

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

ПРИКЛАДНАЯ ГОЛОГРАФИЯ

Учебное пособие



Санкт-Петербург

2008

УДК 778.38

Андреева О.В. ПРИКЛАДНАЯ ГОЛОГРАФИЯ. Учебное пособие. – СПб: СПбГУИТМО, 2008. – 184 с.

В пособии представлены материалы лекционного курса по дисциплине «Прикладная голография», необходимые для подготовки по всем разделам данной дисциплины.

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., 2008

Содержание

Предисловие	4
Часть 1. Основные понятия	
1. Голография как раздел физики. Основные этапы становления голографии. Д. Габор – изобретатель голографии. Ю.Н. Денисюк – основоположник объемной голографии	6
2. Голограмма как носитель информации: интерференционная картина и регистрирующая среда. Элементарная голограмма и зонная пластинка	15
3. Получение изображений объекта при использовании восстановленной объектной волны. Основные характеристики объектов для голографирования и изображений объекта, полученных с помощью голограммы ...	32
Часть 2. Голографические схемы, типы голограмм и их свойства	
4. Типы голографических схем и их практическая реализация. Особенности полученных голограмм	41
5. Типы голограмм по характеру фотоотклика регистрирующей среды ...	61
6. Основные свойства голограмм	72
Часть 3. Анализ свойств голограмм	
7. Классификация голограмм. Теоретический анализ трехмерных голограмм. Основные положения теории связанных волн ...	93
8. Предельные значения основных параметров различных типов голограмм в линейном и нелинейном режимах записи ...	105
Часть 4. Техника голографического эксперимента	
9. Источники излучения для голографии	112
10. Установки для регистрации голограмм	121
11. Регистрирующие среды для голографии	134
Часть 5. Цифровая голография и голографическая интерферометрия	
12. Цифровая голография	152
13. Голографическая интерферометрия и голографический неразрушающий контроль	164
Заключение	177
О кафедре	183

Предисловие

Данное учебно-методическое пособие предназначено для студентов, изучающих дисциплину «Прикладная голография», и может быть рекомендовано в качестве дополнительной литературы по смежным дисциплинам.

Программа дисциплины «Прикладная голография» рассчитана на студентов, которые освоили физические основы голографии при изучении курса общей физики и других дисциплин, связанных с физической и волновой оптикой. Предполагается, что фундаментальные физические явления, лежащие в основе голографического метода записи и воспроизведения информации, уже знакомы читателям, поэтому ни дифракция, ни интерференция излучения детально в данном курсе не рассматриваются.

Курс «Прикладная голография» должен помочь студентам систематизировать знания по разделу «Голография», полученные из разных источников информации. Особое внимание, в соответствии с названием дисциплины, в данном лекционном курсе уделено обсуждению возможности практической реализации рассматриваемых схем, процессов, явлений, в первую очередь тех, которые демонстрируют возможности голографических методов по сравнению с традиционно используемыми.

Данное пособие не является конспектом лекций по дисциплине «Прикладная голография», хотя тематически тесно связано с программой дисциплины: в нем представлен читателю материал, необходимый для освоения данного лекционного курса.

Пособие состоит из пяти глав, разбитых на параграфы. Содержание параграфа, по существу, представляет собой беседу по теме определенной лекции, но не претендует на полноту освещения затрагиваемых вопросов. Для более полного ознакомления с материалом необходимо использовать дополнительную литературу, список которой приводится в конце каждого параграфа.

Глава первая содержит историческое введение (§1); основные понятия, связанные с реализацией голографического метода – формирование интерференционной картины и роль регистрирующей среды при получении голограммы (§2) и получение изображений объекта с помощью голограммы (§3).

Глава вторая содержит описание используемых голографических схем (§4), различных типов голограмм (§5) и основных свойств голограмм (§6).

Глава третья посвящена анализу свойств объемных голограмм (§7) и оценке возможностей различных типов голограмм (§8).

Глава четвертая знакомит читателей с техникой голографического эксперимента и включает следующие разделы: источники излучения для голографии (§9); установки для регистрации голограмм – основные элементы и оптико-механические узлы (§10); регистрирующие среды для голографии (§11).

В главе пятой приведен материал, посвященный цифровой голографии (§12) и голографической интерферометрии (§13).

Значительное количество цитируемого текста, который в пособии выделен курсивом, обусловлено тем, что автор посчитал уместным познакомить читателей с взглядами выдающихся ученых на проблемы голографии «из первых рук». Особое место занимают выдержки из работ Ю.Н. Денисюка, который в последние десятилетия являлся мировым лидером в области голографии, но его работы, цитируемые в пособии, не всегда легко доступны студентам.

В пособии, как правило, использована терминология, принятая в рамках голографической научной школы Ю.Н. Денисюка и поддерживаемая учениками и последователями Ю.Н. Денисюка. Особо значимые термины выделены жирным курсивом в тех местах текста, где дано их толкование.

Автор считает своим приятным долгом выразить благодарность А.Е. Королеву за ценные советы и замечания и А.С. Златову за помощь в подготовке иллюстративного материала.



Часть 1. Основные понятия

§1. Голография как раздел физики. Основные этапы становления голографии. Д. Габор – изобретатель голографии. Ю.Н. Денисюк – основоположник объемной голографии.

Голография в настоящее время, по мнению ведущих специалистов в этой области [1,2], представляет собой раздел физики, в котором изучаются процессы преобразования волновых полей интерференционными структурами, формируемыми когерентными волновыми полями при их взаимодействии в веществе. Основой голографии является наиболее общий метод записи и восстановления произвольного волнового поля, 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 “δλος” - "весь" и “γραφο” - "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 преобразования и изменения этих параметров во времени.

Впервые идею голографии с полной определенностью сформулировал Д. Габор в 1947 году. Он теоретически и экспериментально обосновал возможность записи и последующего восстановления амплитуды и фазы волны при использовании двумерной (плоской) регистрирующей среды. Следующим этапом в развитии голографии явились работы Ю.Н. Денисюка, который в 1962 году показал возможность восстановления голограммой, зарегистрированной в трехмерной среде, не только амплитуды и фазы волны, но также и ее спектрального состава. Эти работы стали фундаментом трехмерной голографии (голографии в объемных средах) и ее приложений. Значительный вклад в развитие практических приложений голографии внесли Э. Лейт и Ю. Упатниекс, которые предложили внеосевую схему записи голограмм и впервые использовали лазер в качестве источника излучения при получении голограмм (1962-1964г.г.). Применение лазеров и разработка высокоразрешающих регистрирующих сред стимулировали расцвет

голографии и ее приложения в таких областях как оптическая обработка информации, оптическое приборостроение, изобразительная техника, интерферометрия, лазерная техника, регистрация быстропротекающих процессов, неразрушающий контроль изделий и другие.

Важными этапами дальнейшего развития голографии явились: доказательство возможности записи и воспроизведения состояния поляризации излучения путем регистрации голограмм в средах с фотоиндуцированной анизотропией (Ш.Д. Какичашвили - 1972-1978 г.г.); обоснование возможности голографической регистрации изменений параметров волнового поля во времени с использованием резонансных сред, сред с выжиганием провалов, а также методов спектрального разложения волновых полей (Е.И. Штырков, В.В. Самарцев - 1975г.; П.М. Саари, А.К. Ребане, Р.К. Каарли – 1986г.; Ю.Т. Мазуренко - 1984г.). Новым перспективным научным направлением, включающим голографию и нелинейную оптику, является динамическая голография (Х. Герритсен – 1967г., Е.И. Ивакин, А.С. Рубанов, Б.И. Степанов – 1970г.). Голография открыла уникальные возможности для разработки принципиально новых методов и технологий, и в настоящее время нет областей оптики, в которых не применялся бы голографический метод, голограммные оптические элементы и устройства.

Основные научно-технические применения голографии относятся к области оптической голографии и тесно связаны с развитием оптики в самом широком ее понимании. Развитие голографии происходило на научном фундаменте оптики и было подготовлено исследованиями большого количества выдающихся ученых, но становление голографии как науки связано с именами исследователей – американского ученого Д. Габора и русского ученого Ю.Н. Денисюка.

Д. Габор – изобретатель голографии



Д. Габор

В 1970 г. Д. Габор, как основатель голографии, получил самую престижную научную награду мира - Нобелевскую премию. Вот что пишет Нобелевский лауреат об истории своего открытия в 1971 г. [3].

«Для ученого нет большей радости, чем быть свидетелем того, как одна из его идей открывает собой новую, стремительно развивающуюся отрасль науки.

23 года назад мне выпало счастье высказать одну такую идею. В тот период я много занимался электронной микроскопией. Волны де Бройля были достаточно короткими для разрешения атомных

решеток, но из-за несовершенства электронных линз разрешающая способность оказывалась ограниченной практически и теоретически. При апертуре, обеспечивающей необходимый дифракционный предел разрешения, можно было получить только размытое изображение. Тем не менее, говорил я себе, если исходить из принципа Гюйгенса, пучок должен содержать всю необходимую информацию. Что мешает нам ее «расшифровать»? Очевидно то, что мы регистрируем на пластинке только половину информации: мы пренебрегаем фазой волны. Нельзя ли выявить ее с помощью интерференции, налагая «когерентный фон»? Немного математики и несколько опытов позволили быстро проверить идею о «восстановлении волн». Достаточно было осуществить суперпозицию комплексной волны, приходящей от объекта, с простой волной (плоской или сферической), сделать фотографию, затем, осветив ее простой волной, восстановить исходную волну. Возникающее при этом изображение объекта было трехмерным. Мешало одно незначительное досадное обстоятельство: одновременно восстанавливалось еще одно изображение – «двойник» объекта. В интересующем меня случае его удалось исключить: если для получения голограммы использовать линзу, обладающую сферической аберрацией, то можно скомпенсировать эту аберрацию с помощью специальной оптической системы для одного из изображений и удвоить ее на изображении-«двойнике», которое становится размытым и почти неразличимым.

Пути науки часто неисповедимы. Электронная микроскопия так до сих пор и не извлекла существенной пользы из восстановления волн, тогда как мои оптические опыты (которые были задуманы как модельные) положили начало голографии».

«Почти каждый год приносит голографии новую жатву поразительных результатов. Я уверен в том, что еще много открытий ожидает молодых исследователей, которые посвятят себя ей».

Ю.Н. Денисюк – основоположник объемной голографии



Ю.Н. Денисюк

В 1962 в СССР было зарегистрировано открытие Ю.Н. Денисюка. Рассматривая историю и перспективы развития голографии, автор открытия, Ю.Н. Денисюк, описывает ситуацию в работе [2].

«Возможность фотографической записи и воспроизведения волновых полей была обнаружена Д. Габром, как известно, применительно к случаю записи голограммы в плоской светочувствительной среде. Бурное развитие голографии, которое последовало после того, как в 1962-1964 годах Э. Лейт и Ю. Упатниекс существенно

усовершенствовали этот метод, применив лазер и внеосевую схему записи, привело к тому, что разработка принципиальных основ голографии в двумерных средах фактически была закончена уже к 1970 г. и этот метод поступил в арсенал средств инструментальной оптики.

Однако завершение работ по изучению свойств двумерных голограмм далеко не означало, что исследования в голографии закончились вообще. Еще в 1962 г. было обнаружено, что двумерная голограмма – это лишь частный случай трехмерной и что запись в трехмерной среде обладает гораздо более полным комплексом отображающих свойств. Переход от плоскости к трехмерному пространству не только расширил сферу исследований, но и одновременно предопределил переход голографии из области инструментальной оптики в область физики.

В результате исследований в этом направлении стало постепенно выясняться, что в основе голографии лежит определенное явление, а именно способность материальной модели волны интенсивности воспроизводить волновое поле со всеми его параметрами – амплитудой, фазой, спектральным составом, состоянием поляризации и даже с изменениями этих параметров во времени. Изучение этого явления в настоящее время представляет собой главную научную цель голографии.»

Формула открытия Ю.Н. Денисюка №88 с приоритетом от 1 февраля 1962 года: «Установлено ранее неизвестное явление возникновения пространственного неискаженного цветного изображения объекта при отражении излучения от трехмерного элемента прозрачной материальной среды, в которой распределение плотности вещества соответствует распределению интенсивности поля стоячих волн, образующихся вокруг объекта при рассеянии на нем излучения»



Юрий Николаевич 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-го 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.

Биография Ю.Н. Денисюка
27.07.1927 – 14.05.2006

- 1927 – родился в г. Сочи.
1935 – переезд в г. Ленинград и поступление в школу.
1942 – переезд в г. Коломну Московской области.
1942-1943 – окончание семилетки и первого курса техникума транспортного машиностроения.
1944 – возвращение в г. Ленинград и поступление в Судостроительный техникум.

