{\hspace{2cm}}$.

№ 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

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

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?

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.

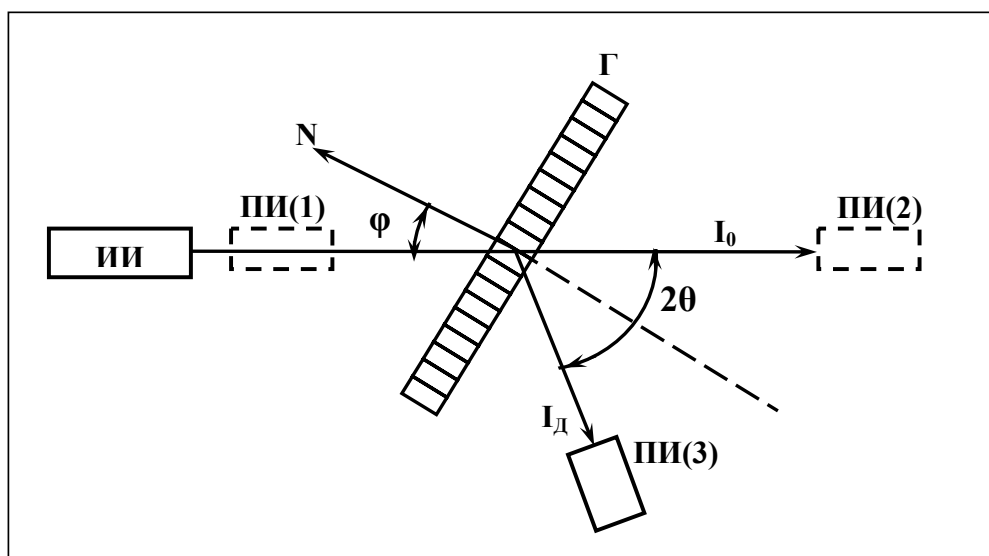


Рис.1. Оптическая схема установки для измерения дифракционной эффективности и контура угловой селективности пропускающей голограммы-решетки. ИИ – источник излучения; ПИ – приемник излучения, который может быть установлен в положения 1,2,3; Г – голограмма; N – нормаль к поверхности голограммы; I_0 и I_d – 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. $\theta = \theta_{бр}$: 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 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 ($\theta = \theta_{\text{Бр}} \pm \delta\theta$ и $\lambda = \lambda_{\text{Бр}} \pm \delta\lambda$) интенсивность дифрагированной волны уменьшается (см.рис.2).

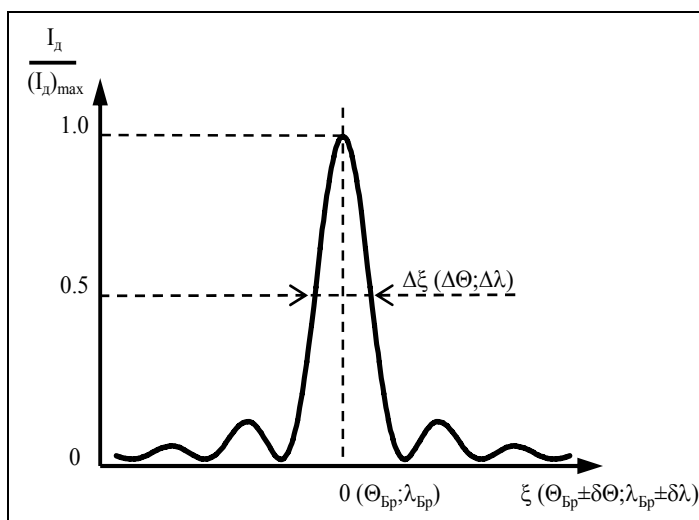


Рис.2.Изменение интенсивности дифрагированного излучения при отклонении от условий Брэгга.

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).

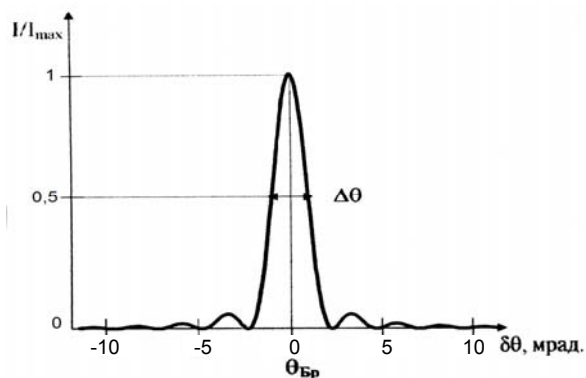


Рис.3.Контур угловой селективности голограммы, нормированный на «1». $\Delta\theta$ - угловая селективность голограммы.

Селективность зависит от параметров голограммы, важнейшими из которых являются пространственная частота голограммы (v) и ее толщина (T). $\Delta\theta$ и $\Delta\lambda$ изменяются пропорционально $1/T$, в то время как зависимость от v 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 $(N_i - N_0)[\text{мм}]$ и $q \text{ [радиан/мм]}$

7. Построить график зависимости $I_d(\delta\theta)$ для исследуемой голограммы и определить $\Delta\theta$, 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

Приложение 2. Регистрирующий материал «Диффен» для получения объемных голограмм.

«Диффен» – полимерная регистрирующая среда, представляющая собой модификацию объемных полимерных регистрирующих сред с диффузионным усилением на основе фенантренхинона.

Создание материала, который осуществляет на практике два плодотворнейших принципа конструирования объемных регистрирующих сред, - принцип дисперсионной рефракции и принцип диффузионного усиления - началось в Государственном Оптическом Институте им.С.И.Вавилова (ГОИ) в 80-х годах XX века. Органический краситель фенантренхинон (ФХ) при взаимодействии с излучением образует фотопродукт (ФП), обладающий поглощением в коротковолновой области спектра и высокой прозрачностью в видимой области спектра, что обеспечивает, согласно принципу дисперсионной рефракции, возможность получения значительной фазовой модуляции среды и, естественно, получение высокоэффективных голограмм. Полимерная среда с ФХ представляет собой твердый раствор органического красителя (в отличие от жестко связанного с полимером фотопродукта) и позволяет осуществлять диффузию молекул ФХ, приводящую к перераспределению концентрации ФХ по объему образца, что обеспечивает постэкспозиционное усиление зарегистрированной интерференционной структуры.

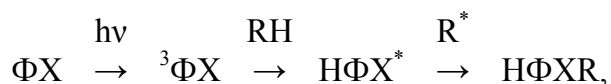
Плодотворность такого подхода очевидна, однако его практическое осуществление связано с наличием веществ, пригодных для использования по данной схеме и их поиском. Разработки и исследования реальных сред, сконструированных по данной схеме, продолжаются и идут в различных направлениях – поиски светочувствительных композиций, полимерной основы, а также механизмов и режимов их взаимодействия.

Принцип дисперсионной рефракции – способ формирования структуры голограммы путем изменения показателя преломления («рефракции») светочувствительного материала в результате воздействия регистрирующего излучения. Суть принципа заключается в том, что в светочувствительной среде, имеющей полосу поглощения в видимой области спектра, при воздействии регистрирующего излучения инициируются химические реакции, приводящие к сдвигу полосы поглощения в более коротковолновую (ближний ультрафиолет) область спектра за счет образования фотопродукта, с соответствующей полосой поглощения. Таким образом, происходит "фотохимическое отбеливание" материала в видимой области спектра и появление полосы поглощения в ближнем ультрафиолете, что в соответствии с фундаментальными соотношениями Крамерса-Кронига приводит к изменению показателя преломления в видимой области. Принцип предложен сотрудниками Государственного Оптического Института им. С.И. Вавилова (В.И. Суханов и Г.И. Лашков, 1978 г.) для разработки принципиально новых регистрирующих сред для объемной

голографии – фотохромных материалов с фотохимическим отбеливанием, и впервые применен авторами при создании полимерного светочувствительного материала "Реоксан".

2.1. Структура и принцип действия материала «Диффен»

Материал представляет собой полимерную среду, состоящую из полиметилметакрилата (ПММА) с равномерно распределенным по объему среды фенантренином. Светочувствительность материала обусловлена способностью ФХ при облучении присоединяться к полимеру, превращаясь в 9,10-дизамещенное производное фенантрена (НФХР) по принципиальной схеме:



где ${}^3\text{ФХ}$ - триплетвозбужденная молекула ФХ, НФХ^* - семихиноновый радикал, РН и R^* - соответственно молекула и радикал полимера.

Образцы регистрирующей среды толщиной 1-3 мм получают путем блочной полимеризации между стеклянными формующими пластинами растворов ФХ в метилметакрилате. На рис.1 (кривая 1) приведен спектр поглощения образцов с малой концентрацией ФХ ($2 \cdot 10^{-3}\text{М}$). Как видно материал имеет в видимой области спектра максимум поглощения ($\lambda = 405\text{-}410\text{ нм}$), обусловленный ФХ. Под действием излучения ФХ изменяет свою химическую структуру и образовавшийся фотопродукт (семихиноновый радикал) присоединяется к молекуле ПММА и теряет свою подвижность. Спектр поглощения фотопродукта отличается от спектра поглощения ФХ - длинноволновый максимум исчезает (рис.1, кривая 2). Разница спектров поглощения ФХ и его фотопродукта обуславливает разницу их показателей преломления во всей видимой области спектра и определяет эффективность зарегистрированной голограммы без воздействия постэкспозиционной обработки.

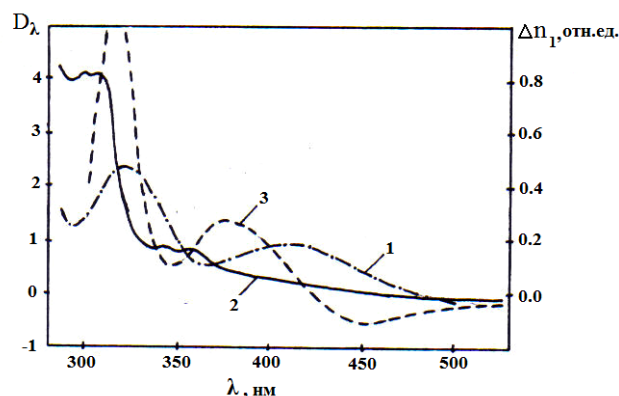


Рис.1.Спектры поглощения фенатренхинона (кривая 1) и фотопродукта (кривая 2) в полимерной матрице. Кривая 3 – дисперсия показателя преломления среды, обусловленная наличием фенатренхинона.

Принципиальная схема записи интерференционной структуры в такой среде показана на рис.2 на примере получения элементарной голограммы, то есть, голограммы-решетки, в которой модуляция интенсивности излучения происходит по оси "X". Без ограничения общности можно предположить, что концентрация образовавшегося под воздействием излучения фотопродукта пропорциональна интенсивности излучения и промодулирована по оси "X" - $C_{ФП}(x)$. Тогда концентрация ФХ -

$$C_{ФХ}(x) = C_{ФХ}^{исх} - C_{ФП}(x) \quad (1),$$

где $C_{ФХ}^{исх}$ – исходная концентрация ФХ в образце.

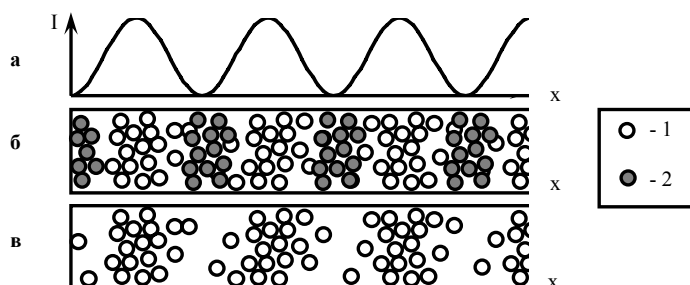


Рис.2.Схема, поясняющая процесс получения голограмм в полимерной среде с диффузионным усилением: а – распределение интенсивности в регистрируемой интерференционной картине; б, в – распределение молекул (1 – фотопродукт, 2 – фенатренхинон), образующих противofазные решетки при экспонировании голограммы (б) и после ее фиксирования (в).

Светоиндуцированное изменение эффективного показателя преломления регистрирующей среды (Δn), обусловленное наличием в ней частиц ФХ и ФП, можно представить парциальными составляющими показателей преломления этих веществ ($\Delta n_{\text{ФХ}}$ и $\Delta n_{\text{ФП}}$) с учетом их относительных объемов (V^1) в образце

$$\Delta n = V^1_{\text{ФХ}} \Delta n_{\text{ФХ}} + V^1_{\text{ФП}} \Delta n_{\text{ФП}} \quad (2).$$

Предполагая, что во время регистрации голограммы молекулярный объем частиц не изменяется, перейдем от относительных объемов к концентрациям частиц вещества (C), принимая во внимание их зависимость от "X"

$$\Delta n(x) = \text{const} [C_{\text{ФХ}}(x) \Delta n_{\text{ФХ}} + C_{\text{ФП}}(x) \Delta n_{\text{ФП}}] \quad (3).$$

Учитывая (1), можно записать

$$\begin{aligned} \Delta n(x) &= \text{const} [C_{\text{ФХ}}^{\text{исх}} \Delta n_{\text{ФХ}} - C_{\text{ФП}}(x) \Delta n_{\text{ФХ}} + C_{\text{ФП}}(x) \Delta n_{\text{ФП}}] = \\ &= \Delta n_0 + \text{const} C_{\text{ФП}}(x) [\Delta n_{\text{ФП}} - \Delta n_{\text{ФХ}}] = \Delta n_0 + \text{const} C_{\text{ФП}}(x) \Delta n_d \end{aligned} \quad (4),$$

где Δn_0 - постоянная составляющая $\Delta n(x)$, а Δn_d - дифференциальный показатель преломления

$$\Delta n_d = \Delta n_{\text{ФП}} - \Delta n_{\text{ФХ}} \quad (5).$$

Т.о. во время регистрации голограммы образуются две противофазные решетки, результирующая модуляция которых (Δn_d) определяет эффективность голограммы.

Постэкспозиционное поведение голограммы определяется тем, что в отличие от связанного с полимером фотопродукта, молекулы непрореагировавшего ФХ способны диффундировать в объеме полимера. Это приводит к деградации решетки, образованной ФХ во время регистрации голограммы, и изменению $\Delta n(x)$. Причем, при выравнивании концентрации ФХ по объему образца

$$\Delta n(x) = \text{const} C_{\text{ФП}}(x) \Delta n_{\text{ФП}} \quad (6).$$

Т.к. $\Delta n_{\text{ФП}} > \Delta n_d$, за счет такого процесса можно получить значительное постэкспозиционное усиление голограмм.

Скорость диффузии молекул ФХ зависит от температуры, и прогрев образца после завершения процесса регистрации голограммы ускоряет процесс деградации решетки из ФХ, приводя к значительному увеличению $\Delta n(x)$. Значения Δn зависят от интенсивности регистрируемого излучения, пространственной частоты записываемой интерференционной картины и исходной концентрации ФХ.

Фиксирование голограммы производится облучением образца некогерентным излучением в полосе поглощения ФХ. При этом

непрореагировавший ФХ, равномерно распределенный по объему образца, преобразуется в несветочувствительный фотопродукт, а $\Delta n(x)$ не изменяется. Пропускание образца в области $\lambda > 550$ нм определяется потерями при отражении от поверхностей образца. Потери на поглощение в объеме образца, как показали эксперименты - менее 0,5%.

Процесс получения высокоэффективных голограмм на данном материале состоит из следующих основных этапов: экспонирование, прогрев при определенном температурно-временном режиме, фиксирование. На каждом из этапов получения голограммы происходит изменение параметров голограммы и изменение физико-механических характеристик среды. Для оценки параметров используются измерения дифракционной эффективности и контура угловой селективности на каждом из этапов получения голограммы.

На рис.3 приведены экспозиционные зависимости параметров голограмм после окончания регистрации (кривая 1) и после завершения полного цикла постэкспозиционной обработки (кривая 2). Измерения ДЭ по окончании процесса регистрации голограмм (кривая 1) позволяют выявить интервал экспозиций ($H < 1$ Дж/см²), в пределах которого при регистрации голограмм не происходит заметной модуляции оптических параметров среды ($ДЭ < 2\%$) и можно говорить о линейном характере фотоотклика среды (отклика среды на световое воздействие). В то же время очевидно, что при $H > 1$ Дж/см² процесс записи голограмм носит нелинейный характер, т.к. в реальном времени (время регистрации 10-20 мин), образуются высокоэффективные голограммы. Следует отметить также тот факт, что при экспозициях, обеспечивающих линейный характер записи голограмм, можно достигнуть высоких значений амплитуды модуляции среды.

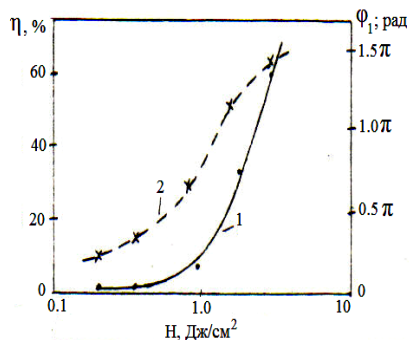


Рис.3. Экспозиционные зависимости параметров голограмм после окончания регистрации (кривая 1 – дифракционная эффективность- η) и после проведения полного цикла обработки (кривая 2 – фазовая модуляция- ϕ_1). Пространственная частота голограммы 640 мм⁻¹.

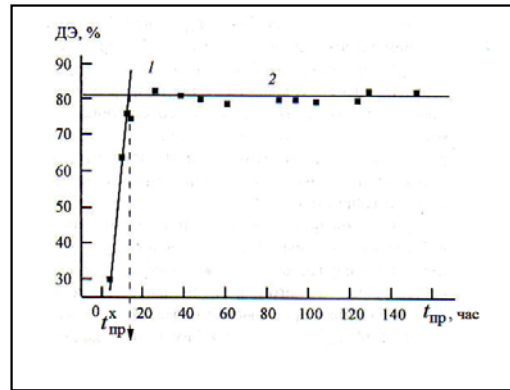


Рис.4. Зависимость дифракционной эффективности голограммы от времени постэкспозиционного прогрева - $t_{пр}$. 1 и 2 аппроксимирующие прямые, $t_{пр}^x$ – характерное время прогрева. Пространственная частота голограммы 640 мм^{-1} .

На рис.4 приведена типичная зависимость изменения такого важного параметра голограммы, как ее дифракционная эффективность, от времени постэкспозиционного прогрева. Как показали проведенные эксперименты, эта зависимость является важнейшей голографической характеристикой, определяемой условиями синтеза образцов среды. Типичную зависимость ДЭ от времени прогрева обычно можно аппроксимировать двумя прямыми (1 и 2), как это показано на рисунке. Прямая 1 характеризует рост ДЭ в самом начале постэкспозиционного прогрева, и ее наклон определяется скоростью диффузии ФХ при данной температуре прогрева, то есть скоростью деградации противофазной решетки, которую образовал непрореагировавший со светом ФХ. Прямая 2 характеризует поведение голограммы после достижения максимальных значений ДЭ и, как правило, параллельна оси абсцисс. Точка пересечения прямых 1 и 2 играет важную роль в процессе изменения параметров регистрирующей среды при постэкспозиционной обработке, поэтому она получила специальное обозначение – характерное время прогрева ($t_{пр}^x$). Характерное время прогрева образца определяется временем распределения непрореагировавшего ФХ равномерно по всему объему образца, которое зависит от условий проведения эксперимента (температура прогрева, пространственная частота голограммы и некоторые другие) и практически не зависит от концентрации ФХ и уровня экспозиции. При температуре прогрева 50°C и пространственной частоте голограммы 640 мм^{-1} это время составляет 7-12 часов.

Данные параметры характерны для образцов так называемого “оптимального синтеза”, проведенного по стандартному режиму с эффективными голографическими параметрами полученных образцов. При отклонении условий синтеза от оптимальных (осуществляемых целенаправленно или произошедших случайным образом) значение $t_{\text{пр}}^x$ отличается от полученного для оптимального синтеза. При отклонениях, приводящих к более мягкой структуре ПММА характерное время прогрева уменьшается, а полученная голограмма нестабильна и деградирует при повышенной температуре. При отклонениях, приводящих к более жесткой структуре ПММА, диффузия ФХ протекает настолько медленно, что не удается достичь высоких значений ДЭ за технологически разумное время прогрева.

2.2. Основные характеристики материала и их особенности

Разрешающая способность исследуемого регистрирующего материала с традиционной точки зрения определяется размерами молекул фенантренхинона (ФХ), диаметр которых составляет величину порядка 20 нм. Регистрация голограмм-решеток на материале такого типа производилась на максимальной пространственной частоте около 3000 мм^{-1} с эффективностью выше 80%, но с уверенностью можно сказать, что возможности материала по регистрации интерференционной структуры высокой пространственной частоты далеко не исчерпаны.

Достижимая амплитуда фазовой модуляции голограмм-решеток, зарегистрированных в среде с диффузионным усилением на различных пространственных частотах, определяется скоростью диффузии, что приводит к уменьшению фазовой модуляции в области низких пространственных частот (рис.5).

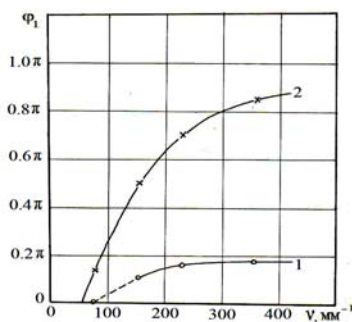


Рис.5. Зависимость фазовой модуляции пропускающих голограмм-решеток от пространственной частоты регистрируемой интерференционной картины. 1 — после экспонирования; 2 — после проведения полного цикла постэкспозиционной обработки.

Зависимость фазовой модуляции от пространственной частоты для голограмм, прошедших полный цикл постэкспозиционной обработки, иллюстрирует кривая 2 (рис.5): фазовая модуляция растет с увеличением пространственной частоты голограммы и достигает максимального значения, определяемого способом обработки и условиями записи голограммы. При рассмотрении области более высоких пространственных частот необходимо учитывать и ряд других факторов. Характеристики, определяющие селективность голограмм-решеток с различной пространственной частотой иллюстрирует рисунок 6.

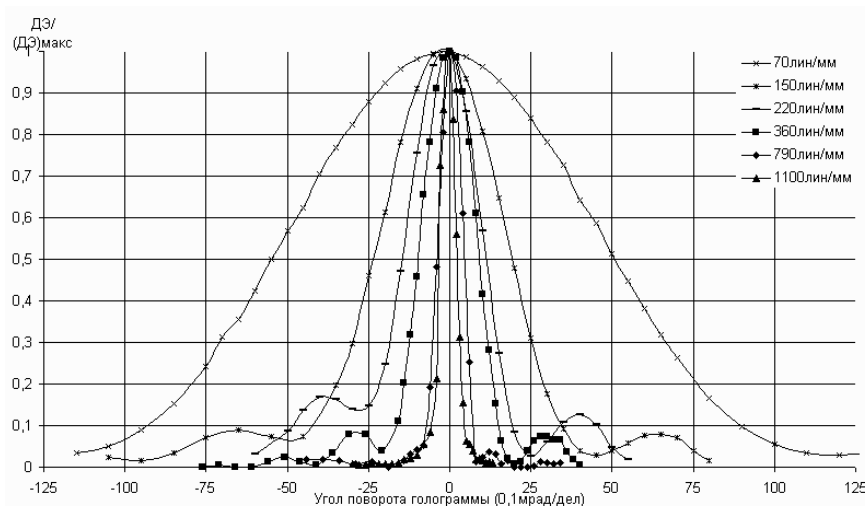


Рис.6. Контурсы угловой селективности пропускающих голограмм с различной пространственной частотой.

Для примера в таблице 1 приведены значения фазовой модуляции и модуляции показателя преломления среды «Диффен», определенные на пространственной частоте 640 мм^{-1} при различном уровне экспозиций.

Таблица 1. Параметры голограмм после проведения постэкспозиционной обработки.

Экспозиция голограммы, Дж/см^2	$\varphi_1^\perp$, рад.	$n_1^\perp$, 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

3.3. Заключение

При рассмотрении полимерного регистрирующего материала «Диффен» следует обратить внимание на следующее.

1. Материал имеет необычную для традиционных светочувствительных материалов частотно-контрастную характеристику – амплитуда фазовой модуляции зарегистрированных голограмм увеличивается с увеличением пространственной частоты голограммы, а в области низких пространственных частот (менее $50\text{--}100\text{ мм}^{-1}$) регистрация голограмм невозможна. Использование таких сред может быть весьма полезным при записи информации, требующей исключения низкочастотной составляющей пространственного спектра излучения.
2. Материал позволяет регистрировать интерференционную структуру, параметры которой не изменяются в процессе постэкспозиционной обработки, что позволяет избежать искажений регистрируемой информации в широком динамическом диапазоне.
3. Принято считать, что полимерная основа материала не позволяет изготавливать высококачественные оптические детали. Однако в настоящее время имеется возможность нанесения защитных покрытий на полимерную основу. При этом прочность поверхности полимерных образцов приближается к прочности деталей из силикатного стекла, что, несомненно, расширяет возможности и увеличивает перспективы использования материала «Диффен» для получения голограммных оптических элементов.
4. Материал «Диффен» относится к группе полимерных регистрирующих материалов, в которых реализован принцип диффузионного усиления, в настоящее время плодотворно используемый различными авторами в ряде научно-технических разработок. Существует ряд модификаций сред с использованием в качестве светочувствительного компонента органического красителя фенантренхинона. Название «Диффен» (от слов ДИФфузионный и ФЕНантренхинон) дано группой разработчиков этого материала, чтобы выделить из ряда модификаций полимерной среды с диффузионным усилением на основе фенантренхинона материал, образцы которого имеют определенные голографические и физико-механические параметры, определяемые разработанным режимом синтеза образцов и режимом получения голограмм.

«ДИФФЕН» - общие сведения.

Краткая информация

Диффен

- Полиметилметакрилат (ПММА) + органический краситель фенантренхинон (ФХ)
- Светочувствительность материала обусловлена способностью ФХ при облучении присоединяться к полимеру, превращаясь в фотопродукт (ФП)
- Относится к группе полимерных регистрирующих материалов, в которых реализован принцип диффузного усиления, в настоящее время плодотворно используемый различными авторами во всем мире в ряде научно-технических разработок
- Название «Диффен» (**ДИ**ффузионный, **ФЕН**антренхинон) дано группой разработчиков этого материала, чтобы выделить из ряда модификаций полимерной среды с диффузионным усилением на основе ФХ материал, образцы которого имеют определенные голографические и физико-механические параметры, определяемые разработанным режимом синтеза образцов и режимом получения голограмм.

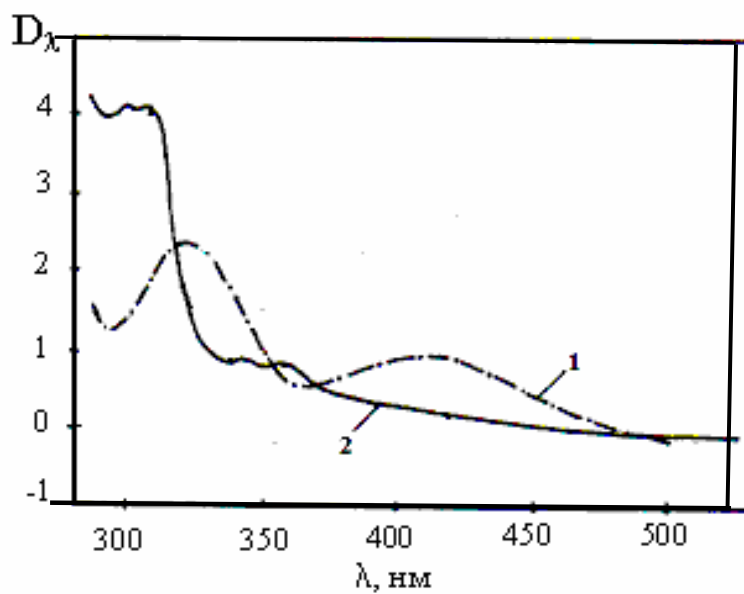
Этапы получения голограмм на материале «Диффен»

№	Этап	Необходимое оборудование	Режимы
1	Регистрация	Источники когерентного излучения в полосе поглощения ФХ	Экспозиции ($\lambda=488$ нм) 0,5-0,8 Дж/см ²
2	Прогрев	Термостат с установкой температуры 40-65°C	50°C 50 часов
3	Фиксирование	Источники некогерентного излучения в полосе поглощения ФХ (ртутная лампа $\lambda=436$ нм, светодиоды $\lambda_{\max}=470$ нм)	Светодиод (35mV) Время засветки образца диаметром 40 мм - 30 мин

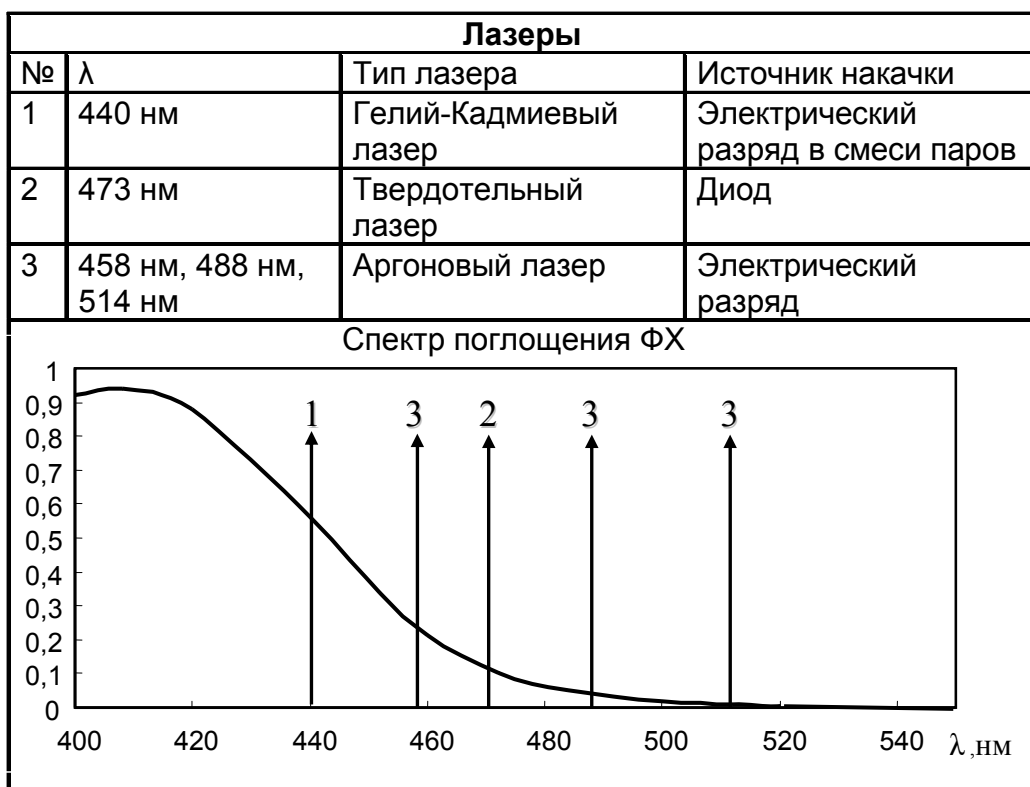
Основные характеристики

- Разрешающая способность – более 5000 мм^{-1} ;
- Толщина – до 10 мм;
- Безусадочность;
- Чувствительность в области 430-530 нм;
- Линейность записи в широком динамическом диапазоне;
- Возможность наложенной записи голограмм;
- Возможность длительного хранения информации

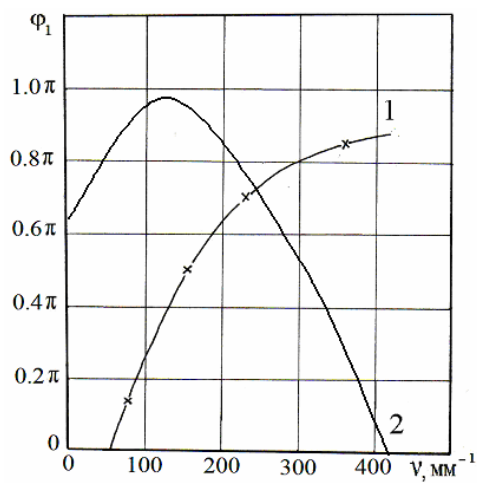
Спектры поглощения фенантренхинона (1) и фотопродукта (2) в полимерной матрице



Источники излучения для работы с материалом на основе ФХ



Частотно-контрастная характеристика регистрирующих материалов



1 – Диффен, 2 – фотоматериал

Приложение 3. Измерение распределения интенсивности в поперечном сечении пучка лазерного излучения методом сканирующего ножа

СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

Использование метода сканирующего ножа для измерения размера перетяжки каустики гауссова пучка.