1947-1948 – окончание Судостроительного техникума и работа в ЦКБ-17 Судпрома.
1949-1954 – учеба в Ленинградском институте точной механики и оптики (ЛИТМО) на инженерно-физическом факультете по специальности «физическая оптика» и окончание его с отличием. Решением ГЭК от 23 февраля 1954 года присвоена квалификация инженера-физика.
1954-2005 – работа в Государственном Оптическом Институте им. С.И. Вавилова (ГОИ).
1964 – защита кандидатской диссертации на тему: «Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения».
1970 – присуждение ученой степени доктора физ.-мат. наук и избрание членом-корреспондентом АН СССР.
1975-1988 – создание голографического отдела в Государственном Оптическом Институте им.С.И.Вавилова и руководство им.
1988-2005 – переход в ФТИ им. А.Ф. Иоффе и руководство лабораторией оптической обработки информации одновременно с руководством лабораторией фотофизики голографических процессов в ГОИ.
1992 – избрание действительным членом РАН.

Выдержки из статьи Ю.Н. Денисюка, где описано обнаруженное молодым исследователем явление, приводятся ниже. Материалы опубликованы в 1962 г. в ведущих научных журналах СССР [5].

*Об отображении оптических свойств объекта
в волновом поле рассеянного им излучения*

Имеется произвольный объект O , на который падает излучение источника 5 (см. рис. 1). В случае релеевского рассеяния отраженное

объектом излучение, накладываясь на излучение, распространяющееся от источника, образует стационарную картину стоячих волн. На рис. 1 d_1, d_2, d_3 изображают поверхности пучностей этих волн. Предположим далее, что в окружающее объект пространство внесен объем V , заполненный светочувствительной эмульсией (например, эмульсией Липпмана). После соответствующей экспозиции и химической обработки в этом объекте образуется фотографический осадок, плотность которого моделирует распределение интенсивности в стоячей волне.

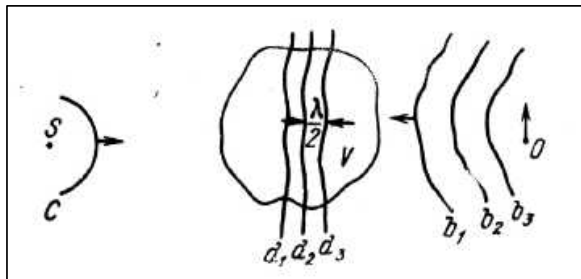


Рис.1.Схема образования волнового изображения. S — источник излучения; O — объект; C — волновая поверхность излучения, падающего на объект; b_1, b_2, b_3 — волновые поверхности излучения, отраженного объектом; d_1, d_2, d_3 — поверхности пучностей стоячих волн, образованных в результате интерференции волны C с волнами b_1, b_2, b_3 .

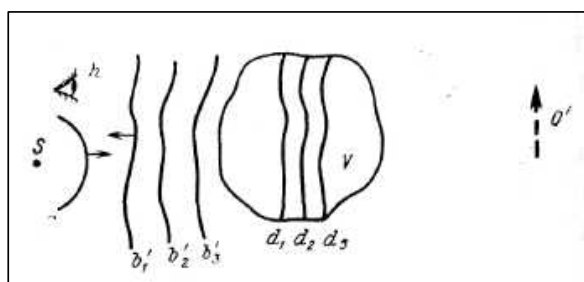


Рис.2.Получение изображения с помощью волновой фотографии. d_1, d_2, d_3 — зеркальные слои, образовавшиеся на месте поверхностей пучностей; b'_1, b'_2, b'_3 — волновые поверхности излучения, отраженного фотографией.

Оказывается, что такая пространственная структура является своего рода оптическим эквивалентом объекта. Если на эту структуру падает излучение того же источника, который освещал объект при экспозиции, то она отражает это излучение таким образом, что волновое поле отраженного излучения идентично

волновому полю излучения, отраженного объектом. Наблюдатель h при этом фиксирует появление мнимого пространственного изображения объекта O' (см. рис. 2).

Отображающие свойства фотографической модели картины стоячих волн распространяются и на спектральный состав. Если излучение, падавшее на объект при получении фотографии, было монохроматичным, а излучение, падающее на фотографию при наблюдении, имеет сплошной спектр, то фотография отразит только ту монохроматическую составляющую, которой она была экспонирована. [5]

«Мой путь в голографию»

Чрезвычайно интересен рассказ Ю.Н. Денисюка о том, как он пришел к данному открытию, изложенный в его работе «Мой путь в голографию», которая воспроизведена в сборнике [4].



Ю.Н. Денисюк, ГОИ, 1970-е гг.

«После окончания Ленинградского института точной механики и оптики в 1954 г. и поступления на работу в Государственный оптический институт им.С.И.Вавилова получилось так, что мне пришлось заниматься очень скучной работой по разработке обычных оптических устройств, состоящих из линз и призм.

Одним из главных увлечений в те годы было чтение научно-фантастических рассказов. В числе таких рассказов я натолкнулся на рассказ известного советского писателя Ю.Ефремова «Звездные корабли». На меня произвел большое впечатление один из эпизодов этого рассказа: современные археологи, раскапывая место, где инопланетяне охотились на динозавров много миллионов лет тому назад, случайно находят странную пластинку. «Оба профессора невольно содрогнулись, когда удалили пыль с поверхности пластинки. Из глубокого совершенно прозрачного слоя, увеличенное неведомым оптическим ухищрением до своих естественных размеров, на них взглянуло странное лицо. Изображение было сделано трехмерным, а главное, невероятно живым, особенно это относилось к глазам».

У меня возникла дерзкая мысль: нельзя ли создать такую фотографию средствами современной оптики? Или, если быть более точным, нельзя ли создать фотографии, воспроизводящие полную иллюзию реальности зарегистрированных на них сцен?

Первые шаги в решении этой задачи были достаточно просты. Было очевидно, что полностью обмануть зрительный аппарат человека и создать у него иллюзию того, что он наблюдает истинный предмет, можно, если бы удалось воспроизвести волновое поле света, рассеянного этим объектом. Было также понятно, что задача воспроизведения волнового поля могла бы быть решена, если бы удалось найти метод регистрации и воспроизведения распределения фаз этого поля.

Работа Д. Габора, в которой он излагал принципы голографии, была мне неизвестна, и в 1958 г. я начал самостоятельно решать эту проблему. Следуя приблизительно по тому же пути, что и Габор, я пришел к идее выявления фаз сложной объектной волны за счет ее смешения с референтной волной, обладающей достаточно простой формой. Исходя, так же как и Габор, из принципа Гюйгенса, я считал, что запись и воспроизведение волнового поля должны обязательно осуществляться на поверхности. Именно в этом пункте и возникла основная сложность в реализации моей идеи.»

«Выход из тупика подсказала работа Г. Липпмана, который в конце 19 века показал, что фотография объемной картины плоской стоячей волны обладает свойствами воспроизводить спектральный состав зарегистрированного на ней излучения. Тогда у меня возникло предположение, что может быть, не имеет смысла ограничиваться случаем записи на поверхности? Возможно, сложные изгибы поверхностей пучностей зарегистрированной в объеме стоячей волны содержат информацию не только о спектральном составе, но и о фазе волновых полей? Несколько вариантов теории и эксперимент подтвердили справедливость этого предположения. Действительно, оказалось, что объемная фотографическая модель картины стоячей волны обладает воистину чудесными отображающими свойствами: она способна воспроизвести точные значения

фазы, амплитуды и спектрального состава объектной волны. В то время, поскольку я не знал о методе Габора и введенном им термине «голография», я присвоил этой модели мой собственный термин «волновая фотография».

Трехмерная голограмма: это метод или явление? Когда стали открыты волшебные свойства трехмерной голограммы, возник следующий вопрос: является ли трехмерная голограмма новым методом изображения или новым явлением природы, т.е. новой научной истиной? Несмотря на то, что моей первоначальной целью являлось создание нового метода получения изображений, мне стало ясно, что в данном случае самым важным было новое, интересное физическое явление. Различие между терминами «метод» и «явление» является далеко не формальным. В то время как метод предоставляет только возможности, обеспечиваемые его изобретателем, явление существует в соответствии со своими собственными законами и иногда может оказаться значительно более широким, чем считалось первоначально.

Решив, что я имею дело с явлением, я дал ему довольно сложное название: «явление отображения оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения» [5].

Научная школа голографии, созданная в России Ю.Н. Денисюком и руководимая им, способствовала развитию голографии как современного научно-технического направления, определяющего многие стороны жизни современного мирового сообщества.

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. - М.:Мир. 1982. - т.2. – с.691-729.
3. Вьено Ж.-Ш., Смигальский П., Руайе А. Оптическая голография. Развитие и применение / Перевод под ред. Ю.Н.Денисюка. – М.:Мир. 1973. – 214 с.
4. Денисюк Ю.Н. Мой путь в голографии. В кн.: Ю.Н.Денисюк – основоположник отечественной голографии: Сборник трудов Всероссийского семинара / СПб: СПбГУИТМО. 2007. – с. 7-14.
5. Денисюк Ю.Н. Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения // Доклады Академии наук СССР. 1962. 144. №6. с.1275-1278; Оптика и спектроскопия. 1962. Т.15. С. 523-532.

§2. Гол로그램 как носитель информации: интерференционная картина и регистрирующая среда. Элементарная голограмма и зонная пластинка.

Голографический метод записи и воспроизведения информации является двухэтапным, в котором носителем информации служит голограмма. На первом этапе производится запись информации: формирование интерференционной картины (ИК) с заданной объектной волной и регистрация ИК на материальном носителе – получение голограммы. Второй этап представляет собой воспроизведение (восстановление, преобразование) информации – считывание голограммы, при котором происходит восстановление (воспроизведение, преобразование) объектной волны. В настоящее время практически реализованы методы получения голограмм, которые позволяют воспроизвести амплитуду, фазу, спектральный состав, состояние поляризации зарегистрированного излучения и изменение этих параметров во времени.

Рассмотрим процесс получения голограммы, который начинается с формирования интерференционной картины, предполагая, что читатель знаком с основами волновой оптики и электромагнитной природы световых волн.

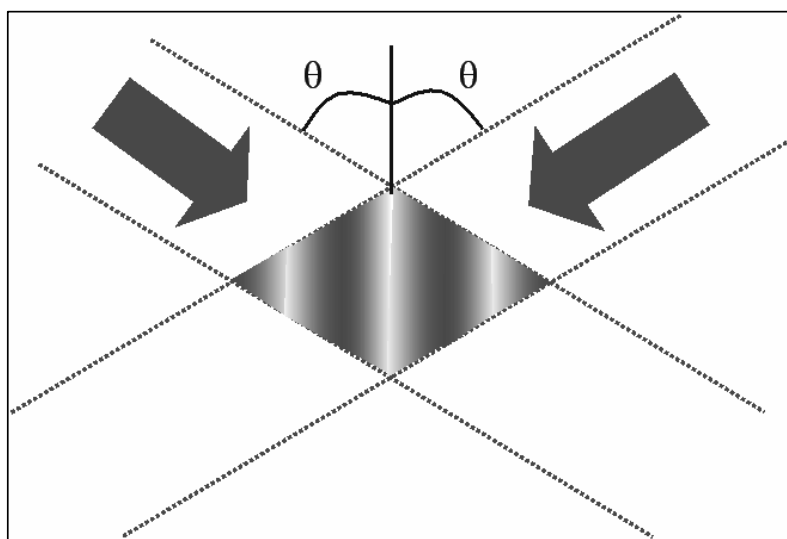


Рис.2.1. Интерференционная картина, образованная взаимодействием двух монохроматических плоских когерентных волн.

На рис.2.1 представлен вид интерференционной картины, образованной взаимодействием двух плоских монохроматических волн. Образованная двумя «бегущими» (распространяющимися в пространстве)

электромагнитными волнами, интерференционная картина представляет собой стоячую волну. Напомним, что световая волна характеризуется вектором электрической напряженности $\mathbf{E}(\mathbf{r},t)$ и вектором магнитной напряженности $\mathbf{H}(\mathbf{r},t)$. В плоской волне векторы \mathbf{E} и \mathbf{H} выступают равноправно. Однако фотохимическое, физиологическое, фотоэлектрическое действия излучения оказываются обусловленными именно вектором \mathbf{E} . По этой причине, как правило, в дальнейшем будем рассматривать только вектор \mathbf{E} .

Рассмотрим плоскую электромагнитную волну, распространяющуюся в направлении z , которую можно представить в виде

$$E = E_0 \cos(\omega t - 2\pi z/uT) = E_0 \cos(\omega t - 2\pi z/\lambda) = E_0 \cos(\omega t - kz) \quad (2.1)$$

$$E = \operatorname{Re} E_0 \exp \{i(\omega t - kz)\} = \operatorname{Re} E_0 \exp \{i\omega(t - z/u)\} \quad (2.2),$$

где E_0 – амплитуда волны; ω – круговая частота; T – период колебаний ($T = \lambda/u$); u – скорость распространения волны вдоль оси z ($u = c/\sqrt{\epsilon\mu} = c/n$); n – показатель преломления ($n = \sqrt{\epsilon\mu}$); λ – длина волны; k – волновое число ($k = 2\pi/\lambda$).