При исследовании распределения интенсивности в поперечном сечении лазерного пучка может быть использован метод сканирования пучка прямолинейным краем полуплоскости, который получил название «Метод сканирующего ножа».

Рассмотрим применение данного метода для исследования поперечного сечения пучка, распределение интенсивности в котором можно описать функцией Гаусса.

Как правило, данный метод используется для измерения размера перетяжки каустики гауссова пучка и состоит в следующем.

Поперечное распределение интенсивности в одномодовом гауссовом пучке можно описать с помощью соотношения

$$I(r, \omega) = I_0 \cdot e^{\frac{-2r^2}{\omega^2}} \quad (1),$$

где r - радиальная координата (0 – центр пучка),

ω - характеристический радиус гауссова пучка (измеряется по уровню $1/e^2$),

I_0 – нормировочный коэффициент.

Если такой пучок перекрывать прямолинейным краем полуплоскости (край ножа), как показано на рис.1., то поток I_k оставшейся части пучка будет

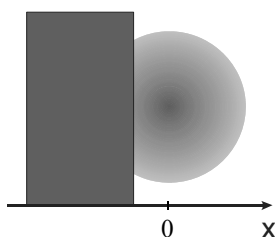


Рис.1.Перекрытие лазерного пучка краем полуплоскости

зависеть от положения координаты x края полуплоскости следующим образом

$$I_k(x, \omega) = I_1 \int_x^{\infty} e^{\frac{-2t^2}{\omega^2}} dt \quad (2),$$

где I_1 – нормировочный коэффициент.

Зависимость $I_k(x)$ приведена на рис.2. При исследовании формы пучка и сравнении с функцией Гаусса зависимости, полученной дифференцированием функции $I_k(x)$ по координате x , необходимо определить величину ω . Для этого требуется измерить половину расстояния между точками по оси координат x (поперек пучка), в которых интенсивность достигает величин 0.033 и 0.977 от максимального значения.

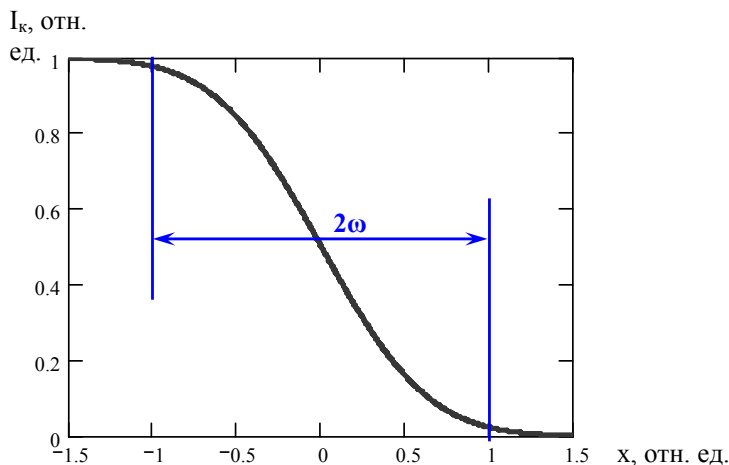


Рис.2. Зависимость потока I_k части гауссова пучка «вне ножа» от координаты x края перекрывающей его полуплоскости (величина 2ω определяется по уровням 0.033 и 0.977 от максимального значения)

Использование метода сканирующего ножа для измерения распределения интенсивности в поперечном сечении лазерного пучка.

Форма пучка излучения исследуемых лазеров может отличаться от функции Гаусса, но метод сканирующего ножа может быть использован для оценки профиля лазерного пучка по одной из координат, например, по координате x , при условии, что интенсивность лазерного пучка в перпендикулярном направлении (например, по координате z) не изменяется. При выполнении данной работы предполагается именно такая ситуация. Пучок излучения исследуемых лазеров в плоскости xz имеет вид полосы ($\sim 2 \times 5$ мм), вытянутой по координате z , из которой для проведения измерений вдоль оси x вырезается центральная часть (~ 2 мм),

что позволяет считать распределение интенсивности исследуемого пучка в направлении z равномерным.

В этом случае распределение интенсивности пучка по координате x может быть получено простым способом - дифференцированием функции $I_k(x)$ по x . На рис.3, для наглядности в качестве примера представлены функции $I_k(x)$ для трех различных математических распределений интенсивности в поперечном сечении лазерного пучка: прямоугольного, треугольного, гауссова.

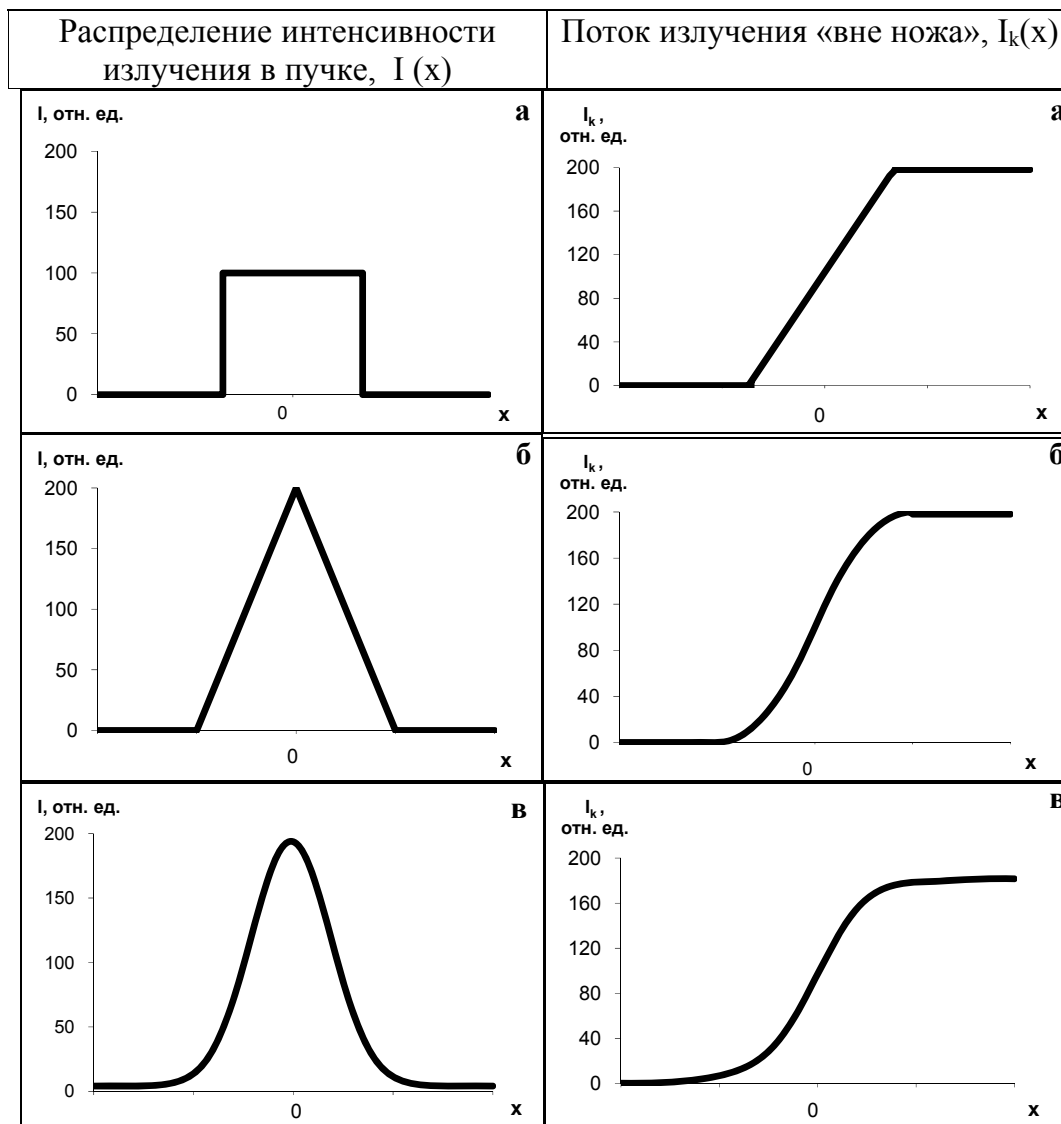


Рис.3. Вид функции $I_k(x)$ (поток излучения «вне ножа») для трех различных математических распределений интенсивности в

поперечном сечении лазерного пучка: прямоугольного (а), треугольного (б), гауссова (в).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

На рис.4а приведена принципиальная оптическая схема установки для проведения измерений распределения интенсивности в лазерном пучке «методом сканирующего ножа».

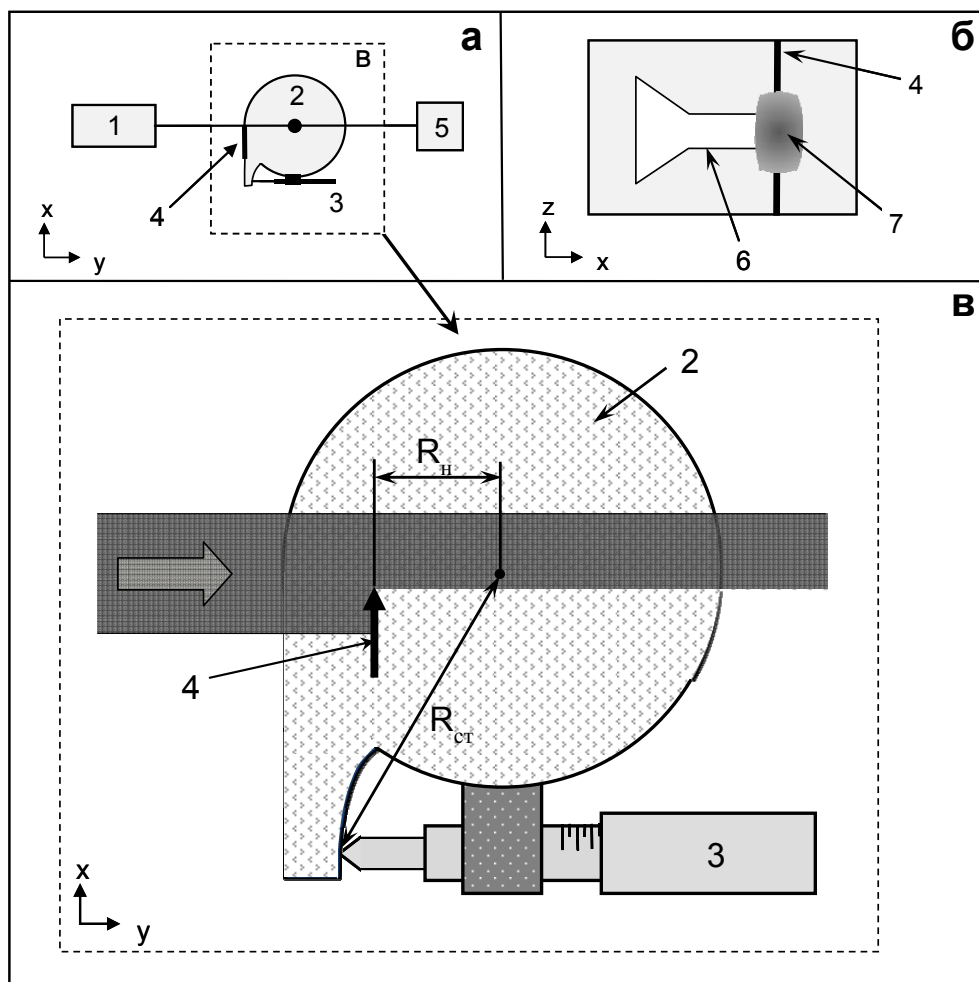


Рис.4.Схема установки для измерения распределения интенсивности в поперечном сечении пучка излучения полупроводникового лазера: а – принципиальная схема установки; б – устройство «ножа и щели»; в – схема поворотного узла. 1 – источник излучения, 2 – поворотный столик, 3 – микрометрический винт, 4 – «нож», 5 – приемник излучения, 6 – диафрагма, 7 – пучок лазерного излучения.

При проведении измерений в поперечное сечение лазерного пучка вводится нож, который может перемещаться вдоль оси x . Нож совмещен со щелевой диафрагмой, которая позволяет выделять участок исследуемого пучка излучения равномерный в направлении оси z . Устройство «ножа и щели» схематически показано на рис.4б. Схема поворотного узла детально рассмотрена на рис.4в: нож устанавливается на край поворотного столика, а его перемещение по оси x реализуется при небольшом диапазоне углов поворота. (Движение ножа происходит по окружности радиуса порядка 40мм и длине дуги порядка 2мм, так что траекторию движения можно с большой точностью аппроксимировать прямой линией).

При повороте столика (путем осторожного и медленного вращения микровинта) нож, двигаясь по координате x , последовательно перекрывает исследуемый пучок. Положение ножа определяется по данным барабана микрометрического винта (МВ), а его смещение по величине перемещения микровинта. Если $L_{\text{МВ}}$ - перемещение микровинта, $L_{\text{н}}$ – перемещение ножа, то $L_{\text{н}}$ определяется по формуле:

$$L_{\text{н}} = L_{\text{МВ}} \cdot R_{\text{н}} / R_{\text{ст}} \quad (3).$$

Как видно, установка ножа на поворотном столике позволяет увеличить точность измерения перемещений ножа ($L_{\text{н}}$) в $R_{\text{ст}} / R_{\text{н}}$ раз по сравнению с точностью измерения перемещений ($L_{\text{МВ}}$), осуществляемых непосредственно головкой барабана микрометрического винта. Таким образом, данное устройство позволяет двигать лезвие ножа с большой точностью, недостижимой при использовании стандартных механических устройств, осуществляющих сдвиг по прямой линии: при повороте барабана микрометрического винта на одно деление, равное сдвигу на 0.01мм, столик, имеющий радиус вращения 100 мм, поворачивается на угол 0,1 мрад. Линейный сдвиг ножа перпендикулярно оптической оси происходит при этом на расстояние ($L_{\text{н}}$), которое зависит от $R_{\text{н}}$ - положения ножа относительно оси вращения столика. Устройство ножа устанавливается во время занятия и $R_{\text{н}}$ измеряется перед началом проведения эксперимента.

Измерение потока излучения производится с помощью приемника излучения (элемент 5 на рис.4), представляющего собой фотодиод ФД-24, соединенный с измерительным прибором (мультиметром). Фотодиод работает в фотогальваническом режиме и поток излучения прямо пропорционален току приемника излучения (фототоку).

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Установить рабочий режим работы источника излучения.
2. Установить приемник излучения на оптической оси так, чтобы пучок излучения полностью попадал во входное окно приемника. Включить измерительный прибор (мультиметр) на измерение тока.
3. Установить узел поворотного столика в необходимое положение на оптической оси и установить нож для проведения измерений в соответствии со схемой, изображенной на рис.4а; проверить юстировку оптической схемы – пучок излучения должен полностью попадать на входное окно приемника излучения; измерить расстояние R_n . Лазерный пучок должен проходить через ось вращения поворотного столика.
4. Оценить диапазон изменения значений барабана МВ, требуемый для получения зависимости $I_k(x)$, и определить сдвиг барабана МВ между двумя измерениями при получении данной зависимости, которая должна содержать необходимое количество экспериментальных точек. Важно! - Количество точек, взятых для построения функции, существенно влияет на точность определения производной от этой функции.
5. Провести измерения значений I_k , изменяя положение барабана микрометрического винта (МВ). Использовать таблицу для записи экспериментальных данных: столбцы 2 и 5. Начинать измерения удобнее, когда нож полностью перекрывает исследуемую часть лазерного пучка, т. к. в этом случае производная от получаемой функции будет иметь положительные значения.
6. Показать данные преподавателю.

Таблица 1. Запись и обработка результатов эксперимента.

№ п/п	Положение барабана МВ, мм	Смещение ножа, L_n , мм	Положение ножа на оси x , мм	Поток излучения вне ножа, I_k , мкА
1	2	3	4	5
1				
2				
...				

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

1. Рассчитать смещение ножа (L_n) при проведении измерений – заполнить столбец 3 таблицы, используя формулу (3) в предположении, что при первом измерении $L_{MB} = 0$.
2. Построить зависимость I_k от L_n . – см. рис.5а.
3. Продифференцировать полученную зависимость и получить функцию $I(L_n)$ – см. рис.5б. Полученная зависимость представляет собой искомое распределение интенсивности в поперечном сечении пучка лазерного излучения. Дифференцирование проводить численно с помощью компьютера или графически*. (Таблица 2 для записи данных в этом случае может быть сделана в произвольной форме, удобной для проведения вычислений и сопоставления с положением ножа на оси x - данными столбца 4 таблицы 1.)
4. Рассчитать положение ножа на оси x при проведении измерений, предполагая, что $x = 0$ при максимальном значении функции $I(L_n)$. Заполнить столбец 4 таблицы для построения зависимости $I(x)$ (см. рис.5в), которая графически представляет собой искомое распределение интенсивности в поперечном сечении пучка лазерного излучения в системе координат, где оптическая ось совпадает с координатой y .

* Вычислить производную от функции можно с помощью программы ORIGIN, установленной на компьютерах кафедры и в компьютерном классе кафедры, – проконсультироваться с преподавателем.

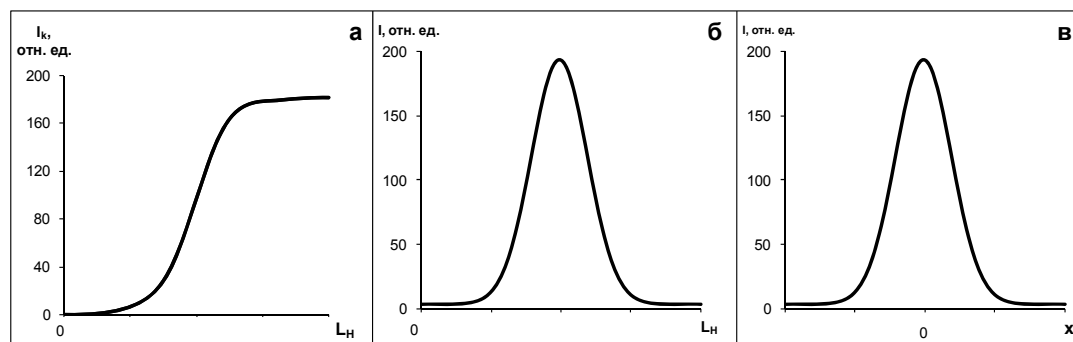


Рис.5. а – зависимость потока излучения вне ножа (I_k) от смещения ножа (L_n); б – зависимость интенсивности излучения в лазерном пучке (I) от положения ножа (L_n); в – распределение интенсивности излучения в лазерном пучке по координате x при условии, что оптическая ось совпадает с осью y и имеет координаты $[0, y, 0]$.

ЛІТЕРАТУРА

1. Y.Suzaki, A.Tachibana. Measurement of the μm sized radius of Gaussian laser beam using the scanning knife-edge //Applied Optics. – 1975. – V.14. No.12. – P.2809-2810.
2. G.Brost, P.Horn, A.Abtahi. Convenient spatial profiling of pulsed laser beams //Applied Optics. – 1985. – V.24. No.1. – P.38-40.

Часть 2. Терминологический словарь

Голография как научное направление и область научно-технической деятельности насчитывает уже 60 лет своего существования.

В настоящее время голографический метод занял свое место во многих областях науки и техники: защитная голография стала неотъемлемой частью жизни современного общества; перспективы развития информационных технологий нельзя рассматривать без включения и использования голографии; синтез цифровых и оптических технологий в голографии демонстрирует огромные перспективы этого направления научно-технической деятельности. Образовательный компонент представляет собой важную часть процесса развития голографии. Голографический метод используют специалисты разных направлений, число которых неуклонно пополняется, а доступной литературы по голографии в России практически не существует. Поэтому важной задачей является выработка и создание современной русскоязычной терминологии голографии, которая невозможна без подготовки доступного терминологического словаря, отражающего основные понятия на современном уровне представлений этой области деятельности. Такой словарь в первую очередь должен восполнить существующий на сегодняшний день пробел - отсутствие доступной литературы по голографии, что, безусловно, будет способствовать повышению интереса к этой научно-технической области, в особенности среди молодежи.

Предлагаемый материал представляет собой попытку работы в этом направлении, и предназначен, в первую очередь, для обучения студентов СПбГУ ИТМО по дисциплине «Прикладная голография» (образовательное направление 200600 «Фотоника и оптоинформатика»). При подготовке словаря использована терминология, принятая в рамках голографической научной школы Ю.Н.Денисюка и поддерживаемая его учениками и последователями, а также термины, понятия и определения, используемые в общем курсе физики для технических вузов.

Статьи «Голография», «Голограмма», «Динамическая голография» и некоторые другие написаны в соавторстве с Д.И.Стаселько; статьи «Волновое число», «Волновой вектор», «Волновой фронт», «Мира», «Монохроматическое излучение», «Оптическое излучение», «Свет», «Светофильтр» подготовлены Л.Н.Капорским.

**СПИСОК ТЕРМИНОВ,
включенных в данное пособие**

Бентона голограмма (голограмма радужная)
Волна объектная (предметная)
Волна опорная (референтная)
Волновое число
Волновой вектор
Волновой фронт (волновая поверхность)
Габора голограмма
Голограмма
Голограмма амплитудная
Голограмма безопорная
Голограмма внеосевая
Голограмма двумерная (плоская)
Голограмма трехмерная (объемная)
Голограмма динамическая
Голограмма осевая
Голограмма отражательная
Голограмма статическая
Голограмма сфокусированного изображения
Голограмма фазовая
Голограмма цифровая
Голограммный оптический элемент (ГОЭ)
Голографическая интерферометрия
Голографическая схема
Голографическая установка
Голография
Голография цифровая
Делимость голограммы
Денисюка голограмма
Динамический диапазон воспроизведения градации яркости объекта
Дифракционная эффективность
Диффузное отражение
Диффузное пропускание
Диффузное рассеяние
Диффузор (диффузный рассеиватель)
Изображение действительное
Изображение мнимое
Изображение ортоскопическое
Изображение псевдоскопическое
Изобразительная голография

Изобразительная голограмма
Индикатриса рассеяния
Лейта и Упатниекса голограмма
Мира (тест-объект)
Монохроматическое излучение
Оптическая длина пути
Оптическая разность хода
Оптическое излучение
Освещенность (облученность)
Параллакс
Принцип дисперсионной рефракции
Пространственная частота голограммы
Пространственная частота излучения
Регистрация голограммы (запись голограммы)
Регистрация голограммы в линейном режиме
Регистрирующая среда динамическая
Регистрирующая среда реверсивная
Регистрирующая среда со скрытым изображением
Регистрирующие среды для голографии
Реконструкция голограммы
Свет (видимое излучение)
Светофильтр
Селективность голограммы
Считывание голограммы
Условие Брэгга (условие Вульфа-Брэгга)
Фоторефрактивные регистрирующие среды
Френеля голограмма
Функция передачи контраста
Фурье голограмма
Экспозиция
Яркость

Бентона голограмма (голограмма радужная) – голограмма сфокусированного изображения, допускающая восстановление объектной волны источником излучения со сплошным спектром (лампа накаливания, Солнце) за счет ограничения пространственного спектра объекта в одном (как правило, вертикальном) направлении. Снижение параллакса в вертикальном направлении практически незаметно для наблюдателя, который за счет зрения двумя глазами ощущает параллакс в горизонтальном направлении. Радужная голограмма позволяет наблюдать четкое цветное изображение объекта (в отличие от размытого изображения объекта при использовании голограммы, полученной без ограничения пространственного спектра объектной волны). При этом цвет изображения зависит от положения глаз наблюдателя и не связан с цветом объекта. Радужные голограммы получили широкое распространение в качестве изобразительных голограмм, различных элементов кодирования, маркировки, украшения полиграфической продукции и для повышения защищенности от подделок документов, ценных бумаг и товарных знаков. Широкое применение радужных голограмм связано с возможностью использования для их регистрации светочувствительных материалов, образующих поверхностный рельеф (рельефографические материалы), что позволяет производить массовое копирование таких голограмм контактным способом. Метод получения радужных голограмм был предложен С.А. Бентоном (Stephen A. Benton) в 1976 г.

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

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

Волновое число – модуль волнового вектора, который в изотропной среде совпадает по направлению с направлением нормали к волновому фронту. Волновое число k связано с круговой частотой ω , фазовой скоростью U_ϕ и пространственным периодом (длиной волны) λ соотношением $k = 2\pi/\lambda = \omega/U_\phi$. При анализе периодических процессов, развивающихся в пространстве, используют понятие пространственной частоты (λ^{-1}) или круговой пространственной частоты ($2\pi/\lambda$). Единица измерения волнового числа и пространственной частоты в системе СИ – м^{-1} ; в спектроскопии часто используется см^{-1} .

Волновой вектор – вектор $\mathbf{k}$, определяющий направление распространения плоской монохроматической волны в изотропной среде. Модуль волнового вектора называется волновым числом $k = 2\pi/\lambda$, где λ – пространственный период или длина волны излучения.

Волновой фронт (волновая поверхность) – поверхность, во всех точках которой волна имеет в данный момент времени одинаковую фазу. Распространение волны происходит в направлении нормали к волновому фронту и может рассматриваться как движение волнового фронта через среду. В простейшем случае волновой фронт представляет плоскую поверхность, а соответствующая ему волна называется плоской. Существуют также сферические, цилиндрические и другие волновые фронты. Излучение точечного источника в изотропной среде имеет волновой фронт сферической формы.

Габова голограмма – осевая пропускающая двумерная голограмма, при регистрации которой источник света, прозрачный объект (О) и регистрирующая среда (РС) расположены на общей прямой (рис.1а). Излучение, рассеянное объектом, создает объектную волну, а опорная волна представляет собой часть излучения, прошедшую через объект без изменения направления. При освещении голограммы Габора (рис.1б) волны $+1(I_{+1})$ и $-1(I_{-1})$ порядков дифракции, образуют действительное и мнимое изображения объекта, которые находятся на одной оси. При наблюдении изображений, формируемых голограммой Габора, дифрагированные волны и волна, прошедшая голограмму без дифракции (I_0), накладываются друг на друга и создают взаимные помехи, из-за которых голограмма Габора не получила широкого распространения. В настоящее время голограммы Габора применяются для регистрации пространственных ансамблей частиц малых размеров, при изготовлении осевых голограммных элементов. На примере получения такой

голограммы Д. Габор в 1947 г. доказал возможность записи и восстановления амплитуды и фазы волны, распространяющейся от объекта. Д. Габор (Dennis Gabor) – основатель голографии, лауреат Нобелевской премии (1972 г.).

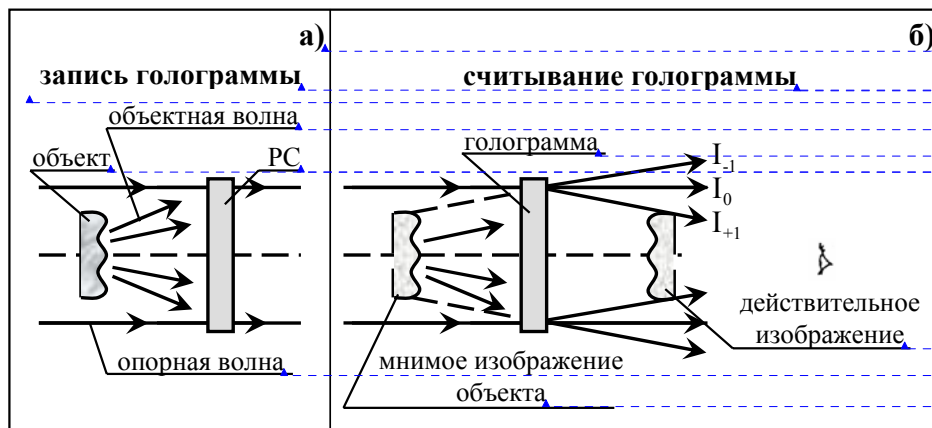


Рис.1.Схема записи (а) и считывания (б) голограммы Габора

Голограмма – зарегистрированный результат взаимодействия (интерференции) двух или более когерентных волн. Голограмма может быть получена физическими методами в результате взаимодействия излучения с приемником (регистрирующей средой) или синтезирована с использованием иных методов (например, методов вычислительной техники). Падающее на голограмму излучение в результате дифракции на ее структуре преобразуется в восстановленную (дифрагированную) волну, параметры которой могут совпадать с одной из использованных для получения голограммы волн, а также находиться с ними в определенных соотношениях (например, сопряженные волны). В простейшем случае взаимодействия двух когерентных плоских волн I_1 и I_2 (рис.2) голограмма называется элементарной и представляет собой одномерную решетку толщины T , в которой изменение параметров среды происходит по координате x (рис.2б). При этом расстояние между соседними максимумами интенсивности в регистрируемой интерференционной картине (рис.2в) $d = \lambda / (\sin\theta_1 + \sin\theta_2)$, где λ – длина волны регистрируемого излучения, θ_1 и θ_2 – углы падения интерферирующих волн I_1 и I_2 на регистрирующую среду (на рисунке приведена симметричная схема записи голограммы, где $\theta_1 = \theta_2 = \theta$). Элементарная голограмма, полученная в линейной регистрирующей среде, является синусоидальной решеткой, а параметр d в этом случае определяет период изменения оптических постоянных в голограмме, то есть ее пространственную частоту. Элементарные голограммы являются хорошо изученной и

Отформатировано:
Шрифт: (по умолчанию)
Times New Roman

Отформатировано:
Шрифт: (по умолчанию)
Times New Roman

Отформатировано:
Шрифт: (по умолчанию)
Times New Roman

Отформатировано:
Шрифт: (по умолчанию)
Times New Roman, 13 pt

Отформатировано:
Шрифт: (по умолчанию)
Times New Roman, 13 pt

Отформатировано:
Шрифт: (по умолчанию)
Times New Roman

Отформатировано:
Шрифт: (по умолчанию)
Times New Roman

Отформатировано:
Шрифт: (по умолчанию)
Times New Roman

Отформатировано:
Шрифт: (по умолчанию)
Times New Roman

Отформатировано:
Шрифт: (по умолчанию)
Times New Roman

Отформатировано:
Шрифт: (по умолчанию)
Times New Roman

Отформатировано:
Шрифт: (по умолчанию)
Times New Roman

удобной моделью для количественных оценок и аналитического описания процессов получения и считывания голограмм. Произвольную голограмму в ряде случаев можно представить в виде суперпозиции элементарных голограмм с различными параметрами. Важнейшими характеристиками, определяющими свойства полученных голограмм, являются: пространственная частота голограммы ν , толщина голограммы T , характер отклика регистрирующей среды на воздействие излучения, ориентация изофазных поверхностей интерференционной картины относительно границ голограммы.