Напряженность результирующего поля \mathbf{E} при наложении двух волн \mathbf{E}_1 и \mathbf{E}_2 согласно принципу суперпозиции составляет величину:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 \quad (2.3)$$

Частота изменения во времени векторов \mathbf{E} и \mathbf{H} в оптическом диапазоне весьма велика (порядка 10^{15} Гц). По этой причине любой приемник излучения регистрирует лишь величины, усредненные по некоторому времени наблюдения Δt , характеризующему инерционность прибора ($\Delta t \gg 1/\omega$). При оценке энергии излучения сравнение с результатами эксперимента необходимо проводить по величине квадрата напряженности электрического поля (E^2), представляющего собой интенсивность излучения в данной точке пространства, усредненную по времени наблюдения

$$E^2 = (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2)^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2 \mathbf{E}_1 \mathbf{E}_2 \quad (2.4).$$

При этом рассматривают два варианта. Вариант 1: $\mathbf{E}_1 \mathbf{E}_2 = 0$. Интерференция отсутствует и суммарная интенсивность излучения равна сумме интенсивностей наложенных волн. Вариант 2: $\mathbf{E}_1 \mathbf{E}_2 \neq 0$. Имеет место интерференция и суммарная интенсивность излучения не равна сумме интенсивностей наложенных волн.

На рис.2.2 представлена схема образования интерференционной картины излучением бесконечно удаленных когерентных источников монохроматического излучения S_1 и S_2 , формирующих плоские волновые фронты F_1 и F_2 . Распределение интенсивности излучения на оси x показано в нижней части рисунка. При этом пространственный период

интерференционной картины определяется выражением, которое легко получить, используя геометрию данной схемы:

$$2d \sin\theta = \lambda \quad (2.5),$$

где d - расстояние между смежными максимумами интенсивности (период интерференционной картины по оси x); 2θ - угол между интерферирующими пучками; λ - длина волны излучения.

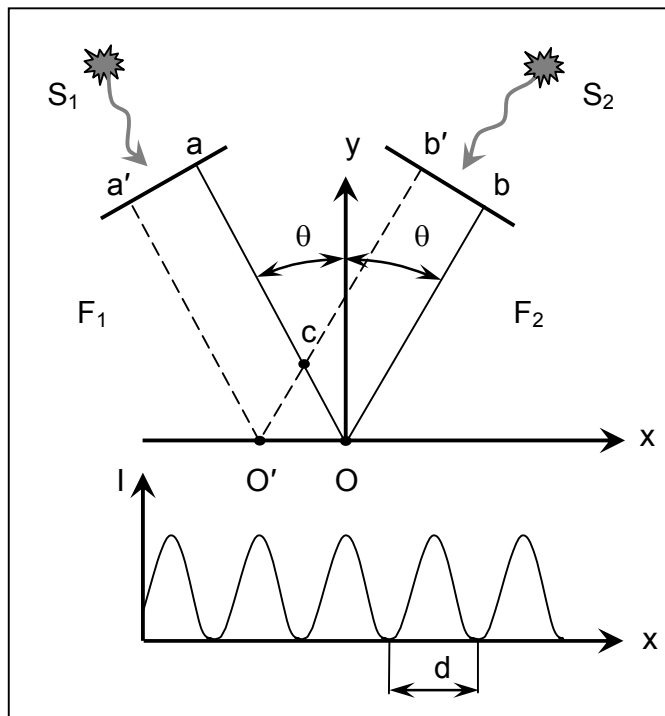


Рис.2.2.Образование интерференционной картины при взаимодействии двух монохроматических плоских когерентных волн, угол между которыми 2θ . S_1 и S_2 – бесконечно удаленные источники излучения, образующие плоские волновые фронты F_1 и F_2 : a (a') и b (b') – точки на поверхности волновых фронтов, определяющие направление лучей, которые приходят в точку O (O') в одной фазе. Внизу: распределение интенсивности ($I = E^2$) в картине интерференции по оси x ; d – период интерференционной картины.

На рис.2.3 также рассмотрен вариант образования интерференционной картины излучением двух когерентных монохроматических источников излучения, расстояние между которыми ($2l$) значительно меньше расстояния (D) до плоскости наблюдения (например, две параллельные узкие щели в непрозрачном экране).

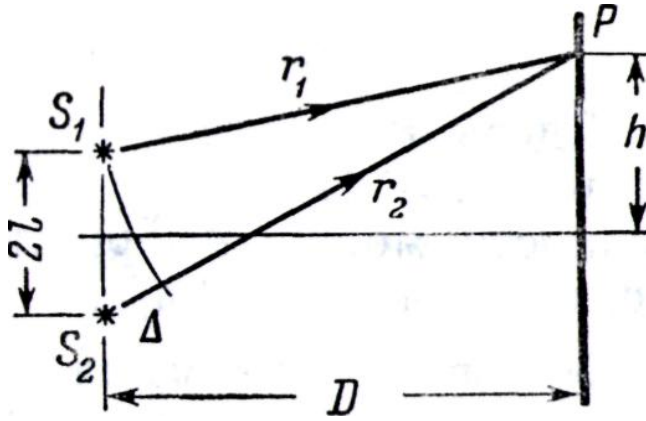


Рис.2.3. К интерференции двух монохроматических волн, излучаемых точечными источниками S_1 и S_2 , расстояние между которыми $2l$. P – точка наблюдения в плоскости экрана; D – расстояние от плоскости источников до плоскости наблюдения; h – расстояние точки наблюдения от оптической оси системы; r_1 и r_2 – расстояния от источников до точки наблюдения; Δ – разность хода между лучами r_1 и r_2 .

Для простоты будем считать, что волны, испускаемые источниками S_1 и S_2 , имеют одинаковую амплитуду E_0 и в плоскости наблюдения являются плоскими; все колебания направлены одинаково, поэтому задача является скалярной. Тогда

$$E_1 = \text{Re } E_0 \exp[i(\omega t - kr_1)]; \quad E_2 = \text{Re } E_0 \exp[i(\omega t - kr_2)] \quad (2.6)$$

Поле E , создаваемое суммарным колебанием, запишется в виде

$$E = E_1 + E_2 = 2E_0 \cos [k(r_2 - r_1)/2] \cos [\omega t - k(r_2 + r_1)/2] \quad (2.7)$$

Обозначим разность хода $(r_2 - r_1)$ через Δ . Тогда амплитуду суммарного колебания можно записать в виде $2E_0 \cos (k\Delta/2)$, а его интенсивность I , пропорциональная квадрату амплитуды, будет иметь вид

$$I = 4(E_0)^2 \cos^2 k\Delta/2 = 2(E_0)^2 (1 + \cos k\Delta) = 2(E_0)^2 (1 + \cos 2\pi\Delta/\lambda) \quad (2.8)$$

Исследуем выражение (2.8) и найдем те значения Δ , при которых интенсивность в плоскости наблюдения максимальна и минимальна.

Если $k\Delta = \pm 2m\pi$, то $I_{\max} = 4(E_0)^2$; если $k\Delta = (2m + 1)\pi$, то $I_{\min} = 0$.

Условие максимума $\Delta = m\lambda = 2m\lambda/2$, т.е. разность хода Δ равна четному числу полуволен.

Условие минимума $\Delta = (2m + 1)\lambda/2$, т.е. разность хода Δ равна нечетному числу полуволен.

Теперь рассчитаем интенсивность излучения в плоскости наблюдения в зависимости от h – расстояния от точки Р до оси симметрии (см. рис.2.3). Очевидно, что при $D \gg 2l$ можно записать

$$\Delta/2l = h/D, \text{ или } \Delta = 2lh/D \quad (2.9).$$

Следовательно,

$$I = 2(E_0)^2 [1 + \cos (4\pi lh/D\lambda)] \quad (2.10)$$

и на экране будет наблюдаться периодическое изменение освещенности, аналогично зависимости $I(x)$, приведенной в нижней части рис.2.2. При этом выражение (2.9) с учетом обозначений (угол между интерферирующими волнами 2θ ; расстояние между двумя смежными максимумами интенсивности d) тождественно выражению (2.5).

Данное выражение позволяет производить оценку такого важного при получении голограмм параметра как период интерференционной картины не только в случае использования плоских монохроматических волн и записи голограмм-решеток. При использовании сложных волновых фронтов можно производить оценку минимального, максимального, среднего и т.п. периодов ИК по парциальным составляющим пространственного спектра объектной и опорной волны.

Таким образом, при образовании интерференционной картины двумя плоскими монохроматическими волнами:

- Период ИК определяется длиной волны излучения и углом между интерферирующими волнами;
- При фиксированном угле между интерферирующими волнами период ИК зависит от длины волны: при уменьшении – уменьшается, при увеличении – увеличивается.
- При фиксированной длине волны излучения период ИК зависит от угла между интерферирующими волнами: при уменьшении – уменьшается, при увеличении – увеличивается.
- Минимальный период ИК при использовании излучения данной длины волны может быть получен при встречном распространении интерферирующих волн и составляет величину равную половине длины волны: $d = \lambda/2$.

Для образования интерференционной картины необходимо существование, по крайней мере, двух когерентных волн, которые в голографии, как правило, разделяют на объектную (предметную) волну и опорную (референтную) волну.

Объектная (предметная) волна - одна из волн, образующих интерференционную картину при получении голограммы, в которой

содержится информация, предназначенная для воспроизведения или преобразования. 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 голограммных оптических элементов, когда используют волны одинаковой формы.

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

Рассматривать свойства и особенности голограмм различного типа в дальнейшем будем на примере голограмм-решеток, или элементарных голограмм. Интерференционная картина при регистрации таких голограмм формируется взаимодействием двух монохроматических плоских когерентных волн (рис.2.1), деление которых на объектную и опорную может быть весьма условным. Естественно, если волны некогерентны, то интерференционной картины не существует.

Для регистрации голограммы необходимо ввести в область пространства, где существует интерференционная картина, регистрирующую среду и «сфотографировать» интерференционную картину, т.е. зарегистрировать распределение интенсивности излучения в данной области пространства – рис.2.4а. В готовой голограмме пространственное распределение интенсивности излучения в момент записи («фотографирования») будет преобразовано в пространственное распределение по крайней мере одного из параметров регистрирующей среды, используемой для записи голограммы (коэффициента поглощения, показателя преломления, толщины) – рис.2.4б.

Таким образом, голограмма представляет собой зарегистрированную интерференционную структуру и 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 (например, объектной), а также находиться с ними в определенных соотношениях (например, сопряженные волны).

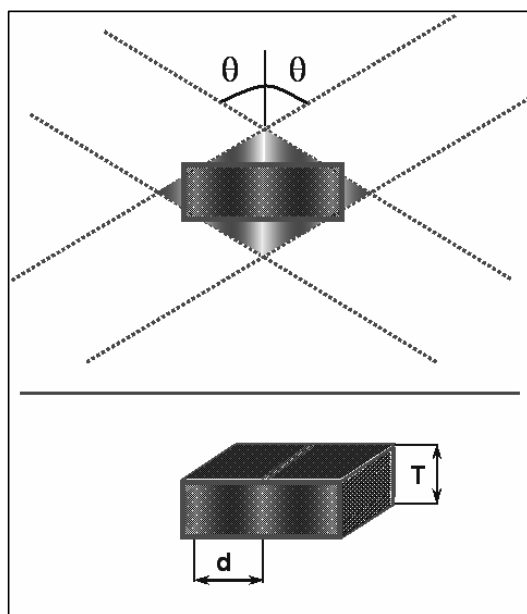


Рис.2.4. Запись интерференционной картины на регистрирующую среду (а) и полученная голограмма, в которой распределение интенсивности светового поля преобразовано в изменение коэффициента поглощения регистрирующей среды (б).

В простейшем случае взаимодействия двух когерентных плоских волн I_1 и I_2 (рисунок 2.5.а) голограмма называется элементарной и представляет собой одномерную решетку толщины T , в которой изменение параметров среды происходит по координате x (рисунок 2.5.б). При этом расстояние между соседними максимумами интенсивности в регистрируемой интерференционной картине (рисунок 2.5в) $d = \lambda / (\sin\theta_1 + \sin\theta_2)$, 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 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: период

голограммы (d), или ее пространственная частота ($\nu = 1/d$), толщина голограммы (T), характер отклика регистрирующей среды на воздействие излучения (фотоотклик), ориентация изофазных поверхностей интерференционной картины относительно границ голограммы. В зависимости от спектрального состава регистрируемого излучения различают монохромные голограммы - полученные при использовании излучения только одной длины волны и цветные – полученные при использовании излучения, содержащего несколько длин волн.