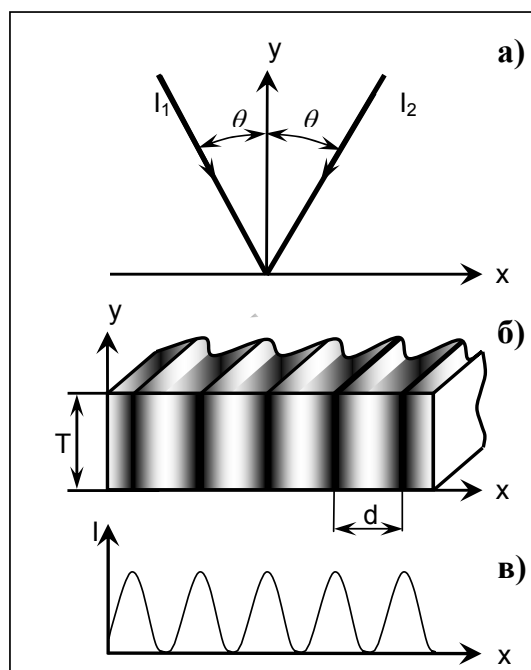


Рис.2. Элементарная голограмма: а) направление распространения интерферирующих пучков; б) одномерная решетка с периодом d , полученная в регистрирующей среде с толщиной T ; в) распределение интенсивности излучения в интерференционной картине по оси «х» (в направлении вектора решетки).

Голограмма амплитудная — голограмма, дифракция излучения на которой обусловлена изменением коэффициента поглощения среды. Амплитудные голограммы получают на галогенидосеребряных фотографических материалах, на фотохромных средах, термопластических материалах и т.д. Эффективность амплитудных голограмм, как правило, невысока и зависит от типа голограммы и характера фотоотклика среды. В таблице приведены максимально достижимые значения дифракционной эффективности, вычисленные для элементарных амплитудных голограмм.

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

Уникальной особенностью является эффект просветления трехмерных амплитудных голограмм (эффект Бормана), заключающийся в том, что суммарная интенсивность волн, прошедших голограмму при ее освещении в условиях Брэгга, может существенно превышать интенсивность прошедшей через голограмму волны при ее освещении вне условий Брэгга, когда интенсивность дифрагированной волны можно считать равной нулю. Эффект возникает за счет того, что существующие одновременно восстанавливающая и дифрагированная волны формируют стоячую волну, максимумы которой совпадают с минимумами амплитудной голограммы, что приводит к уменьшению результирующего поглощения голограммы. Амплитудные голограммы обычно используют при необходимости воспроизведения объектной волны с минимальными искажениями.

Голограмма безопорная – голограмма, полученная без использования опорного (референтного) пучка. Запись безопорной голограммы осуществляется в объемной регистрирующей среде с использованием только объектной волны; интерференционная структура голограммы обусловлена когерентным взаимодействием излучения различных частей объекта; восстановление объектной волны может быть осуществлено при освещении голограммы излучением, сформированным только отдельным участком объекта. Безопорные голограммы используются при создании диффузоров, в схемах с обращением волнового фронта ("бриллюэновское зеркало") и других технических приложениях.

Голограмма внеосевая – пропускающая голограмма, при регистрации которой используется угол между объектной и опорной волнами, который позволяет пространственно разделить дифрагированные и недифрагированные волны. Большинство существующих голографических схем служит для получения внеосевых голограмм.

Голограмма двумерная (плоская) – голограмма, при рассмотрении которой можно пренебречь эффектами, связанными с ее конечной толщиной. При освещении двумерной голограммы образуются по крайней мере две дифрагированные волны (+1 и -1 порядков дифракции), которые формируют действительное изображение объекта ($k = +1$), и мнимое изображение ($k = -1$), а также присутствует волна нулевого порядка дифракции ($k = 0$). В большинстве практических случаев происходит образование большого количества порядков дифракции. Математический аппарат, разработанный для традиционных (плоских) дифракционных решеток, (полученных, например, методом нанесения штрихов на гладкую поверхность) применим и для теоретического анализа двумерной голограммы. При восстановлении объектной волны для двумерной голограммы существует принципиальная возможность изменения масштаба изображения объекта путем соответствующего выбора параметров схемы и длины волны излучения при регистрации голограммы и ее считывании. Использование излучения различного спектрального состава при записи и восстановлении объектной волны дает возможность неdestructивного считывания двумерных голограмм и обеспечивает их широкое применение в качестве управляемых транспарантов в системах обработки информации.

Голограмма трехмерная (объемная) – голограмма, при освещении которой формируется только один дифракционный порядок (-1). При этом толщина голограммы намного превышает пространственный период изменения ее оптических параметров. Трехмерная голограмма обладает угловой и спектральной селективностью, что обеспечивает возможность воспроизведения в дифрагированной волне не только амплитуды и фазы объектной волны, но также и ее спектрального состава. Высокая эффективность и информационная емкость трехмерных голограмм привлекают к ним внимание многих исследователей, однако, теоретический анализ трехмерных голограмм достаточно разработан лишь для ограниченного круга объектных волн (модовая теория, теория связанных волн). Как правило, вопрос о степени объемности голограммы решается экспериментально по наличию +1 и высших порядков дифракции и их эффективности. В качестве теоретического критерия степени объемности используют параметр Клейна $Q = 2\pi\lambda T/(nd^2)$, применимый в случае элементарных голограмм, где λ – длина волны излучения, T – толщина голограммы, n – средний показатель преломления голограммы, d – пространственный период голограммы. При $Q > 10$ голограмму принято считать трехмерной, высокоселективные трехмерные голограммы имеют $Q > 1000$. Трехмерные голограммы получили широкое

применение в изобразительной голографии, динамической голографии, при получении голограммных оптических элементов. Благодаря высокой селективности трехмерные голограммы используются в качестве узкополосных спектральных и угловых селекторов: в настоящее время на регистрирующих материалах толщиной порядка 1 мм достигнуты значения спектральной селективности – порядка десятых долей нм, а угловой селективности – порядка единиц угловых минут.

Голограмма динамическая – голограмма, регистрируемая в среде, оптические параметры которой изменяются под действием формирующего голограмму излучения, что приводит к дифракции излучения на голограмме в процессе ее регистрации, обуславливающей изменение характеристик записывающих волн и появление новых волн. Обычно считывание динамической голограммы производится во время регистрации голограммы одной из формирующих ее волн. В результате стадии формирования и считывания динамической голограммы, в отличие от голограммы статической, неразрывно связаны, а процесс записи-считывания является одновременным. Параметры динамической голограммы определяются характеристиками регистрируемого излучения (длиной волны, шириной спектра, мощностью и длительностью воздействия), свойствами регистрирующей среды (нелинейной восприимчивостью и временем релаксации), а также условиями записи (величиной и ориентацией внутренних и внешних электрических полей; геометрией записи, состоянием поляризации взаимодействующих волн и наличием между ними частотного сдвига и т.д.). Динамические голограммы дают возможность управлять интенсивностью, формой и направлением распространения волн и в настоящее время применяются для компенсаций искажений волнового фронта в адаптивной оптике и лазерной технике, для решения задач оптической обработки информации в реальном времени. Для получения динамических голограмм используют нелинейные регистрирующие среды: фоторефрактивные электрооптические и жидкие кристаллы; резонансно поглощающие пары металлов, эффекты вынужденного и нелинейного рассеяния света и т.д. Разновидностью динамических голограмм являются доплеровские голограммы, образующиеся при регистрации быстро движущихся объектов.

Голограмма осевая – пропускающая голограмма, при регистрации которой объектная и опорная волны являются соосными. Восстановленная такой голограммой (дифрагированная) волна и волна, прошедшая голограмму без дифракции, пространственно неразделимы. К этому типу относится голограмма Габора. Схемы регистрации осевых голограмм

позволяют использовать источники излучения с малой длиной когерентности и регистрирующие среды низкого разрешения. Основным недостатком осевой голограммы является невозможность пространственного разделения волн, прошедших голограмму.

Голограмма отражательная – голограмма, при регистрации которой объектная и опорная волны падают на регистрирующую среду с противоположных сторон (рис.3). При освещении отражательной голограммы дифрагированная волна наблюдается в отраженном свете. На рисунке 3а показано расположение интерферирующих волн I_1 и I_2 относительно регистрирующей среды при регистрации элементарных отражательных голограмм по симметричной схеме, где $(\pi/2 - \theta)$ – угол падения излучения на регистрирующую среду, T – толщина регистрирующей среды, d – расстояние между двумя соседними максимумами интенсивности в регистрируемой интерференционной картине. На рисунке 3б схематически показано расположение волн при освещении трехмерной отражательной голограммы в условиях Брэгга ($\theta = \theta_{\text{Бр}}$, $I_{\text{пад}}$ – падающая, или восстанавливающая волна, $I_{\text{д}}$ – дифрагированная, или восстановленная волна, I_0 – волна нулевого порядка дифракции, прошедшая голограмму без изменения направления). Отражательные голограммы широко применяются в изобразительной голографии, т.к. проявляют объемные свойства при регистрации на традиционных фотоматериалах толщиной $10 \div 15$ мкм, что позволяет для восстановления объектной волны использовать источники со сплошным спектром излучения (стандартные лампы накаливания, Солнце).

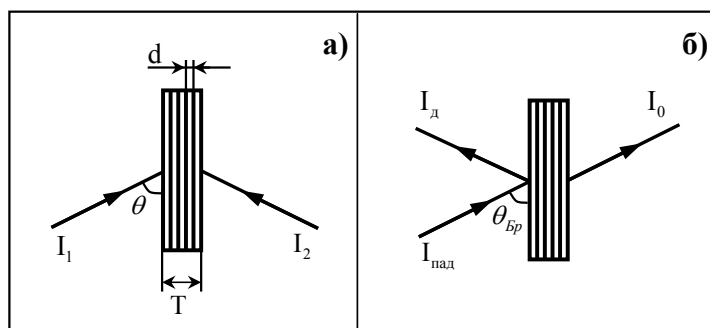
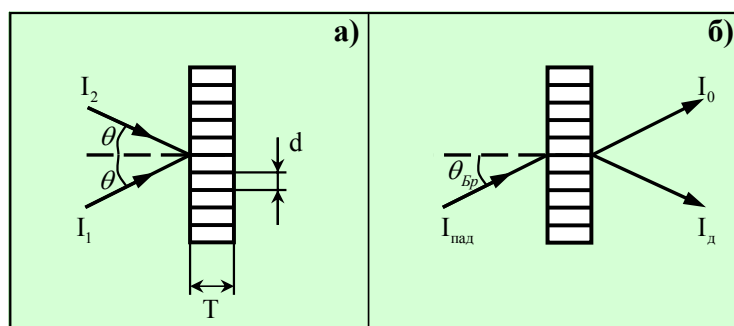


Рис.3.Схема записи (а) и считывания (б) отражательной голограммы.

Голограмма пропускающая - голограмма, при регистрации которой объектная и опорная волны падают на регистрирующую среду с одной стороны (рис. 4). При освещении пропускающей голограммы дифрагированная волна наблюдается в проходящем свете. Расположение интерферирующих волн I_1 и I_2 относительно регистрирующей среды при

записи элементарных пропускающих голограмм по симметричной схеме показано на рисунке 4а, где θ – угол падения излучения на регистрирующую среду, T – толщина регистрирующей среды, d – расстояние между двумя соседними максимумами интенсивности в регистрируемой интерференционной картине. На рисунке 4б показано направление распространения волн при освещении трехмерной пропускающей голограммы в условиях Брэгга ($\theta = \theta_{\text{Бр}}$, $I_{\text{пад}}$ – падающая, или восстанавливающая волна, $I_{\text{д}}$ – дифрагированная, или восстановленная волна, I_0 – волна нулевого порядка дифракции, прошедшая голограмму без изменения направления). Пропускающие голограммы используются в качестве оптических элементов различного назначения, управляемых транспарантов в системах обработки информации.



Примечание [A1]: а, б

Рис.4.Схема записи (а) и считывания (б) пропускающей голограммы.

Голограмма статическая – голограмма, оптические параметры которой после ее получения не изменяются во времени. Как правило, процесс получения высокоэффективных статических голограмм состоит из двух основных этапов: 1 – регистрация голограммы (экспонирование регистрирующей среды), во время которой не происходит заметных изменений оптических параметров регистрирующей среды, а образуется так называемое скрытое изображение; 2 – постэкспозиционная обработка голограмм, которая включает в себя различные химические и физические процессы, усиливающие (преобразующие) скрытое изображение и фиксирующие голограмму. Сочетание возможности значительного усиления результата воздействия излучения на регистрирующую среду и фиксирования голограммы обеспечивает двуступенному процессу получения голограмм высокую чувствительность и длительную сохраняемость записанной информации. Для получения статических голограмм используют галогенидосеребряные фотографические материалы, материалы на основе бихромированной желатины, фоторезисты, фототермопластики и т.д.

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

Голограмма сфокусированного изображения – голограмма, при регистрации которой изображение объекта (либо сам объект) располагается в плоскости регистрирующей среды или вблизи нее. При освещении такой голограммы **трехмерное изображение объекта пересекается** с плоскостью голограммы, а угол, в пределах которого можно наблюдать изображение, ограничен апертурой оптической системы, используемой при регистрации голограммы (либо ограничен самой голограммой). Схема регистрации голограммы сфокусированного изображения (рис.5) позволяет снизить требования к размерам, пространственной когерентности и монохроматичности источника излучения при восстановлении объектной волны и увеличить яркость изображения объекта, благодаря ограничению угла наблюдения.

Примечание [A2]: может быть, трёхмерное изображение объекта пересекается с плоскостью голограммы?

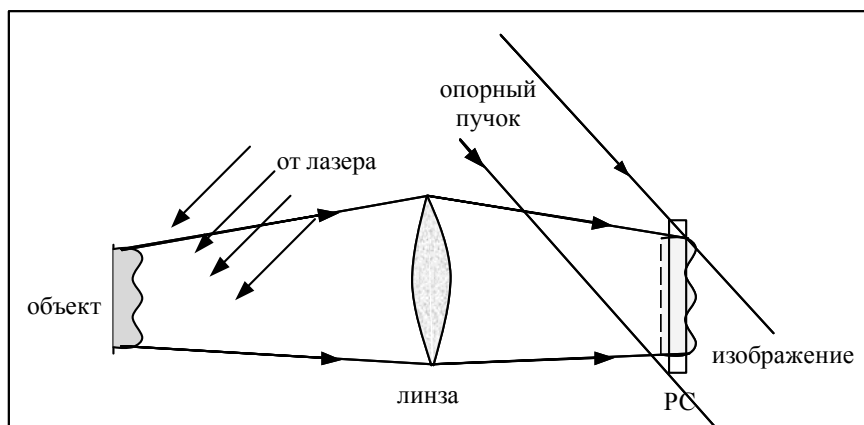


Рис.5. Принципиальная оптическая схема регистрации голограммы сфокусированного изображения. РС – регистрирующая среда.

Голограмма фазовая – голограмма, дифракция излучения на которой обусловлена изменением показателя преломления среды (в случае анизотропных сред – тензора диэлектрической проницаемости), либо изменением толщины среды (рельефографические материалы). Статические фазовые голограммы получают на галоидосеребряных фотографических материалах (с применением постэкспозиционной обработки, преобразующей проявленное серебро в соли серебра, прозрачные в видимом диапазоне спектра), фотоматериалах на основе бихромированной желатины, фотополимерах и других. Для получения динамических фазовых голограмм используют **фоторефрактивные электрооптические и жидкие кристаллы**; прозрачные и

Примечание [A3]: немного смущают "фоторефрактивные, электрооптические и жидкие кристаллы", хотя формально и не придраться

слабопоглощающие нелинейные оптические среды. Максимальные значения дифракционной эффективности фазовой голограммы – 33% для двумерных и 100% для трехмерных голограмм практически реализованы при использовании современных регистрирующих сред. Фазовые голограммы получили широкое распространение во многих приложениях голографии, включая изобразительную голографию, получение голограммных оптических элементов и т.д.

Голограмма цифровая – голограмма, структура которой рассчитана с использованием численных методов. В технической литературе существует ряд синонимов: синтезированная голограмма, компьютерная голограмма, искусственная голограмма, каждый из которых имеет специфические особенности и области применения, так что в настоящее время нельзя полноценно заменить один термин другим без понимания конкретного научного контекста.

Голограммный оптический элемент (ГОЭ) – оптический элемент для преобразования излучения, изготовленный с помощью голографического метода.

Голографическая интерферометрия – получение, наблюдение и интерпретация интерференционных картин, образованных волнами, из которых хотя бы одна зарегистрирована и восстановлена голограммой. При считывании (реконструкции) голограммы в схеме записи при наличии объекта возникают две волны, распространяющихся в одном направлении – одна, рассеянная непосредственно объектом и другая, восстановленная голограммой и являющаяся копией той волны, которая формировалась объектом во время экспонирования голограммы. Эти волны являются когерентными и могут интерферировать. Изменения, происходящие с объектом (деформация или локальное изменение показателя преломления), ведущие к фазовым искажениям объектной волны, приведут к изменениям в форме и характере полос наблюдаемой интерференционной картины.

При использовании голографической интерферометрии в реальном времени интерференционную картину наблюдают одновременно с изменениями, происходящими с объектом.

При использовании метода двух экспозиций на одной регистрирующей среде последовательно регистрируют две голограммы, соответствующие двум различным состояниям одного и того же объекта. При реконструкции такой двухэкспозиционной голограммы одновременно восстанавливаются и интерферируют между собой две волны,

являющиеся голографическими копиями объектных волн, существовавших во время разных экспозиций.

При использовании так называемых двухдлинноволновых методов на одной регистрирующей среде в течение одной экспозиции регистрируется интерференционная картина, образованная волнами разной частоты (использование источника излучения двух или более длин волн). При реконструкции такой голограммы монохроматическим излучением восстановленные волны образуют интерференционную картину, (соответствующую различию их фазового рельефа), обусловленную как различием длин волн, так и дисперсией исследуемого объекта. Этот метод используют для исследования дисперсии плазмы, а также для изучения рельефа поверхностей.

Основные преимущества голографической интерферометрии при сравнении с методами классической интерферометрии заключаются в следующем:

- Широкие возможности исследования прозрачных и отражающих объектов любой формы и качества поверхности (включая диффузно отражающие объекты);
- Снижение требований к качеству оптики за счет дифференциального характера метода;
- Возможность сравнения световых волн, рассеянных (сформированных) объектом в разные моменты времени;
- Возможность исследования интерференции волн, рассеянных объектом в разных направлениях в пределах телесного угла, который охватывает голограмма;
- Возможность получать картину интерференции световых волн различной частоты.

К недостаткам голографической интерферометрии следует отнести значительную длительность экспозиции за счет низкой чувствительности высокоразрешающих сред для регистрации голограмм, а также высокие требования к используемым источникам излучения (пространственная и временная когерентность, мощность излучения и т.д.)

Голографическая схема – оптическая часть установки для регистрации голограмм. Обычно представляет собой интерферометрическую схему, в одно из плеч которой помещается объект. Голографическая схема включает в себя делитель лазерного излучения и оптические элементы для формирования объектной и опорной волн, изменения их направления и т.д. Делитель излучения осуществляет деление светового потока либо по амплитуде (например, полупрозрачные зеркала, светоделительные кубики и т.д.), либо по волновому фронту. Стабильность положения оптических

элементов и регистрирующей среды, а также параметров окружающей их среды в голографическая схема во время регистрации голограммы обеспечивается дополнительными защитными средствами, входящими в состав голографической установки. При использовании импульсных источников излучения требования к стабильности элементов голографической схемы значительно снижаются. Основные голографические схемы, используемые для регистрации голограмм, названы по имени авторов: схема Габора, Денисюка и т.д., либо по специфическим особенностям геометрии оптической схемы: осевая схема, схема Фурье и т.д. Голографическая схема обычно предназначена для регистрации голограмм определенного типа и предусматривает соответствующую оптическую схему для восстановления объектной волны или ее преобразования.

Голографическая установка – установка, основным назначением которой является обеспечение процесса регистрации голограмм: представляет собой комплекс различных (оптических, механических, пневматических и т.д.) устройств и элементов для создания интерференционной картины и обеспечения ее стабильности относительно регистрирующей среды в процессе записи голограммы.

Голография – раздел физики, изучающий процессы преобразования волн (волновых полей) интерференционными структурами, формируемыми когерентными волнами при их взаимодействии в веществе. Основой голографии является наиболее общий метод записи и восстановления произвольного волнового поля, который состоит в том, что запись осуществляется путем регистрации в светочувствительной среде результата когерентного сложения (интерференции) исходного волнового поля с другой (опорной) волной, а восстановление (воспроизведение, преобразование) – вследствие дифракции излучения на зарегистрированной интерференционной структуре. Голографический метод применим к волнам любой природы, но наибольшее развитие получила оптическая голография (оптический диапазон электромагнитного излучения). Слово “голография” составлено из двух греческих слов “ὅλος” – “весь” и “γραφή” – “запись” и означает “полная запись”. В настоящее время теоретически и экспериментально доказана возможность записи и восстановления амплитуды, фазы, спектрального состава и состояния поляризации волн, а также изменения этих параметров во времени.

Примечание [A4]: ὅλος +
γραφή
(в конце слов пишется ζ, а не σ)

Голография цифровая – практическая реализация голографического метода записи и воспроизведения информации, осуществляемая не в

физическом эксперименте, а с помощью моделирования указанных процессов численными методами с использованием вычислительной техники.

Делимость голограммы – одно из основных свойств голограммы, обусловленное спецификой голографического метода записи информации, заключающееся в том, что восстановление объектной волны возможно каждым отдельным, сколь угодно малым, участком голограммы при условии, что при записи голограммы каждая точка объекта освещает всю поверхность регистрирующей среды. При наблюдении изображения объекта с помощью восстановленной волны голограмма для наблюдателя является своего рода "окном" в мир объекта – при уменьшении "окна" усложняются и ухудшаются условия наблюдения: например, предмет интерьера в комнате можно наблюдать через окно и через замочную скважину – условия разные, но иллюзия действительности сохраняется.

Денисюка голограмма – отражательная трехмерная голограмма, впервые получена по однолучевой схеме Ю.Н. Денисюком в 1962 г. При регистрации голограммы Денисюка, излучение когерентного источника (1) формируется линзой или оптической системой (2) и падает на прозрачную регистрирующую среду (РС), являясь опорной волной, затем проходит через регистрирующую среду и отражается (рассеивается) объектом, создавая объектную волну. Таким образом, объектная и опорная волны распространяются навстречу друг другу. При встречном направлении интерферирующих волн пространственная частота голограммы достигает максимально возможной для излучения данной длины волны величины и имеет порядок $2n/\lambda$, поэтому голограммы Денисюка проявляют объемные свойства даже при использовании сравнительно тонкослойных регистрирующих сред (фотоматериалы толщиной менее 20 мкм). Спектральная селективность голограммы при этом составляет величину 10-20 нм, что позволяет наблюдать качественное изображение объекта при освещении голограммы Денисюка источником излучения со сплошным спектром. Для получения голограммы Денисюка используют прозрачные регистрирующие материалы с высоким разрешением (порядка 5000 мм^{-1}) и методы постэкспозиционной обработки, пригодные для получения фазовых либо амплитудно-фазовых голограмм. Голограммы Денисюка широко используются для получения изобразительных голограмм и голограммных оптических элементов. Голограмма Денисюка, впервые полученная автором в 1962 г. на липпмановских прозрачных галогенидосеребряных фотоматериалах с использованием в качестве источника излучения ртутной лампы, явилась экспериментальным обоснованием метода

Примечание [A5]: если
лямбда – длина волны в воздухе

Денисюка – записи в трехмерной среде голограмм, способных восстанавливать амплитуду, фазу и спектральный состав объектной волны.

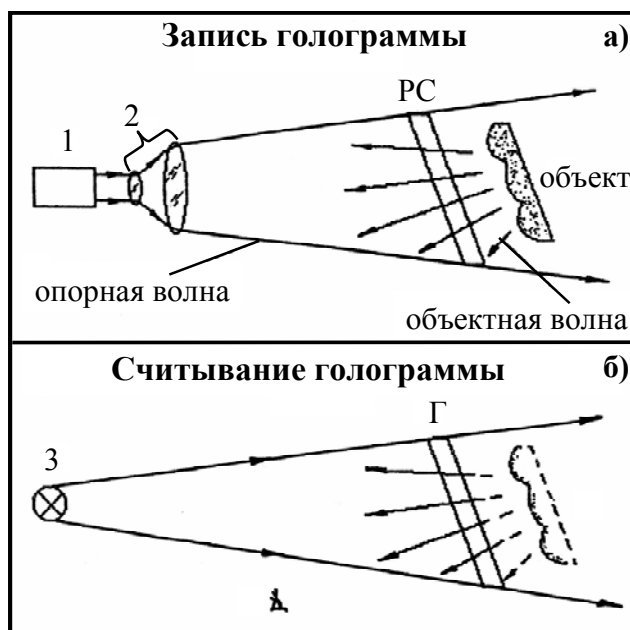


Рис.6.Схема записи (а) и считывания (б) голограммы Денисюка, 1 – лазер, 2 – оптическая система, 3 – лампа накаливания. РС – регистрирующая среда, Г – голограмма.

Динамический диапазон воспроизведения градации яркости объекта – характеризует способность устройства, формирующего изображение объекта, правильно передать в изображении градации яркости объекта. Из всех световых величин именно яркость объекта непосредственно связана со зрительными ощущениями, так как освещенности изображений объектов, формируемых на сетчатке глаза, пропорциональны яркости этих объектов.

Соотношение наиболее ярких и наименее ярких деталей, которое характеризует каждый объект, не могут правильно передать методы получения изображений, обладающие ограниченным диапазоном воспроизведения градации яркости объекта. Например, при использовании фотографического процесса на фотоснимках соотношение наиболее ярких и наименее ярких деталей, как правило, не превышает 1000:1. Это позволяет правильно передать градации яркости в изображении, например, человеческого лица, но игра бликов будет утеряна и распределение яркости фотографического изображения оказывается искаженным по сравнению с оригиналом, особенно это

заметно при изготовлении фотоснимков водной поверхности или ювелирных изделий (яркость блика ювелирного изделия, как правило, на 5-7 порядков выше яркости поверхности, например, бархата, на которой изделие находится).

В отличие от фотопроцесса и других изобразительных технологий существенным свойством голографического изображения (изображения, формируемого волной, восстановленной голограммой) является способность правильно передавать детали, яркость которых в тысячи раз превышает среднюю яркость объекта (например, блики на поверхности объекта): при записи голограммы излучение каждой детали объекта освещает всю площадь голограммы, поэтому даже очень яркой детали соответствует относительно малая модуляция освещенности (ΔE) вокруг некоторого среднего значения освещенности E_0 . Такая модуляция не превышает упомянутого выше ограничительного соотношения 1:1000, и соответствие между яркостью объекта и откликом материала сохраняется в очень широких пределах. При считывании голограммы каждая деталь изображения формируется излучением, собранным со всей площади голограммы. В результате при относительно низком уровне модуляции записи световой поток, направляемый в изображение этой детали, может быть достаточно большим. Диапазон яркостей восстановленного с помощью голограммы изображения существенно превышает возможности традиционно используемых методов получения изображений и близок к возможностям зрительного аппарата человека.

Дифракционная эффективность определяется обычно как отношение потока излучения в дифрагированной волне данного порядка дифракции $(P_d)_n$ к падающему на голограмму потоку излучения $(P_{\text{пад}})$. 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. Следует учитывать, что при использовании различных вариантов определения, значения дифракционной эффективности одной и той же голограммы могут существенно различаться между собой.

Диффузное отражение (в отличие от зеркального отражения) – рассеивание света отражающей поверхностью по всем возможным направлениям. При этом индикатриса рассеяния описывается законом Ламберта, а яркость отражающей поверхности одинакова во всех направлениях, независимо от направления излучения, падающего на поверхность.

Диффузное пропускание (в отличие от пропускания без нарушения геометрии пучка излучения) – пропускание, которое сопровождается рассеянием света, вплоть до полного отсутствия регулярного (направленного) пропускания.

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

Диффузор (диффузный рассеиватель) – оптический элемент (например, матовый экран), обеспечивающий диффузное пропускание или диффузное отражение падающего излучения независимо от его направления (или в соответствии с индикатрисой рассеяния данного элемента, например, направленный диффузор).

Изображение действительное – изображение (оптическое), которое создается сходящимися пучками лучей в точках их пересечения. Если в плоскости пересечения лучей поместить экран (или регистрирующую среду), то можно на нем наблюдать действительное изображение. Действительное изображение объекта, формируемое восстановленной голограммой объектной волной, является псевдоскопическим.

Изображение мнимое – изображение (оптическое), формируемое лучами, которые при выходе из оптической системы расходятся, но их можно мысленно продолжить в противоположную сторону и они соберутся в точках пересечения. Совокупность таких точек называют мнимым изображением, так как оно способно играть роль объекта по отношению к другой оптической системе (например, глазу), преобразующей его в действительное изображение. Мнимое изображение объекта, формируемое с помощью объектной волны восстановленной голограммой, является ортоскопическим.

Изображение ортоскопическое (оптическое) – изображение, сформированное оптической системой, в котором распределение разности фаз на поверхности изображения объекта соответствует

распределению разности фаз на поверхности объекта. Наблюдатель при этом видит изображение, соответствующее объекту.

Изображение псевдоскопическое (оптическое) – изображение, сформированное оптической системой, в котором распределение разности фаз на поверхности изображения объекта соответствует по абсолютной величине распределению разности фаз на поверхности объекта, но имеет отрицательный знак по отношению к последнему. Наблюдатель при этом видит изображение объекта, в котором, например, вместо выпуклостей – вогнутости, и наоборот. Псевдоскопическое изображение можно наблюдать в голографическом эксперименте при обращении хода лучей через голограмму (явление обращения волнового фронта) и при наблюдении действительного изображения объекта, сформированного восстановленной голограммой объектной волной.