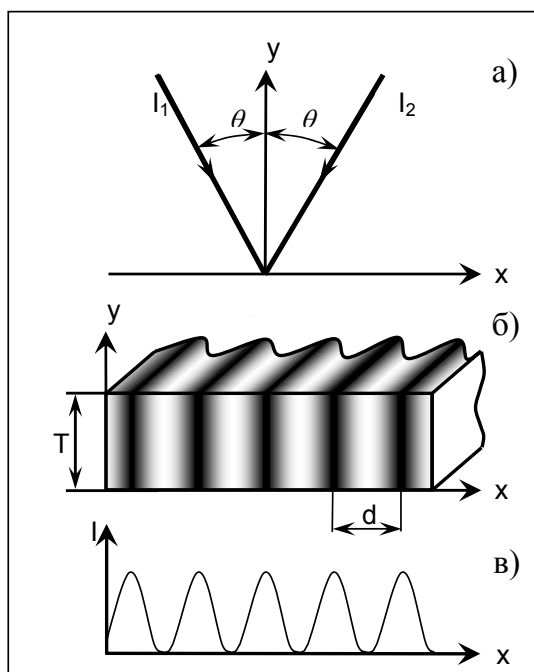


Рис.2.5. Элементарная голограмма: а – направление распространения интерферирующих пучков; б – одномерная решетка с периодом d , полученная в регистрирующей среде с толщиной T ; в - распределение интенсивности излучения в интерференционной картине по оси x (в направлении вектора решетки, который коллинеарен оси x).

Пространственная частота голограммы (ν) - величина, обратно пропорциональная пространственному периоду изменения оптических параметров голограммы (d), является одним из важных параметров. 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 в см^{-1} . Любую голограмму можно представить как результат наложения элементарных голограмм, ориентированных произвольно, и

характеризовать набором (спектром) пространственных частот. Обычно выделяют среднюю ($\bar{\nu} = 1/\bar{d}$), 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 $\bar{\nu}$ максимальна и близка к величине $2/\lambda$.

При рассмотрении голограмм, полученных в физическом эксперименте, геометрические размеры среды играют важную роль и определяют многие свойства голограммы, зависящие от степени ее объемности. На рис.2.6 приведены примеры регистрирующих сред, которые можно считать объемными (3D) или плоскими (2D). Реальные образцы используемых регистрирующих сред имеют определенные геометрические размеры – как правило, на практике образцы для записи голограмм характеризуют площадью образца и его толщиной.

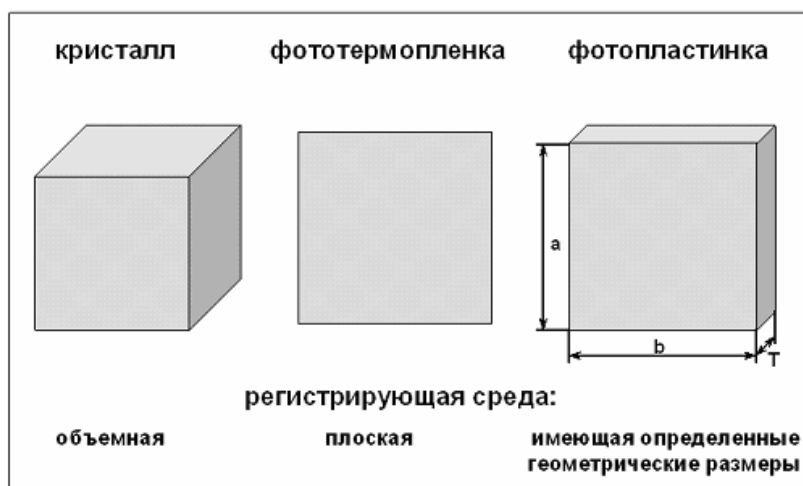
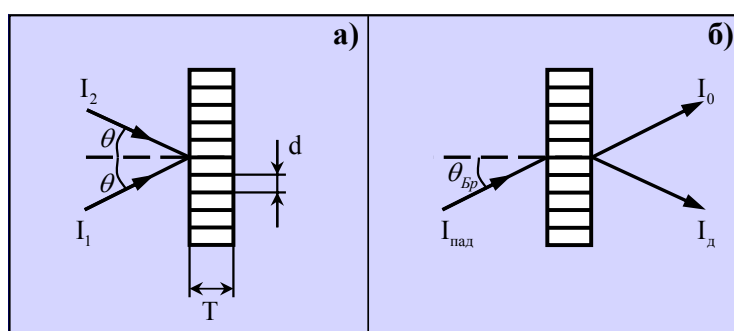


Рис.2.6. Типы регистрирующих сред в зависимости от их геометрических размеров.

Дальнейшее рассмотрение голографического процесса, если нет специальных указаний в тексте, будем проводить на примере регистрирующей среды в форме плоскопараллельной пластины (или диска) с толщиной T .

Важным моментом при получении голограмм является ориентация регистрирующей среды относительно интерференционной картины, позволяющая получать при регистрации сформированной ИК либо пропускающие (рис.2.7), либо отражательные голограммы (рис.2.8).

Пропускающие голограммы. При ориентации регистрирующей среды таким образом, что интерферирующие пучки падают на ее поверхность с одной стороны, регистрируют так называемые пропускающие голограммы (рис.2.7). При освещении пропускающей голограммы дифрагированная волна наблюдается в проходящем свете. Ориентация интерферирующих волн (I_1 и I_2) относительно РС при записи элементарных пропускающих голограмм по симметричной схеме показано на рисунке 2.7а, где θ - угол падения излучения на РС, T - толщина РС, d - расстояние между двумя соседними максимумами интенсивности в регистрируемой интерференционной картине. На рисунке 2.7б 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).



Примечание [A1]: а, б

Рис.2.7.Схема записи (а) и считывания (б) пропускающей голограммы. Запись проведена по симметричной схеме. Условия считывания указаны для трехмерной голограммы – единственный дифракционный порядок.

Отражательные голограммы. При падении интерферирующих пучков на РС с разных сторон зарегистрированная голограмма представляет собой отражательную голограмму (рис.2.8), при освещении которой дифрагированная волна наблюдается в отраженном свете. На рис.2.8а показана ориентация интерферирующих волн (I_1 и I_2) относительно РС при регистрации элементарных отражательных голограмм по симметричной схеме, где $(\pi/2 - \theta)$ - угол падения излучения на РС, T - толщина РС, d - расстояние между двумя соседними максимумами интенсивности в регистрируемой интерференционной картине. На рис.2.8б схематически показано расположение волн при освещении трехмерной отражательной голограммы в условиях Брэгга ($\theta = \theta_{\text{Бр}}$, $I_{\text{пад}}$

- падающая, или восстанавливающая волна, I_d - 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 10-15мкм, что позволяет для восстановления объектной волны использовать источники со сплошным спектром излучения (стандартные лампы накаливания, Солнце) в силу их высокой спектральной селективности.

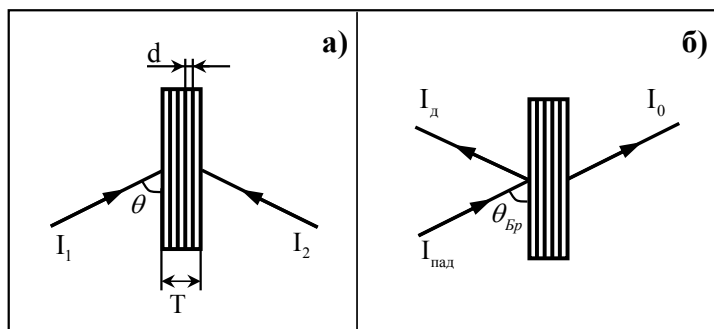


Рис.2.8.Схема записи (а) и считывания (б) отражательной голограммы. Запись проведена по симметричной схеме. Условия считывания указаны для трехмерной голограммы – единственный дифракционный порядок.

Изобразительные голограммы Ю.Н.Денисюка, представляют собой отражательные голограммы, полученные при встречном распространении интерферирующих пучков, при этом период интерференционной картины минимален.

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

Соотношение между пространственной частотой (ν) и толщиной (T) определяет меру объемности голограммы и ее важнейшие свойства: угловую и спектральную селективность, дифракционную эффективность и др. При $T\nu \rightarrow 0$ голограмма является двумерной, при $T\nu \rightarrow \infty$ - трехмерной.

Голограмма двумерная (плоская, 2D) – 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

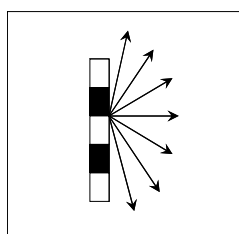
изображение объекта ($k = +1$), и мнимое изображение ($k = -1$), а также присутствует волна нулевого порядка дифракции ($k = 0$). В большинстве практических случаев происходит образование большего количества порядков дифракции. Математический аппарат, разработанный для традиционных (плоских) дифракционных решеток, (полученных, например, методом нанесения штрихов на гладкую поверхность) в общих чертах применим и для теоретического анализа двумерных голограмм. При восстановлении объектной волны для двумерных голограмм существует принципиальная возможность изменения масштабов в изображении объекта путем соответствующего выбора параметров схемы и длины волны излучения при регистрации голограммы и ее считывании. Использование излучения различных длин волн при записи и восстановлении объектной волны дает возможность неdestructивного (неразрушающего) считывания двумерных голограмм и обеспечивает их широкое применение в качестве управляемых транспарантов в системах обработки информации.

Большое значение при получении двумерных голограмм имеет характер фотоотклика регистрирующей среды, обеспечивающий линейный, либо нелинейный режим записи интерференционной картины. Регистрация голограммы в линейном режиме обеспечивается в случае, когда амплитуда модуляции оптического параметра в голограмме прямо пропорциональна интенсивности излучения в ИК. При нарушении прямой пропорциональности между указанными величинами режим записи оказывается нелинейным и распределение интенсивности в ИК передается с искажениями – пространственное распределение оптического параметра значительно отличается от синусоидального распределения. При этом появляются высшие порядки дифракции и искажаются амплитуды восстановленных волн первого порядка дифракции (см.рис.2.9).

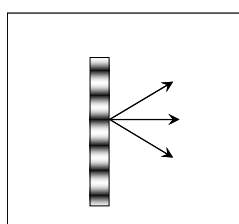
«Изображения» объекта, образованные дифрагированными волнами высших порядков, представляют собой сложные функции (типа автосвертки) исходной волновой функции объекта и имеют мало общего с самим предметом. В ряде специальных случаев (голограмма сфокусированного изображения, объект-транспарант без рассеивателей) волны высших порядков образуют изображения. Распределение яркости в этих изображениях, как правило, искажено, а фаза изображения « k »-го порядка отличается в « k » раз от фазы изображения 1-го порядка.

Двумерные голограммы-решетки принципиально не отличаются от таких традиционных оптических элементов, как классические дифракционные решетки. Голография значительно расширила

возможности изготовления дифракционных решеток с самыми различными параметрами. Например, голографический метод значительно облегчил получение дифракционных решеток с синусоидальным распределением модулируемого оптического параметра (показателя преломления, коэффициента поглощения или оптической толщины среды). Такие решетки позволяют получать только два дифракционных порядка (+1-й и -1-й), в отличие от нарезных решеток с прямоугольным профилем штриха (см. рис.2.9).



дифракция излучения на классической нарезной решетке (прямоугольный профиль штриха).



дифракция излучения на элементарной голограмме-решетке, полученной в линейной среде.

Рис.2.9. Влияние свойств регистрирующей среды на свойства дифрагированного излучения. Рассмотрены двумерные дифракционные решетки, полученные различными методами.

Голограмма трехмерная (объемная, 3D) – голограмма, при освещении которой формируется только один дифракционный порядок (-1)-й. 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). Практические применения трехмерных голограмм во многом определяются прогрессом в области разработки светочувствительных сред для их регистрации. В настоящее время в

зависимости от типа регистрирующей среды различают: тонкослойные трехмерные голограммы - статические трехмерные голограммы в средах толщиной порядка 10-20 мкм; объемные (глубокие, 3D) голограммы - статические трехмерные голограммы в средах толщиной порядка 1000 мкм и более; динамические трехмерные голограммы. Как правило, вопрос о степени объемности голограммы решается экспериментально по наличию +1 и высших порядков дифракции и их эффективности (см. рис.2.10.). 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 средах толщиной порядка 1мм достигнуты значения спектральной селективности - порядка десятых долей нм, а угловой селективности – порядка единиц угловых минут.