Изобразительная голография – раздел голографии, включающий вопросы, связанные с применением голографического метода и технических средств голографии для изобразительных целей. Голограммы, используемые для зрительного (визуального) эстетического восприятия (наблюдения) изображений, получили название изобразительных голограмм. Широкое распространение получили изобразительные голограммы объектов, представляющих собой художественную ценность, – музейных и коллекционных экспонатов, ювелирных изделий и т.д. Размеры голографируемых объектов определяются их параметрами, структурой и техническими возможностями голографии – мощностью источников излучения, чувствительностью регистрирующей среды, потерями излучения в голографической схеме, допустимой длительностью экспонирования. В настоящее время получены изобразительные голограммы высокого качества размером порядка нескольких квадратных метров. Наблюдение изображений в изобразительной голографии, как правило, не требует специальных монохроматических источников излучения – освещение изобразительных голограмм может производиться источниками излучения со сплошным спектром (стандартные лампы накаливания, Солнце). Изобразительные голограммы получают по методу Денисюка, по методу Бентона (радужные голограммы), а также на основе синтеза композиционных голограмм. В качестве регистрирующей среды используют высокоразрешающие галогенидосеребряные фотографические материалы, фотоматериалы на основе бихромированной желатины, фотополимерные композиции. Голографический метод дает принципиальную возможность получить изображение объекта, неотличимое от оригинала при наблюдении в дифрагированном пучке в

пределах размера голограммы. Голографическое изображение воспроизводит не только пространственную форму объекта, но и правильно передает диапазон градации яркости на его поверхности, что позволяет наблюдать игру бликов на объекте при его оглядывании – эффект, недостижимый другими методами получения изображений. Изобразительная голография – раздел голографии, тесно соприкасающийся с изобразительным искусством. На основе изобразительной голографии появилась возможность создания новых методов в изобразительной технике, обеспечивающих полную иллюзию действительности изображаемой сцены или объекта, а также возможность создания технологий синтеза трехмерных образов и композиций.

Изобразительная голограмма – голограмма, используемая для зрительного (визуального) эстетического восприятия (наблюдения) изображения объекта.

Индикатриса рассеяния – кривая, графически отображающая зависимость интенсивности рассеянного света от направления наблюдения.

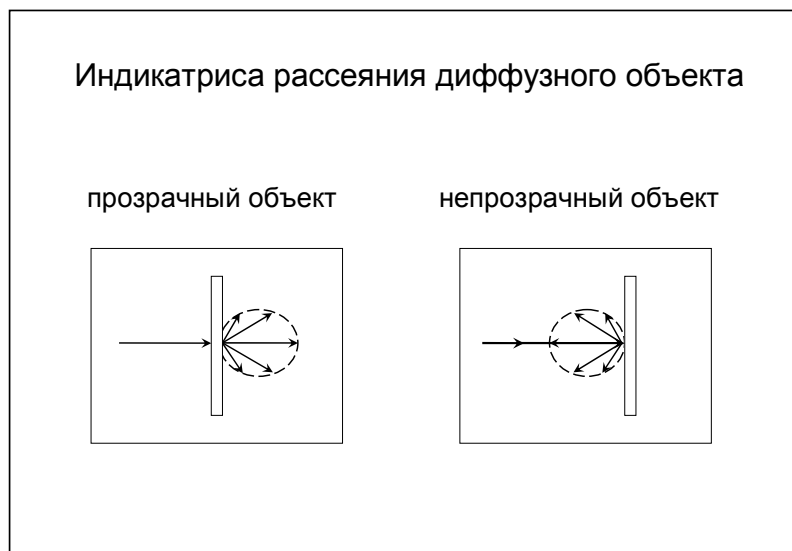


Рис.7. Индикатриса рассеяния (пунктир) диффузных объектов - прозрачного и непрозрачного.

Лейта и Упатниекса голограмма – пропускающая внеосевая голограмма обеспечивающая, в отличие от схемы Габора, пространственное разделение восстановленной (дифрагированной) волны и волны, прошедшей через голограмму без дифракции. Предложена Лейтом и Упатниексом (Emmeth N. Leith, Juris Upatnieks) в 1964 г. На рисунке 7

приведена типичная схема регистрации такой голограммы (а) и восстановления объектной волны (б).

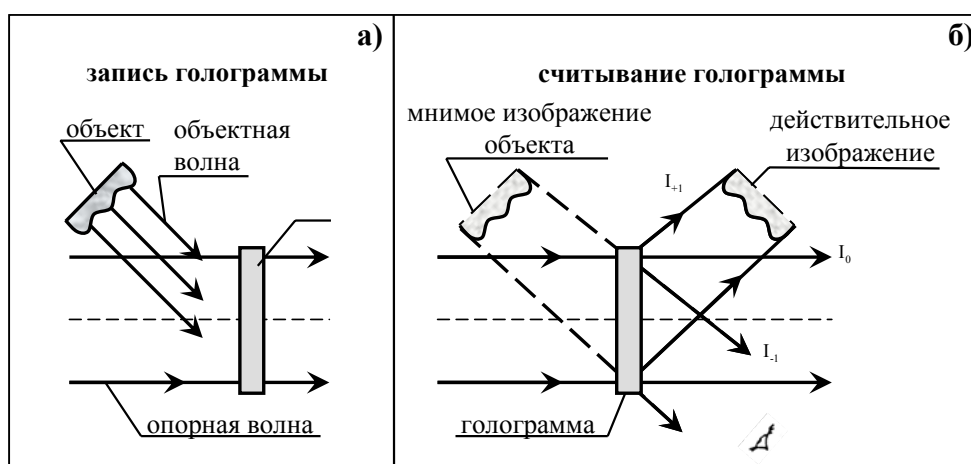


Рис.7.Схема записи (а) и считывания (б) голограммы Лейта и Упатниекса. РС – регистрирующая среда; I_0 , I_{+1} , I_{-1} – волны соответствующих порядков дифракции.

Мира (тест-объект) – оптический элемент, предназначенный для определения характеристик качества изображения при исследовании оптических систем и светочувствительных материалов. Обычно представляет собой пластинку из прозрачного или непрозрачного материала, на которую нанесен геометрический рисунок. Элементами рисунка служат чередующиеся темные прямоугольные штрихи на светлом фоне с закономерно изменяющейся частотой (штриховые миры) или чередующиеся темные и светлые сектора (радиальные миры). Каждый из элементов штриховой миры состоит из четырех квадратов со штрихами одинаковой ширины, но ориентированных различным образом (рис.8), что позволяет оценивать разрешающую способность в четырех направлениях. Радиальные миры выполняют в виде круга, разделенного на темные и светлые сектора с определенным угловым размером.

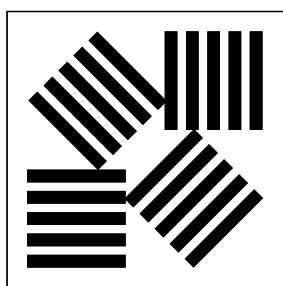


Рис.8. Элемент миры со штрихами одинаковой ширины.

Монохроматическое излучение – электромагнитное излучение одной, строго постоянной частоты. В более широком смысле слова – излучение очень узкой области частот или длин волн, которое может быть охарактеризовано одним значением частоты или длины волны. Происхождение термина связано с тем, что различие в частоте световых волн воспринимается человеком как различие в цвете. Однако, электромагнитные волны видимого диапазона, лежащие в интервале длин волн 380-760 нм, не отличаются от электромагнитных волн других диапазонов (инфракрасного излучения, ультрафиолетового излучения, рентгеновского излучения и др.), по отношению к которым также используется термин "монохроматический" (одноцветный), хотя никакого ощущения цвета эти волны не вызывают. Понятие "монохроматическое излучение" является идеализацией. Так как идеальным монохроматическое излучение не может быть по своей природе, то обычно монохроматическим считается излучение с узким спектральным интервалом, который можно приближенно характеризовать одной частотой (длиной волны). Чрезвычайно высокая монохроматичность характерна для излучения некоторых типов лазеров, у которых ширина спектрального интервала излучения не превышает 10^{-6} нм, что значительно уже, чем ширина линий атомных спектров. Приборы, с помощью которых из спектра реального излучения выделяют узкие спектральные интервалы, называются монохроматорами.

Оптическая длина пути – расстояние между двумя точками прозрачной среды, на которое свет (оптическое излучение) распространился бы в вакууме за то же время, за какое он проходит это расстояние в среде. Оптическая длина пути всегда больше реально проходимого светом расстояния и в изотропной среде с постоянным показателем преломления определяется произведением геометрической длины пути (l) и показателя преломления среды (n) – $l \cdot n$. Данное понятие играет большую роль в оптике, особенно в геометрической оптике и кристаллооптике, позволяя сопоставить пути, проходимые светом в средах, в которых скорости его распространения различны. Оптическая длина пути луча света между двумя произвольными точками пространства предметов и пространства изображений называется эйконалом.

Оптическая разность хода – разность оптических длин путей двух световых лучей, как правило, имеющих общие начальные и конечные точки. Данное понятие играет основную роль при описании явлений интерференции и дифракции излучения.

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

Освещенность (облученность) – Е. Отношение светового потока, падающего на рассматриваемый (малый) участок поверхности, к площади этого участка.

Параллакс – термин, используемый в астрономии для характеристики изменения направления "наблюдатель-объект" при смещении точки наблюдения. Параллакс равен углу, под которым из центра объекта видно расстояние между двумя положениями точки наблюдения. Если смещение точки наблюдения равно нулю, параллакс отсутствует. В оптике термин используется для характеристики угла, под которым объект (точка объекта) виден правым и левым глазом. Различают горизонтальный параллакс, обусловленный расстоянием между зрачками (узловыми точками глаз), и вертикальный параллакс, как правило, равный нулю.

Восприятие объектов двумя глазами (бинокулярность зрения) играет существенную роль в процессе создания человеком образа объекта с помощью зрительного аппарата. Благодаря зрению двумя глазами мы имеем возможность оценивать расстояние от объекта (точки объекта) до глаза. Эта оценка производится произвольно по углу поворота глаз. При рассматривании объекта S, лежащего на конечном расстоянии l, глаза несколько поворачиваются, так что линии прямого зрения O_1S и O_2S составляют угол ϵ , который называется углом параллакса (рис.9) и связан с расстоянием до объекта l соотношением $l = b/\epsilon$, где b – расстояние между узловыми точками обоих глаз.

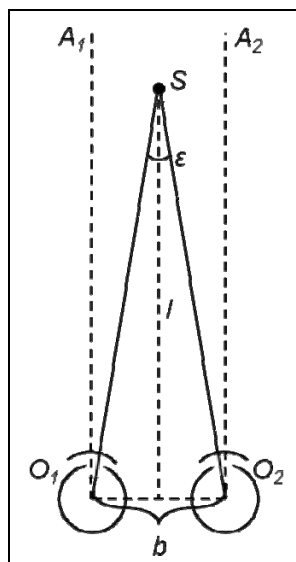


Рис.9.Зрение двумя глазами: O_1 и O_2 – узловые точки левого и правого глаза; b – расстояние между узловыми точками глаз; S – рассматриваемая точка объекта; l – расстояние от S до b ; O_1S и O_2S – линии прямого зрения; ε – угол параллакса.

Зрение двумя глазами, позволяющее по углу параллакса оценить расстояние до объекта, носит название стереоскопического зрения, которое сказывается для углов параллакса, превышающих приблизительно 1 угловую минуту, что соответствует расстоянию до объекта ≈ 200 м. О расстоянии до более далеких предметов мы судим по ряду косвенных признаков, по количеству различаемых деталей и т.д.

Принцип дисперсионной рефракции – способ формирования структуры голограммы путем изменения показателя преломления («рефракции») светочувствительного материала в результате воздействия регистрирующего излучения. Суть принципа заключается в том, что в светочувствительной среде, имеющей полосу поглощения в видимой области спектра, при воздействии регистрирующего излучения инициируются химические реакции, приводящие к сдвигу полосы поглощения в более коротковолновую (ближний ультрафиолет) область спектра за счет образования фотопродукта, с соответствующей полосой поглощения. Таким образом, происходит "фотохимическое отбеливание" материала в видимой области спектра и появление полосы поглощения в ближнем ультрафиолете, что в соответствии с фундаментальными соотношениями Крамерса-Кронига приводит к изменению показателя преломления в видимой области. Принцип предложен сотрудниками Государственного Оптического Института им. С.И. Вавилова

(В.И. Суханов и Г.И. Лашков, 1978 г.) для разработки принципиально новых регистрирующих сред для объемной голографии – фотохромных материалов с фотохимическим отбеливанием, и впервые применен авторами при создании полимерного светочувствительного материала "Реоксан".

Пространственная частота голограммы (ν) – величина, обратно пропорциональная пространственному периоду изменения оптических параметров голограммы. Для элементарной голограммы, полученной при взаимодействии двух плоских волн, $\nu = 1/d$, где d – расстояние между двумя смежными (соседними) максимумами интенсивности в регистрируемой интерференционной картине. Пространственная частота измеряется обычно в мм^{-1} , либо см^{-1} . Любую голограмму можно представить как результат наложения элементарных голограмм, ориентированных произвольно, и характеризовать набором (спектром) пространственных частот. Обычно выделяют среднюю ($\nu = 1/d$), минимальную ($\nu_{\min} = 1/d_{\max}$) и максимальную ($\nu_{\max} = 1/d_{\min}$) пространственную частоту голограммы, последняя определяет разрешающую способность регистрирующей среды, необходимую для записи всех пространственных частот голограммы. Наименьшей пространственной частотой обладают осевые голограммы, полученные, например, по схеме Габора. В схеме Денисюка ν максимальна и близка к $2/\lambda$.

Пространственная частота излучения – характеристика, определяющая направление распространения излучения в пространстве в какой-либо момент времени. Плоская монохроматическая волна 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.10).

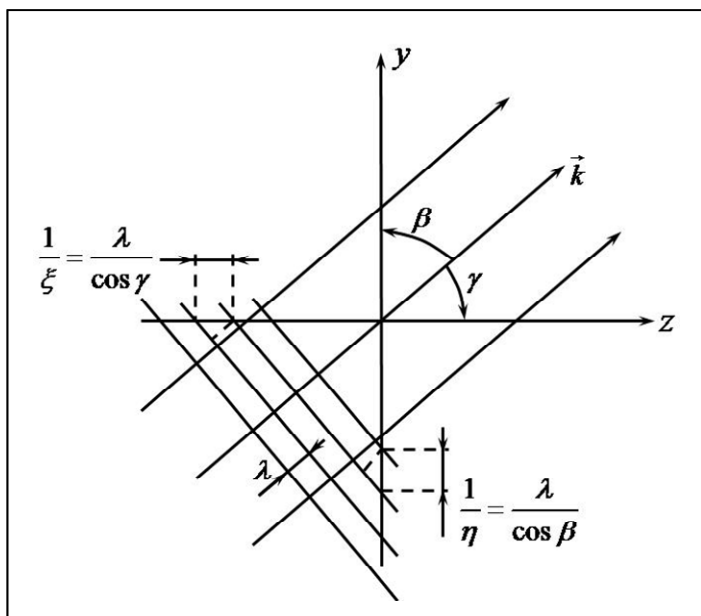


Рис.10. Распространение плоской монохроматической волны с волновым вектором $\mathbf{k}$ в плоскости y, z .

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 Z , то пространственная частота плоской монохроматической волны с волновым вектором $\mathbf{k}$ (рис.10) относительно оптической оси будет составлять величину:

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

Следует отметить, что пространственная частота представляет собой аналог временной частоты при задании физической величины в виде функции не времени, а координаты. Временная частота f_s характеризует изменение функции по времени с периодом $T = 1/f_s$ [с], где $f_s = 1/T$ [с⁻¹]. (Традиционно термин «частота» используется при обозначении именно временной частоты.) Пространственная частота f_n характеризует изменение функции по координате с периодом $T = 1/f_n$ [м], где $f_n = 1/T$ [м⁻¹].

Регистрация голограммы (запись голограммы) – процесс физического взаимодействия излучения с регистрирующей средой, в результате которого пространственное распределение интенсивности в регистрируемой интерференционной картине преобразуется в соответствующее распределение каких-либо параметров среды. Для регистрации голограммы необходимы: источник излучения;

голографическая схема; регистрирующая среда, разрешающая способность которой должна обеспечить запись максимальной пространственной частоты голограммы, и голографическая установка, обеспечивающая стабильность элементов голографической схемы и регистрирующей среды при регистрации голограммы.