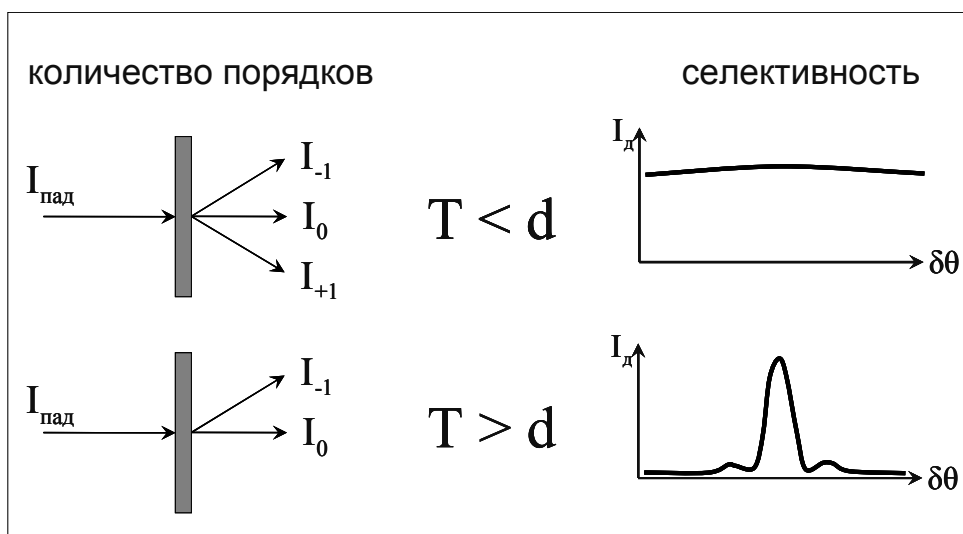


Рис.2.10. Влияние толщины регистрирующей среды на свойства голограмм (селективность продемонстрирована на примере угловой селективности).

Следует отметить, что в традиционной оптике оптических элементов, которые являлись бы аналогами объемной голограммы, не существует.

Брэгговские решетки (см.рис.2.11) - так принято называть одномерные решетки, полученные в объемной среде, получившие широкое распространение в конце XX века, берут свое начало из исследований кристаллических решеток твердых тел с помощью рентгеновских лучей (рентгеноструктурный анализ).

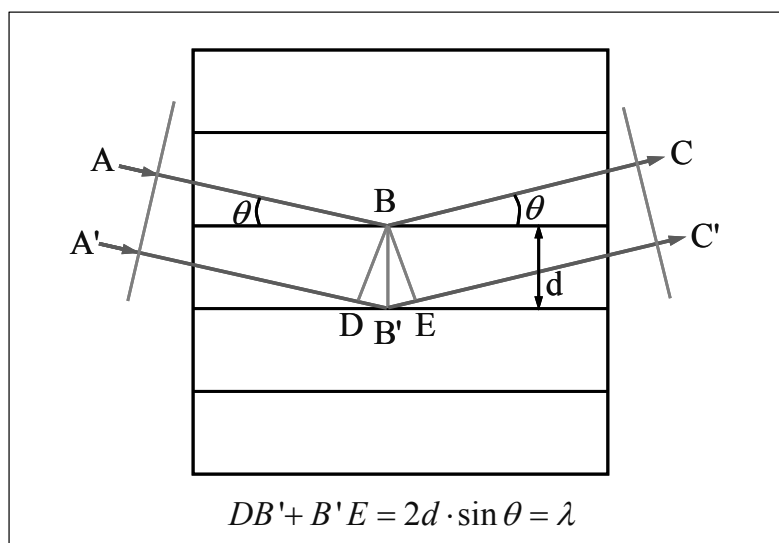


Рис.2.11. Рассмотрение дифракции излучения на элементарной трехмерной голограмме – одномерной решетке в объемной среде. В зависимости от ориентации интерференционных полос относительно границ среды такая решетка может быть либо пропускающей, либо отражательной.

До сих пор мы рассматривали ситуацию, связанную с получением элементарных голограмм, при которой деление интерферирующих пучков на объектный и опорный (референтный) не имеет смысла. В то же время для исследований, связанных с получением изображений при помощи голографического метода, необходимо иметь достаточно простой объект, с помощью которого можно было бы моделировать ситуации с более сложными объектами.

В качестве одного из самых простых объектов в оптике, и в голографии в том числе, принято рассматривать точечный источник излучения (или рассеивающую точку) – объект, размерами которого можно пренебречь. Схема образования интерференционной картины при взаимодействии плоской и сферической волн показана на рис.2.12. В этом случае полученная голограмма с зарегистрированной интерференционной картиной аналогична зонной пластинке Френеля (рис.2.13).

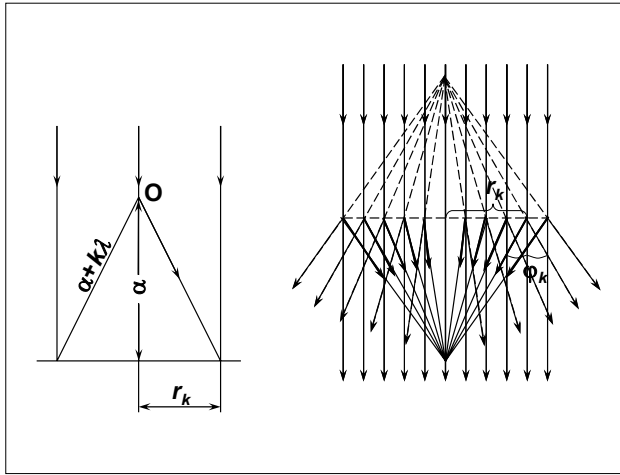


Рис.2.12.Образование интерференционной картины при взаимодействии плоской и сферической волны – а; дифракция на этой структуре при освещении ее плоской монохроматической волной – б.

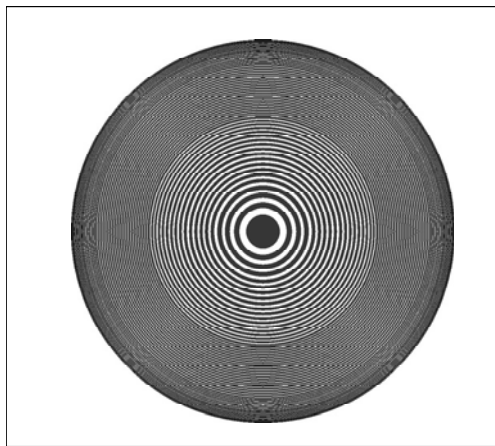


Рис.2.13.Вид зонной пластинки Френеля, полученной при взаимодействии плоской и сферической когерентных монохроматических волн.

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

При изучении голографических процессов главным образом в дальнейшем будем ориентироваться на видимый диапазон излучения и на те эффекты, демонстрация которых может быть визуализирована, т.е. эффекты могут наблюдаться глазом. Видимое излучение (свет) –

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.

Литература

1. Денисюк Ю.Н. Принципы голографии. - Л.:ГОИ. - 1978. - 125с.
2. Островский Ю.И. Голография и ее применение. - Л.:Наука. 1973. - 180с.
3. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. - М.:Мир. 1973. - 686с.
4. Оптическая голография / Под ред. Колфилда Г. - М.:Мир. 1982. - т.1,т.2. – 736 с.
5. Калитеевский Н.И. Волновая оптика. – СПб.:Лань. 2006. – 466 с.
6. Бутиков Е.И. Оптика. - М.: Высшая школа. 2003.
7. Денисюк Ю.Н.Сборник избранных статей по голографии.// Труды ГОИ. - Л.: ГОИ. 1988. Т.68. Вып.202. – 265с.
8. Информационные возможности объемных голограмм. Оптоинформатика ч.2. Уч.-метод. пособие под. ред. О.В. Андреевой. – СПб: СПб ГИТМО (ТУ). 2003. – 68 с.
9. Андреева О.В., Парамонов А.А., Андреева Н.В. Прикладная голография. Методические материалы к экспериментальному практикуму. – СПб: СПбГУИТМО. 2008. – 150 с.

§3. Получение изображений объекта при использовании восстановленной объектной волны. Основные характеристики объектов для голографирования и изображений объекта, полученных с помощью голограммы.

В предыдущих разделах в качестве объекта мы рассматривали достаточно простую модель, а именно – точку (светящуюся или рассеивающую). В действительности объект играет важную роль, переоценить которую невозможно, во многих приложениях голографии, особенно при демонстрации свойств голограмм и возможностей голографического метода записи и воспроизведения информации. Вот что писал об этом Ю.Н. Денисюк в своем эссе «Мой путь в голографию».

«До сих пор я сожалею о том, что мне не пришло в голову выбрать в качестве объекта рельеф монеты. Если бы я это сделал, я бы сразу достиг своей исходной цели, т.е. доказал бы возможность использования голографии для разработки изобразительной техники, которая могла бы создать иллюзию реального существования изображенных объектов. Моя ошибка еще раз доказывает, что в голографии выбор объекта является определяющим для достижения успеха, как в научных разработках, так и в области искусства.» «Возможность демонстрировать изобразительные голограммы значительно облегчает работу голографиста, даже если он занимается разработкой оптических приборов.» [1]

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 [2].

«Поразительно, что среди всего разнообразия известных физике эффектов до последнего времени не было явления, которое позволило бы объективно запечатлевать конфигурации предметов окружающего нас мира. Фотографии, полученные с помощью камеры-обскуры и линзы, - вот фактически 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.»

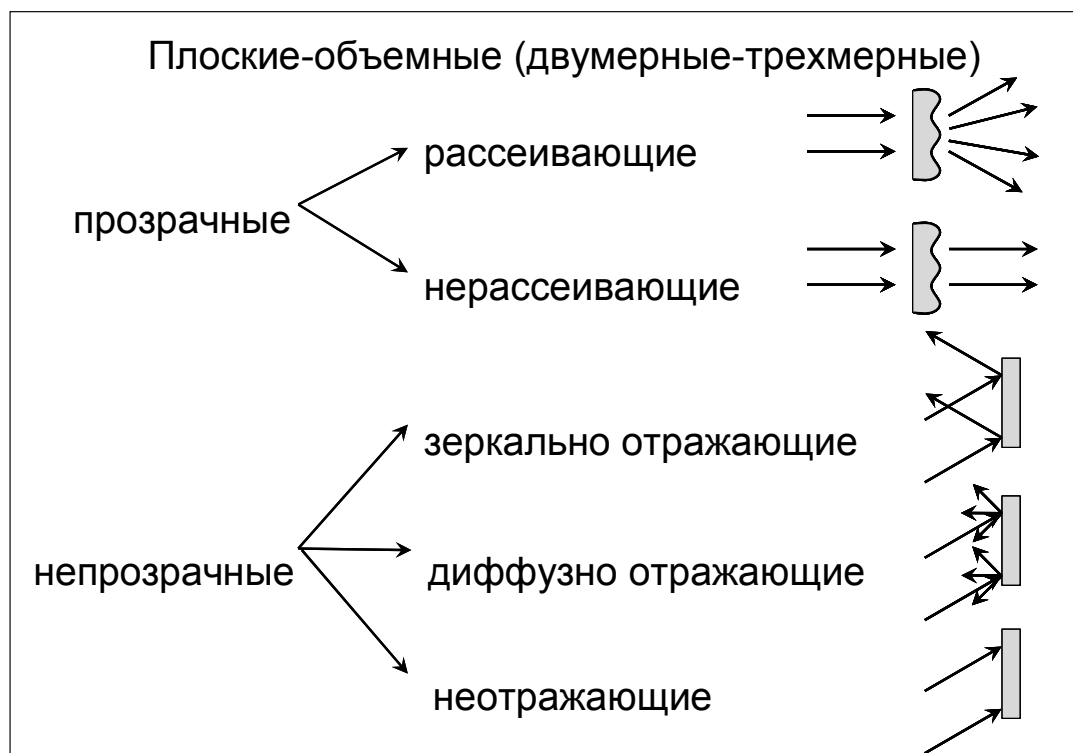
Первый действительно объективный способ регистрации формы предметов – голография и лежащее в ее основе явление были обнаружены

только в середине нашего (XX-го) столетия к моменту появления технического средства их реализации – лазера.»

Демонстрировать свойства голограмм и возможности голографии при воспроизведении объектных волн сложной формы удобно и наглядно производить с помощью изобразительных голограмм и полученного с помощью восстановленной объектной волны изображения объекта. Поэтому, в первую очередь рассмотрим свойства объектов, важные для голографии, и особенности формирования изображений объектов с помощью объектной волны, восстановленной голограммой. Напомним принятую терминологию, связанную с рассмотрением данных вопросов.

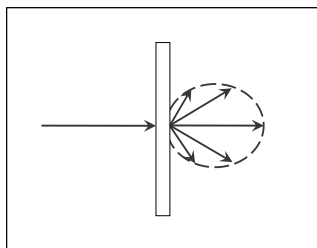
Объект для голографирования, его форма и свойства поверхности являются определяющими для получения качественных голограмм различного типа. В таблице 3.1. приведены основные характеристики объектов для голографирования, которые определяют свойства объектной волны.

Таблица 3.1. Характеристики объектов для голографирования.



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

прозрачный объект



непрозрачный объект

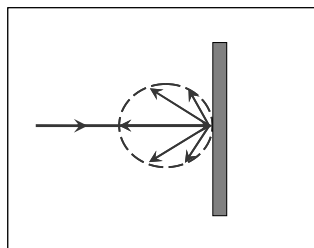


Рис.3.1. Индикатриса рассеяния прозрачного и непрозрачного объектов.

Для получения голограмм с максимальным использованием голографического эффекта необходимо при регистрации голограммы создать такие условия и выбрать такой объект, чтобы излучение, рассеянное каждой отдельной точкой объекта, освещало всю площадь регистрирующей среды. В предположении, что необходимые условия, о которых идет речь, выполнены и производится дальнейшее рассмотрение голографических схем.

Принципиальная схема записи пропускающей голограммы непрозрачного объекта приведена на рис.3.2а. С помощью лазера и оптической системы формируется коллимированный пучок монохроматического излучения, одна часть которого попадает на зеркало и образует опорный пучок, а другая часть падает на объект и при отражении от него образует объектную волну. Регистрирующая среда (РС) устанавливается в области наложения объектного и опорного пучков. После регистрации голограммы (регистрации сформированной объектной и опорной волнами интерференционной картины) и проведения соответствующей обработки (усиления, фиксирования и т.п.) полученная голограмма может быть использована для наблюдения изображения объекта. При наблюдении изображения объекта с помощью восстановленной объектной волны существует принципиальная разница в случае использования трехмерной (рис.3.2б) и двумерной (рис.3.3) регистрирующей среды при записи голограммы. Полученная трехмерная голограмма при ее освещении (считывании) формирует один дифракционный порядок, представляющий собой восстановленную объектную волну, с помощью которой можно наблюдать так называемое «мнимое» изображение объекта (рис.3.2б). При освещении двумерной голограммы, как правило, наблюдается много порядков дифракции, из которых только два порядка можно использовать для наблюдения изображений объекта: (+1)-й порядок формирует так называемое «действительное» изображение объекта, а (-1)-й порядок формирует «мнимое» изображение объекта (см. рис.3.3). Следует отметить, что,

представленная на рис.3.3 двумерная голограмма зарегистрирована в линейном режиме, что обеспечивает при ее считывании отсутствие высших ($n \geq 2$) порядков дифракции.

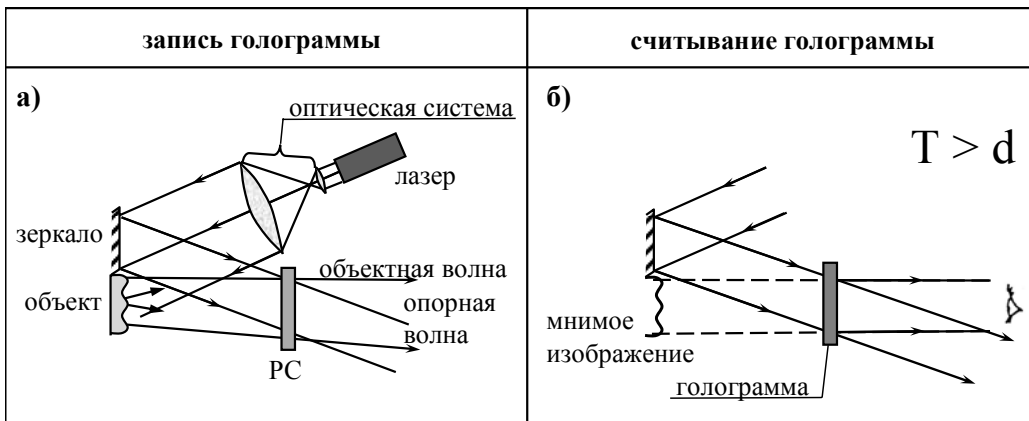


Рис.3.2.Принципиальная схема записи (а) пропускающей голограммы непрозрачного объекта и наблюдения (б) изображения объекта с помощью восстановленной объектной волны при считывании трехмерной ($T \gg d$) голограммы. РС – регистрирующая среда.

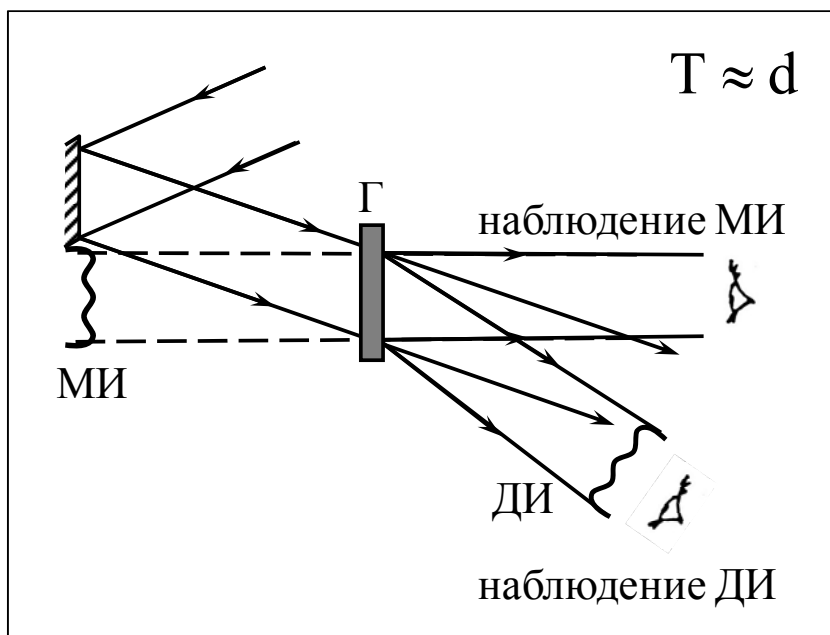


Рис.3.3.Наблюдение изображения объекта при считывании двумерной голограммы ($T \sim d$): МИ – мнимое изображение объекта; ДИ – действительное изображение объекта.

Таким образом, при считывании двумерная голограмма формирует две объектные волны, с помощью которых возможно наблюдение изображения объекта, которое может быть сформировано либо самой голограммой - действительное изображение (ДИ - рис.3.3.), либо оптической системой, (например, оптической системой глаза) - мнимое изображение (МИ – рис.3.3) . При этом используется принятая терминология [3].

Изображение оптическое – картина, получаемая в результате прохождения через оптическую систему лучей, распространяющихся от объекта, и воспроизводящая его контуры и детали. Основой зрительного восприятия предмета является его изображение оптическое, спроектированное на сетчатку глаза.

Действительное изображение (оптическое) – создается сходящимися пучками лучей в точках их пересечения. Если в плоскости пересечения лучей поместить экран (фотопленку, регистрирующую среду любого типа), то можно на нем наблюдать действительное изображение оптическое.

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

Особенностью изображений объекта, формируемых с помощью восстановленной голограммой объектной волны, является то, что действительное изображение объекта, формируемое восстановленной голограммой объектной волной, является псевдоскопическим, а мнимое изображение объекта, формируемое с помощью объектной волны восстановленной голограммой, является ортоскопическим. Что это значит?

Ортоскопическое изображение объекта - изображение, в котором распределение разности фаз на поверхности изображения объекта соответствует распределению разности фаз на поверхности объекта. Наблюдатель при этом видит изображение, соответствующее объекту.

В голографическом эксперименте мнимое изображение представляет собой обычное ортоскопическое изображение.

Псевдоскопическое изображение объекта - изображение, 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. Действительное изображение объекта, сформированное восстановленной голограммой объектной волной (рис.3.3) является псевдоскопическим.

Псевдоскопическое изображение создается в голографическом эксперименте еще в одном случае - при обращении хода лучей через голограмму (явление обращения волнового фронта). Этот эффект можно наблюдать с помощью изобразительной голограммы.

На рис.3.4 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 (рис.3.4а) наблюдается мнимое ортоскопическое изображение объекта, с определенным распределением разности фаз объектной волны на его поверхности. При использовании сопряженной опорной волны (рис.3.4б) 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.

Таким образом, изменение направления хода лучей в опорной волне, используемой для считывания голограммы, соответствует переходу от ортоскопического изображения к псевдоскопическому.

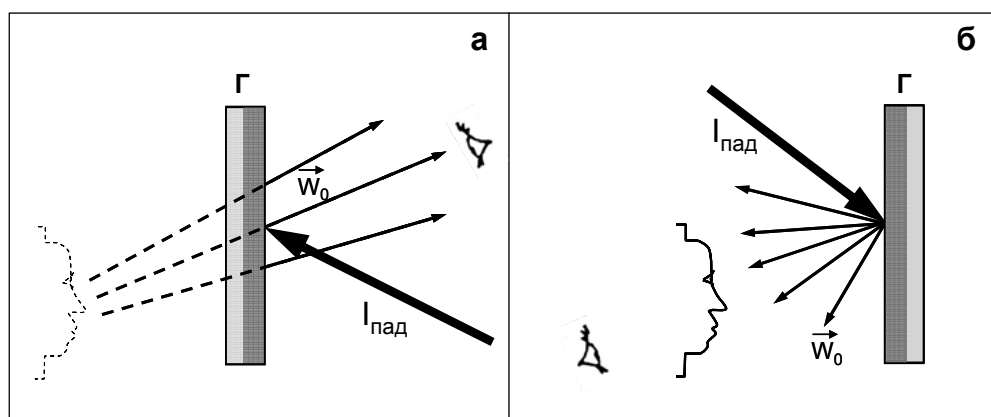


Рис.3.4. Наблюдение изображения объекта с помощью голограммы Денисюка при использовании исходной опорной волны (а) и обращенной (б). $I_{\text{пад}}$ – падающая на голограмму волна, предназначенная для считывания информации; W_0 – восстановленная объектная волна, формирующая при наблюдении мнимое (а) и действительное (б) изображение объекта.

Предлагаем читателю при первой возможности убедиться собственными глазами в возможности получения псевдоскопического изображения при обращении волны, освещающей изобразительную голограмму.

Фантомное изображение объекта в голографии. Как образуется изображение-«фантом»? (Фантом – причудливое явление, призрак, привидение, как гласит словарь русского языка.) Фантомным в голографии принято называть изображение объекта, полученное с помощью волны, восстановленной голограммой при ее освещении излучением, сформированным другим объектом, который был использован при записи голограммы [4]. Запись и считывание голограммы для получения такого изображения показана на рис.3.5.

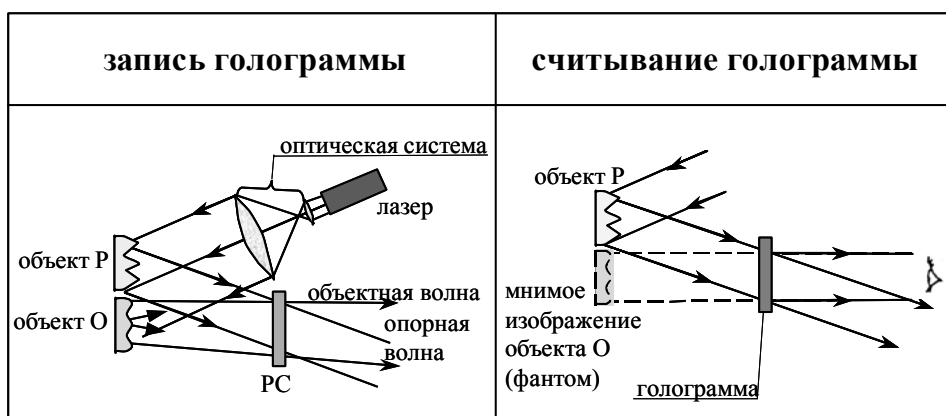


Рис.3.5. Запись (а) и считывание (б) голограммы для получения фантомного изображения объекта «О» (изображение – фантом) при освещении голограммы излучением объекта «Р».

«Ассоциативный отклик голограммы» - формирование восстановленной волны с помощью ассоциативного отклика голограммы.

Большое значение при использовании голограмм в системах архивной памяти имеет так называемый «ассоциативный отклик голограммы». На рис.3.6. приведена принципиальная схема записи и считывания информации, демонстрирующая данное явление, суть которого заключается в следующем. Если при считывании голограммы использовать не опорную, а объектную волну, то восстановится использованная при записи опорная волна, появление которой можно детектировать с большой точностью, сфокусировав ее на приемнике излучения. Если при считывании голограммы используется только часть объектной волны, то возникает так называемый ассоциативный отклик в форме появления части опорной волны, яркость которой зависит от

размеров части объекта, излучением которой сформирована освещающая волна.