Регистрация голограммы в линейном режиме – обеспечивается в случае, когда амплитуда голограммы (точнее, амплитуда модуляции оптического параметра 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.

Регистрирующая среда динамическая – инициированные световым воздействием изменения параметров регистрирующей среды происходят непосредственно в процессе записи информации (под воздействием излучения). Различают: регистрирующая среда динамическая с нелокальным откликом (фоторефрактивная) – пространственное распределение фотоиндуцированного показателя преломления при записи синусоидальной интерференционной картины сдвинуто по фазе по отношению к распределению интенсивности в регистрируемой интерференционной картине; регистрирующая среда динамическая с локальным откликом (фоторефрактивная) – пространственное распределение фотоиндуцированного показателя преломления при записи синусоидальной интерференционной картины синфазно или противофазно распределению интенсивности в регистрируемой интерференционной картине.

Регистрирующая среда реверсивная – изменения параметров регистрирующей среды, происходящие под воздействием излучения, носят обратимый характер.

Регистрирующая среда со скрытым изображением – изменения параметров регистрирующей среды, происходящие под воздействием излучения непосредственно в процессе записи информации (воздействия излучения), являются незначительными и проявляются в результате дополнительной обработки среды после экспонирования (в процессе постэкспозиционной обработки). Регистрирующие среды со скрытым изображением обладают, как правило, значительно более высокой чувствительностью, так как при постэкспозиционной обработке скрытое изображение многократно усиливается.

Примечание [А6]: несогласование. – регистрирующая среда, в которой...

Регистрирующие среды для голографии – светочувствительные материалы, предназначенные в первую очередь для целей голографии, в которых регистрируемая интерференционная картина инициирует возникновение соответствующей пространственной модуляции по крайней мере одного из параметров среды: коэффициента поглощения α ; показателя преломления n ; или толщины материала T . Регистрирующие среды для голографии имеют специфические особенности, которые следует учитывать при их применении и разработке. Кроме основных сенситометрических характеристик (чувствительность, спектральная чувствительность и т.п.) для голографических регистрирующих сред большое значение имеют параметры, определяющие возможность регистрации голограмм определенного типа.

- Разрешение материала – определяет возможность использования данного материала в определенной голографической схеме.
- Толщина материала – одна из важнейших характеристик голографических регистрирующих сред: соотношение между периодом голограммы и ее толщиной определяет тип голограммы (двумерная или трехмерная) и ряд важнейших характеристик, таких как: селективность, количество порядков дифракции, и т.д.
- Фотоотклик материала на световое воздействие определяет тип голограммы: амплитудная, фазовая, рельефно-фазовая; а также характер изменения оптического параметра – обратимый или необратимый (соответственно, регистрирующие среды могут быть реверсивными и нереверсивными, а зарегистрированные голограммы – динамическими или статическими).

Практическая реализация многочисленных приложений голографии и развитие голографии как науки невозможно без существования и совершенствования регистрирующих сред для голографии. На первых этапах развития голографии усилия были сосредоточены на поиске путей повышения разрешающей способности и совершенствования методов химико-фотографической обработки традиционных (в основном галогенидосеребряных) светочувствительных материалов. В настоящее время успешно осуществлены разработки новых типов сред, предназначенных для целей голографии.

Реконструкция голограммы – употребление этого термина подразумевает реконструкцию не самой голограммы, а объектной волны, использованной при ее регистрации, поэтому в настоящее время наряду с термином "Реконструкция голограммы" все более широкое распространение получает термин "Считывание голограммы".

Свет (видимое излучение) – электромагнитное излучение, которое может непосредственно вызывать зрительное ощущение человека. Границы спектральной области видимого излучения условны и могут выбираться различными для разных применений. Нижняя граница обычно считается лежащей между 380 и 400 нм, верхняя – между 760 и 780 нм. Видимое излучение содержит следующие основные составляющие с длинами волн: красную 760-620 нм, оранжевую 620-590 нм, желтую 590-560 нм, зеленую 560-500 нм, голубую 500-480 нм, синюю 480-450 нм и фиолетовую 450-400 нм. Более широкое толкование термина «свет» означает, что речь идет об оптическом излучении, которое включает ультрафиолетовое и инфракрасное излучения, хотя непосредственно глазом они не воспринимаются.

Решением Генеральной ассамблеи Международного комитета по численным данным для науки и техники (1973 г.) скорость света в вакууме принято считать равной 299 792 458 (12) м/с.

Светофильтр – устройство, меняющее спектральный состав оптического излучения с целью выделения его отдельных спектральных участков или согласования спектральных зависимостей излучения со спектральной зависимостью чувствительности приемников излучения. Действие светофильтров основано на использовании таких физических явлений как избирательное спектральное поглощение (абсорбционные светофильтры), избирательное отражение (отражательные светофильтры), интерференция (интерференционные светофильтры), поляризация (поляризационные светофильтры), дисперсия (дисперсионные светофильтры). Нейтральные светофильтры равномерно ослабляют световой поток в относительно широкой области спектра. Основная характеристика светофильтра – кривая относительного пропускания, или иначе, зависимость коэффициента пропускания τ (или оптической плотности $D = -\lg \tau$) от длины световой волны.

Селективность голограммы – 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. Количественно селективность можно оценить только для элементарной голограммы, дифракция на которой подчиняется

условию Брэгга. Максимум интенсивности волны, дифрагированной на объемной элементарной голограмме, 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.11). Спектральная селективность голограммы ($\Delta\lambda$) количественно определяется как интервал длин волн (частот), в котором интенсивность дифрагированной волны превосходит половину ее максимального значения (при этом голограмма должна освещаться плоской полихроматической волной). Аналогично угловая селективность голограммы ($\Delta\theta$) количественно определяется интервалом углов падения плоской монохроматической восстанавливающей волны на голограмму, в пределах которого интенсивность дифрагированной волны превышает половину ее максимального значения. Селективность зависит от параметров голограммы, важнейшими из которых являются пространственная частота голограммы (ν) и ее толщина (T). Изменение $\Delta\theta$ и $\Delta\lambda$ происходит пропорционально $1/T$, в то время как зависимость от ν носит более сложный характер и определяется типом голограммы. Неравномерность распределения по глубине голограммы периода и амплитуды модуляции оптических параметров приводит к снижению селективности голограммы.

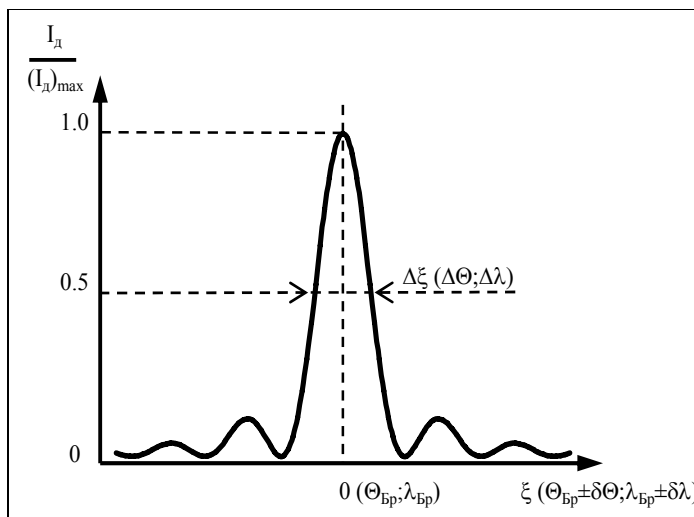


Рис.11.Контур селективности голограммы.

Считывание голограммы – процесс освещения голограммы, сопровождающийся дифракцией излучения на ее структуре и приводящий к образованию дифрагированной волны, характеристики которой определяются параметрами голограммы и условиями ее освещения. При совпадении параметров освещающей голограмму (восстанавливающей)

волны и опорной волны, использованной при записи голограммы, дифрагированная (восстановленная) волна может воспроизводить характеристики объектной волны (амплитуду, фазу, спектральный состав, состояние поляризации, а также их временные зависимости). В противном случае дифрагированная волна будет отличаться от объектной волны. Характер этих отличий зависит от типа голограммы: в случае двумерных голограмм происходит изменение масштаба и положения в пространстве изображения объекта, сформированного дифрагированной волной; для трехмерных голограмм характерно, прежде всего, уменьшение интенсивности дифрагированной волны вплоть до ее исчезновения. При использовании восстанавливающей волны, сопряженной по отношению к опорной волне, дифрагированная волна является обращенной по отношению к объектной, независимо от типа голограммы. Как правило, процесс считывания голограммы предъявляет менее жесткие требования к стабильности установки и используемых элементов схемы, чем процесс регистрации голограммы.

В настоящее время термин "Считывание голограммы" широко используется наряду с термином "Реконструкция голограммы" для описания процессов реконструкции (восстановления), преобразования, воспроизведения объектной волны при освещении голограммы.

Условие Брэгга (условие Вульфа-Брэгга) определяет условие получения максимальной интенсивности дифрагированной волны при взаимодействии плоской монохроматической волны с одномерной решеткой, полученной 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 (W.L. Bragg), одновременно и независимо получивших это выражение в 1913 г. 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 уменьшается. Выражение "внебрэгговская реконструкция голограммы" означает, что интенсивность дифрагированной волны мала или близка к нулю.

Фоторефрактивные регистрирующие среды – светочувствительные среды (или светочувствительные материалы), в которых распределение интенсивности излучения в регистрируемом световом поле преобразуется в распределение изменения показателя преломления среды.

Френеля голограмма – пропускающая голограмма, при регистрации которой регистрирующая среда находится в области дифракции Френеля рассеянного объектом излучения. Чаще всего голограмма Френеля используется при записи голограмм трехмерных диффузно рассеивающих объектов в изобразительной голографии и при голографическом неразрушающем контроле изделий.

Функция передачи контраста (частотно-контрастная характеристика; функция передачи амплитуды) – характеристика регистрирующей среды, в том числе голографической, определяющая зависимость амплитуды записанной в регистрирующей среде синусоидальной структуры (решетки, элементарной голограммы-решетки) от пространственной частоты этой структуры. При оценке разрешающей способности регистрирующей среды используется также зависимость дифракционной эффективности голограммы-решетки от ее пространственной частоты. При этом критерием может быть значение пространственной частоты, при которой происходит спад дифракционной эффективности в 2 раза по сравнению с ее максимальным значением при определенной пространственной частоте (как правило, равной нулю).

Фурье голограмма – пропускающая голограмма, полученная в результате взаимодействия двух когерентных волн, комплексные амплитуды которых в плоскости регистрирующей среды являются фурье-образами объекта и источника излучения, формирующего опорную волну. В настоящее время термин "**фурье-голограмма**", или "**голограмма Фурье**" применяют и в тех случаях, когда распределение амплитуд объектной волны в плоскости регистрирующей среды соответствует произведению фурье-образа объекта на медленно меняющийся фазовый множитель. При этом опорный источник и объект должны располагаться строго в одной плоскости, перпендикулярной оси системы. Регистрация голограммы Фурье возможна без использования оптических систем – безлинзовая голограмма Фурье. Голограммы Фурье применяются в качестве пространственных фильтров для распознавания образов. Для записи голограммы Фурье используются двумерные (плоские) объекты (например, транспаранты), позволяющие производить строгое преобразование Фурье.

Примечание [A7]: голограмма Фурье?

Экспозиция (количество освещения, энергетическая экспозиция, H) – поверхностная плотность световой энергии: отношение световой энергии, падающей на элемент поверхности dA к площади этого элемента; иначе: произведение энергетической освещенности (облученности, E) на длительность облучения (t) $H = E \cdot t$. Экспозиция измеряется в лк·с; в системе энергетических единиц – в Вт·с/м²; Дж/м² (а также мДж/м²; мДж/см²).

Понятие "Экспозиция" удобно применять, если результат воздействия излучения накапливается во времени, например, в фотографии, в голографии при регистрации голограмм.

Яркость (L) – поверхностно-пространственная плотность светового потока, исходящего от поверхности; равна отношению светового потока $d\Phi$ к геометрическому фактору $d\Omega \cdot dA \cdot \cos\theta$:

$$L = d\Phi / (d\Omega \cdot dA \cdot \cos\theta),$$

где $d\Omega$ – заполненный излучением телесный угол; dA – площадь участка, испускающего излучение; θ – угол между перпендикуляром к этому участку и направлением излучения. Яркость измеряется в кд·м⁻²; в системе энергетических фотометрических величин яркость (энергетическая) измеряется в Вт·ср⁻¹·м⁻².

Из всех световых величин яркость наиболее непосредственно связана со зрительными ощущениями, так как освещенности изображений предметов, формируемых на сетчатке глаза, пропорциональны яркости этих предметов.

О кафедре

Кафедра фотоники и оптоинформатики создана в 2002 году и работает под руководством лауреата премии Ленинского комсомола по науке и технике профессора С.А.Козлова. Одной из важнейших задач кафедры является организация учебного процесса и подготовка специалистов по оптоинформатике – стремительно развивающейся новой области науки и техники, в которой разрабатываются оптические технологии сверхбыстрой передачи, обработки и записи информации, создаются быстродействующие оптические компьютеры и системы искусственного интеллекта. Разработка таких оптических информационно-телекоммуникационных технологий, представляющих собой информационные технологии нового поколения, является приоритетным направлением развития российской науки, техники и технологий.

В рамках образовательного направления 200600 студентам читаются лекционные курсы по оптической физике, теории информации и кодирования, архитектуре вычислительных систем, технологии программирования, цифровым оптическим вычислениям, оптическим технологиям искусственного интеллекта, голографическим системам записи и отображения информации, другим актуальным проблемам оптоинформатики, а также по квантовой информатике. Эти лекционные курсы поддержаны эксклюзивными учебно-исследовательскими экспериментальными практикумами.

Научные подразделения кафедры:

- Проблемная лаборатория волновых процессов, основная задача которой – организация научного руководства студентами и аспирантами молодежной научной ассоциации «Оптика-XXI век», руководитель: д.ф.м.н., проф.С.А.Козлов.
- Научно-образовательный центр фемтосекундной оптики и фемтотехнологий – руководитель: д.ф.м.н., проф.В.Г.Беспалов.
- Лаборатория параллельных вычислений, нанофотоники и оптоинформатики – руководитель: д.ф.м.н., проф.Н.Н.Розанов.
- Лаборатория квантовой информатики – руководитель: к.ф.м.н., доцент С.А.Чивилихин.
- Лаборатория прикладной голографии – руководитель: к.ф.м.н., доцент О.В.Андреева

На кафедре сформирована признанная научно-педагогическая школа по фемтосекундной оптике и фемтотехнологиям – руководители: д.ф.м.н., проф. С.А.Козлов и д.ф.м.н., проф. В.Г.Беспалов.

Среди студентов и аспирантов кафедры – стипендиаты Президента и Правительства Российской Федерации, победители конкурсов научных работ, проводимых Российской Академией наук, крупнейшими мировыми научными обществами, такими как INTAS (Фонд научно-исследовательских работ Европейского сообщества), SPIE (Международное общество инженеров-оптиков), CRDF (Американский фонд гражданских исследований и развития), OSA (Оптическое общество Америки).

Кафедра фотоники и оптоинформатики постоянно занимает призовые места по итогам конкурсов ведущих научно-педагогических коллективов Университета ИТМО.

Учебное пособие
ПРИКЛАДНАЯ ГОЛОГРАФИЯ.
Методические материалы к экспериментальному практикуму

Авторы: Ольга Владимировна Андреева
Александр Александрович Парамонов
Наталья Владимировна Андреева

В авторской редакции	
Компьютерная верстка	А.А.Кулешов
Дизайн	А.А.Кулешов
Зав. РИО	Н.Ф.Гусарова

Подписано к печати	30.09.2008	
Отпечатано на ризографе	Заказ № 1231.	Тираж 100

Редакционно-издательский отдел
Санкт-Петербургского государственного
университета информационных
технологий, механики и оптики
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