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

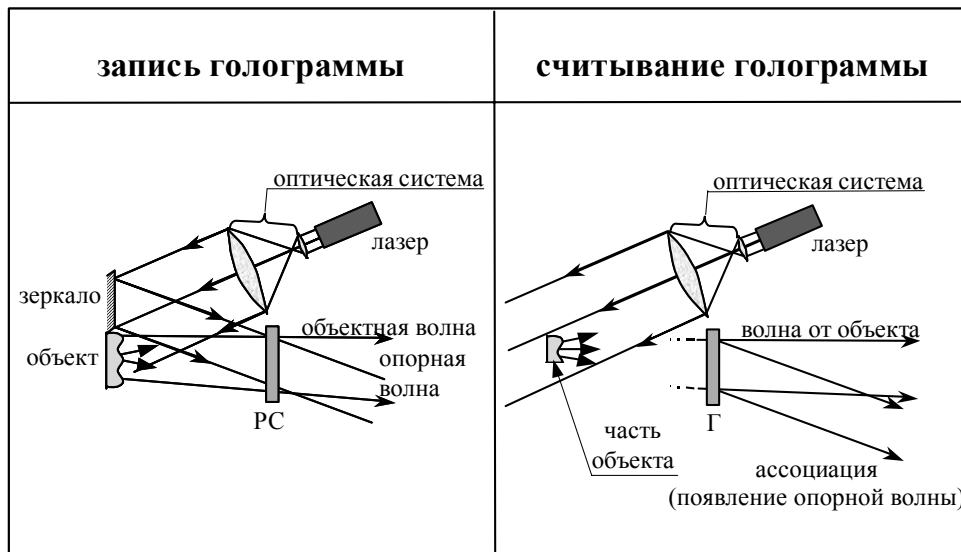


Рис.3.6. Принципиальная схема, поясняющая суть ассоциативного отклика: а – запись голограммы; б – появление ассоциативного отклика при считывании голограммы частью объектной волны. РС – регистрирующая среда; Г – голограмма.

Сфокусированное изображение в голографии. При получении голограмм объектная волна может быть образована не самим объектом, а его изображением, сформированным оптической системой (см.рис.4.15). В этом случае регистрируются так называемые голограммы сфокусированного изображения, которые позволяют создавать различные зрелищные эффекты за счет того, что при освещении голограммы изображение объекта может быть сформировано перед поверхностью голограммы – между наблюдателем и голограммой.

В заключение отметим, что голограммы, используемые для получения изображений объектов с помощью восстановленной объектной волны и их наблюдения, получили название изобразительных голограмм.

Изобразительные голограммы – голограммы, используемые для зрительного (визуального) эстетического восприятия (наблюдения) изображений. Широкое распространение получили изобразительные голограммы объектов, представляющих собой художественную ценность, - музейных и коллекционных экспонатов, ювелирных изделий и т.д.

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

При рассмотрении технических приложений, как правило, выделяют голограммы, используемые в качестве различных оптических элементов: дифракционных решеток, линз, селекторов излучения, ослабителей излучения и т.п. Голограммный оптический элемент (ГОЭ) – оптический элемент для преобразования излучения, изготовленный с помощью голографического метода.

Литература

1. Ю.Н.Денисюк – основоположник отечественной голографии: Сборник трудов Всероссийского семинара / СПб: СПбГУИТМО. 2007. – 300 с.
2. Денисюк Ю.Н. Голография и ее перспективы. (Обзор) // Журнал прикладной спектроскопии. 1980. Т.33. С.397-414.
3. Физический энциклопедический словарь. М.: БРЭ. 1998.
4. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. - М.:Мир. 1973. - 686с.
5. Оптическая голография / Под ред. Колфилда Г. - М.:Мир. 1982. - т.1,т.2. – 736 с.
6. Калитеевский Н.И. Волновая оптика. – СПб.: Лань. 2006. – 466 с.
7. Бутиков Е.И. Оптика. - М.: Высшая школа. 2003.

Часть 2. Голографические схемы, типы голограмм и их свойства

§4. Типы голографических схем и их практическая реализация. Особенности полученных голограмм.

Основные голографические схемы, используемые для регистрации голограмм, названы, как правило, либо по имени авторов - схема Габора, схема Денисюка и т.д., либо по специфическим особенностям геометрии оптической схемы - осевая схема и т.п. Голографическая схема обычно предназначена для регистрации голограмм определенного типа и предусматривает соответствующую оптическую схему для восстановления объектной волны или ее преобразования [1-6].

Рассмотрение пространственной интерференционной картины, образованной при взаимодействии плоской монохроматической волны и когерентного с ней точечного источника излучения, позволяет смоделировать геометрию образования голограмм различных типов, обусловленную различной геометрией расположения регистрирующей среды, объектного и референтного пучков излучения (рис.4.1). В качестве объектной волны в этом случае используется излучение точечного источника S , а в качестве референтной волны – плоская волна P . В сформированной таким образом интерференционной картине форма изофазных поверхностей и расстояние между ними определяются расстоянием от источника излучения. На рис.4.1 представлено сечение пространственной интерференционной картины плоскостью, в которой лежат волновой вектор плоской референтной волны и точечный источник излучения; при рассмотрении геометрии образования голограмм используется регистрирующая среда в виде плоскопараллельной пластинки.

При установке регистрирующей среды в положение «1» и положение «2» голограммы записывают при соосном (коллинеарном) направлении интерферирующих пучков. При этом в положении «1» регистрируется пропускающая голограмма, имеющая максимальный период интерференционной картины (к такому типу относится голограмма Габора), а в положении «2» – отражательная голограмма с минимальным периодом (к этому типу относится голограмма Денисюка).

В положении «3», «4» и «5» можно зарегистрировать так называемые внеосевые голограммы. Положение «3» демонстрирует историческую схему записи пропускающих голограмм Лейта и Упатниекса. В положении регистрирующей среды «4» и «5» регистрируются внеосевые голограммы, период которых одинаков: в положении «4» регистрируют

пропускающие голограммы, а в положении «5» – отражательные голограммы.

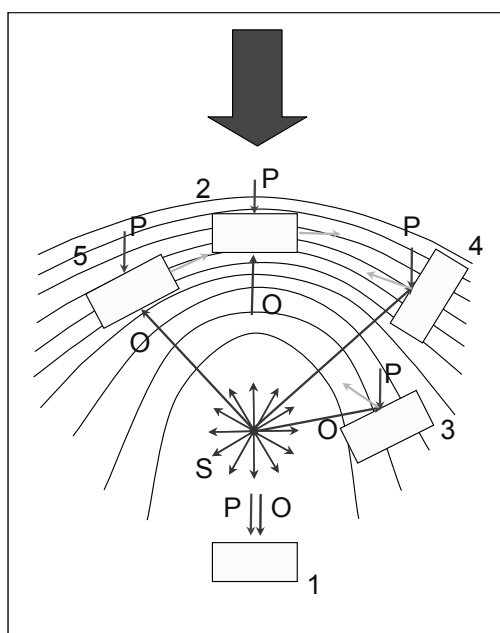


Рис.4.1. Геометрия образования голограмм различных типов при использовании плоской референтной волны (P) и объектной волны (O), образованной точечным источником излучения S. 1 – голограмма Габора, голограмма Фраунгофера; 2 – голограмма Денисюка; 3 – голограмма Лейта и Упатниекса; 4 – пропускающая голограмма (внеосевая); 5 – отражательная голограмма (внеосевая)

Далее рассмотрим конкретные голографические схемы, которые наиболее часто используются в научных исследованиях и практических приложениях.

Голограмма Габора

Голограмма Габора - осевая пропускающая двумерная голограмма, при регистрации которой источник света, прозрачный объект (O) и регистрирующая среда (P) расположены на общей прямой (рис.4.2а). Излучение, рассеянное объектом, создает объектную волну, а опорная волна представляет собой часть излучения, прошедшую через объект без изменения направления. При освещении голограммы Габора (рис.4.2б) 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

Габор, 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. На примере получения такой голограммы Д. Габор в 1947 г. доказал возможность записи и восстановления амплитуды и фазы волны, распространяющейся от объекта.

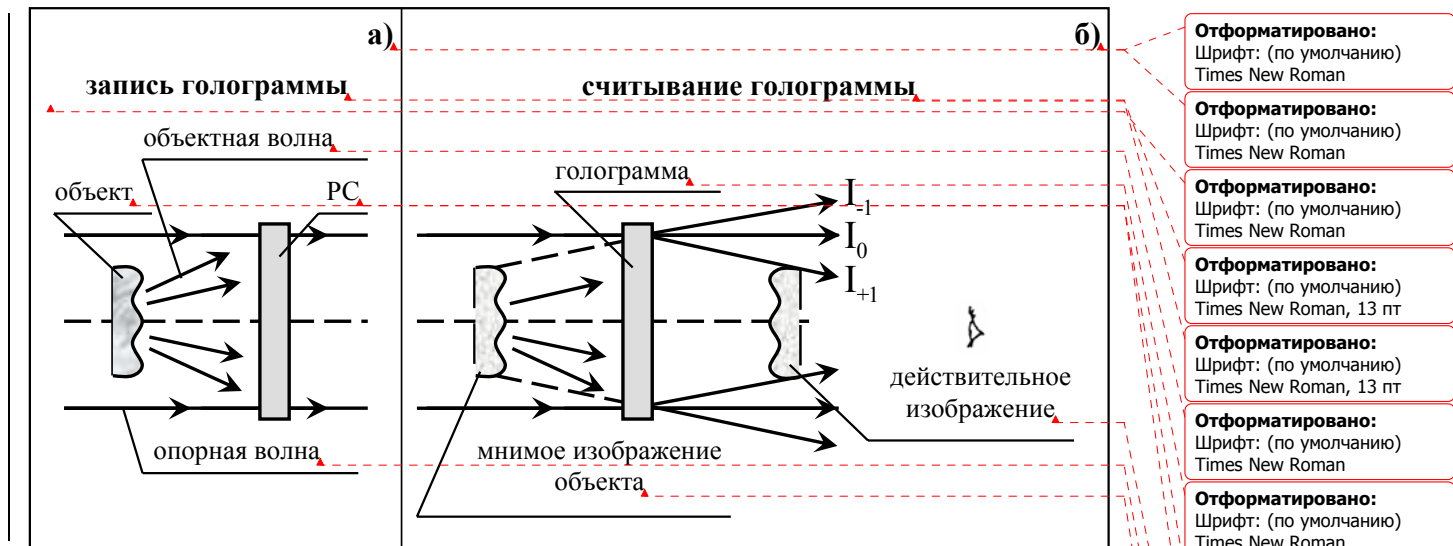


Рис.4.2.Схема записи и считывания голограммы Габора. РС – регистрирующая среда.

Особенности голографической схемы Габора:

- ☺ впервые реализована идея «восстановления волн»;
- ☺ позволяет восстановить амплитуду и фазу объектной волны;
- ☺ низкая пространственная частота регистрируемой интерференционной картины;
- ☹ при освещении голограммы наблюдаются два изображения, накладывающиеся друг на друга;
- ☹ возможна регистрация только прозрачных объектов;
- ☹ использование источников монохроматического излучения при считывании.

В настоящее время голограммы Габора применяются для регистрации пространственных ансамблей частиц малых размеров, при изготовлении осевых голограммных элементов. На рис.4.3 показана возможность использования схемы Габора для получения непрозрачных объектов.

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 пт

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

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

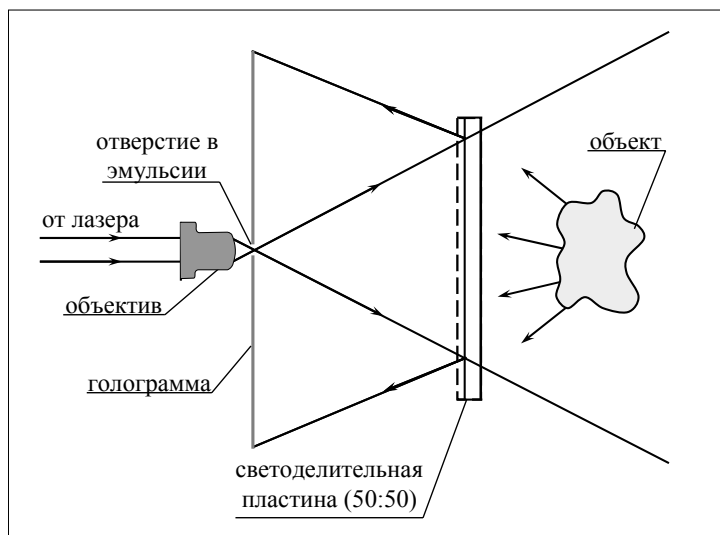


Рис.4.3. Практическая реализация схемы Габора для получения голограмм непрозрачных рассеивающих объектов.

Голограмма Денисюка

Голограмма Денисюка - отражательная трехмерная голограмма, впервые получена по однолучевой схеме Ю.Н. Денисюком в 1962г. При регистрации голограммы Денисюка (рис.4.4а), излучение когерентного источника (1) формируется линзой или оптической системой (2) и падает на прозрачную регистрирующую среду (РС), являясь опорной волной, затем проходит через РС и отражается (рассеивается) объектом (О), создавая объектную волну. Таким образом, объектная и опорная волны распространяются навстречу друг другу. При встречном распространении интерферирующих волн пространственная частота голограммы достигает максимально возможной для излучения данной длины волны (λ) величины примерно равной $2/\lambda$, поэтому голограммы Денисюка проявляют объемные свойства даже при использовании сравнительно тонкослойных 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 (рис.4.3б: 3 - лампа накаливания, 4 - изображение объекта, 5 - наблюдатель). Для получения голограмм Денисюка используют прозрачные регистрирующие материалы с высоким разрешением (порядка 5000 мм^{-1}) и методы постэкспозиционной обработки, пригодные для получения фазовых либо амплитудно-фазовых голограмм. Голограммы Денисюка широко используются для получения изобразительных голограмм и голограммных оптических элементов.

Голограмма Денисюка, впервые полученная автором в 1962г. на липпмановских прозрачных галогидосеребряных фотоматериалах с использованием в качестве источника излучения ртутной лампы, явилась экспериментальным обоснованием метода Денисюка - записи в трехмерной среде голограмм, способных восстанавливать амплитуду, фазу и спектральный состав объектной волны.

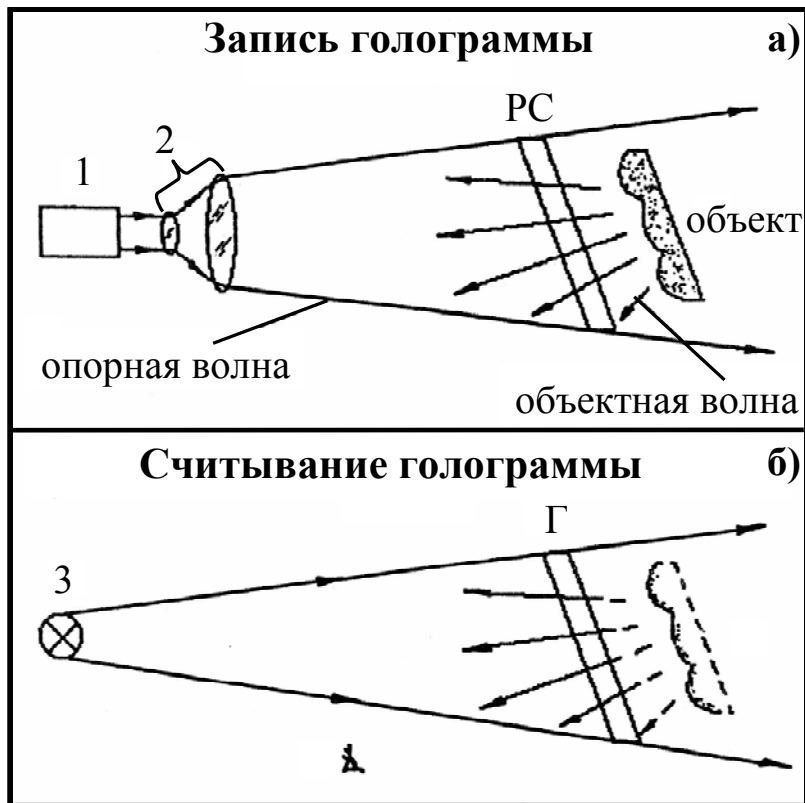


Рис.4.4.Схема записи (а) и считывания (б) голограммы Денисюка, 1 – лазер, 2 – оптическая система, 3 – лампа накаливания. РС – регистрирующая среда, Г – голограмма.

Особенности схемы Денисюка:

- ☺ положила начало объемной голографии;
- ☺ позволяет восстановить амплитуду, фазу и спектральный состав объектной волны;
- ☺ позволяет наблюдать изображение объекта при освещении голограммы белым светом;
- ☺ нечувствительна к вибрациям элемента «объект-регистрирующая среда»;
- ☹ требует высокой разрешающей способности регистрирующей среды.

На рис.4.5 приведены примеры практической реализации схемы Денисюка при получении голограмм.

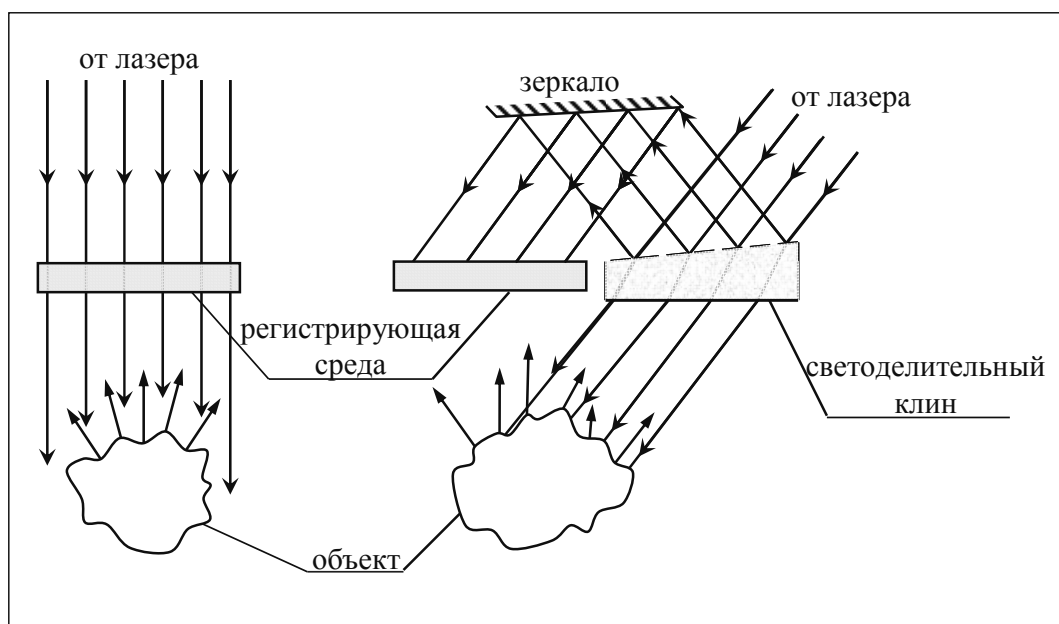


Рис.4.5. Возможные практические реализации схемы Денисюка.

Голограмма Лейта и Упатниекса

Голограмма Лейта и Упатниекса - пропускающая внеосевая голограмма обеспечивающая, в отличие от схемы Габора, пространственное разделение восстановленной (дифрагированной) волны и волны, прошедшей через голограмму без дифракции. Предложена Лейтом и Упатниексом (E.N. Leith, J. Upatnieks) в 1964 г. На рисунке 4.6 приведена типичная схема регистрации такой голограммы (рис.4.5а) и восстановления объектной волны (рис.4.5б): О – объект, РС – регистрирующая среда, Г – голограмма; I_0 , I_{+1} , I_{-1} – волны соответствующих порядков дифракции.

Особенности схемы Лейта и Упатниекса:

- ☺ возможность наблюдения только одного изображения;
- ☹ использование источников монохроматического излучения при считывании;
- ☹ более высокая пространственная частота интерференционной картины по сравнению со схемой Габора.

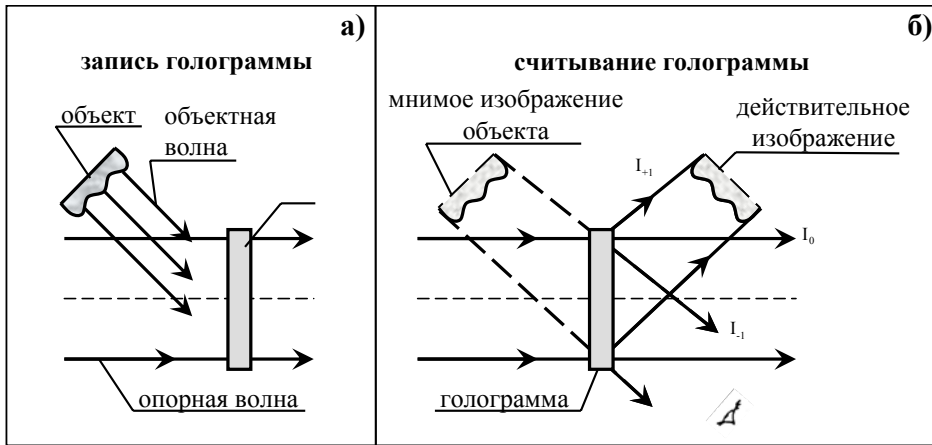


Рис.4.6.Схема записи (а) и считывания (б) голограммы Лейта и Упатниекса. РС – регистрирующая среда; I_0 , I_{+1} , I_{-1} – волны соответствующих порядков дифракции.

Схема Лейта и Упатниекса своим названием подчеркивает исторический приоритет авторов в применении внеосевого расположения интерферирующих пучков. В настоящее время при регистрации голограмм используют внеосевые схемы с самым различным расположением интерферирующих пучков, примеры которых приведены на рис.4.7-4.9.

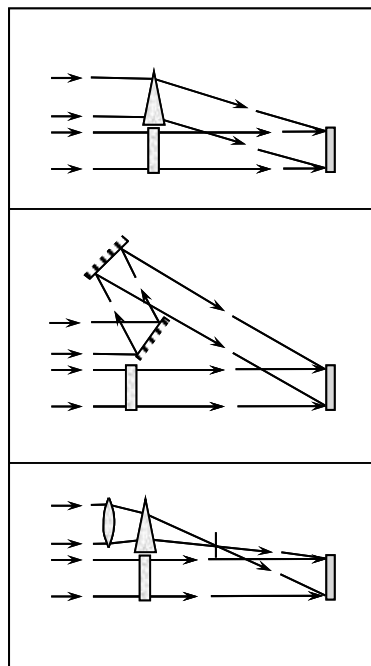


Рис.4.7.Возможные практические реализации схемы Лейта и Упатниекса для голографирования прозрачных объектов.

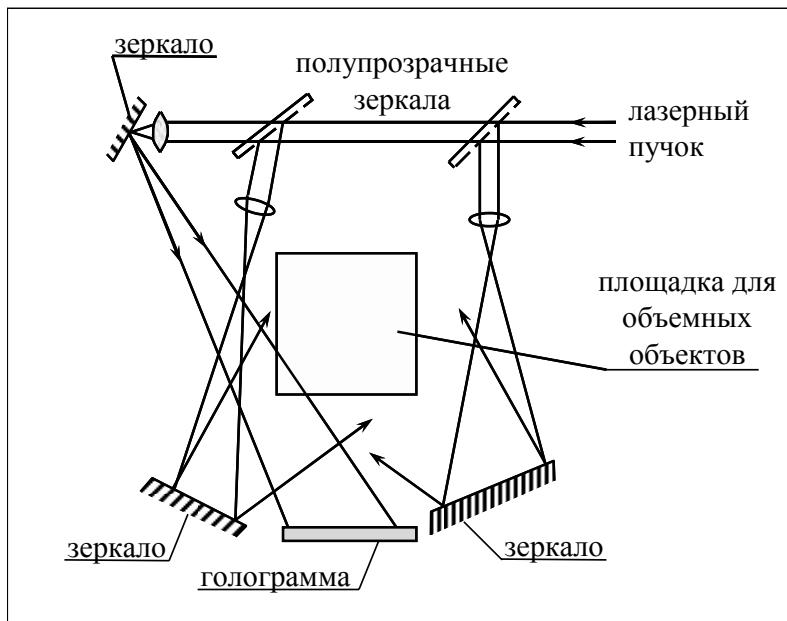


Рис.4.8.Пример внеосевой схемы получения голограмм с двусторонним освещением объекта.

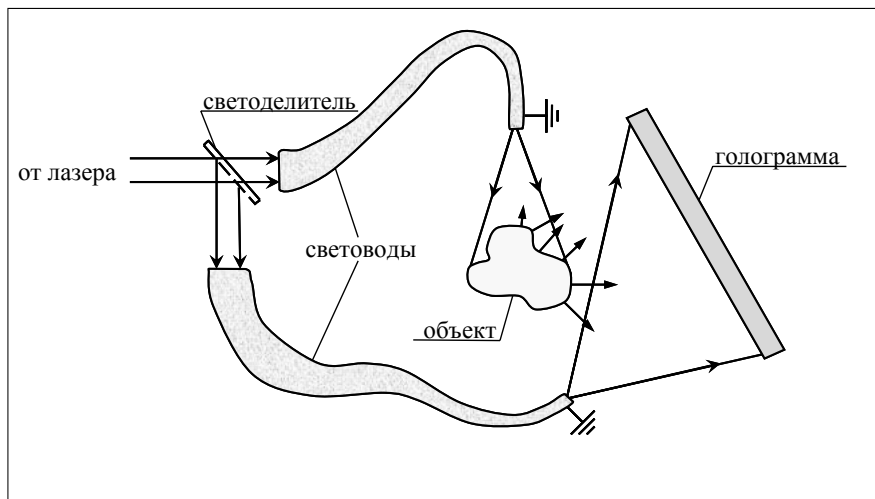


Рис.4.9.Пример использования световодов при получении голограмм по внеосевой схеме.

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

Голограмма Фраунгофера – пропускающая голограмма, при регистрации которой регистрирующая среда находится в области дифракции Фраунгофера рассеянного объектом излучения (объектной волны), а опорная волна является плоской. Схема записи голограмм Фраунгофера была предложена Б.Томпсоном в 1967 г. (она близка к схеме Габора) и оказалась очень удобной для наблюдения и исследования частиц малых размеров (см.рис.4.10). Согласно этой схеме объект освещается плоской волной, часть которой, прошедшая без дифракции, служит опорной волной. При восстановлении объектной волны также используется плоская волна.

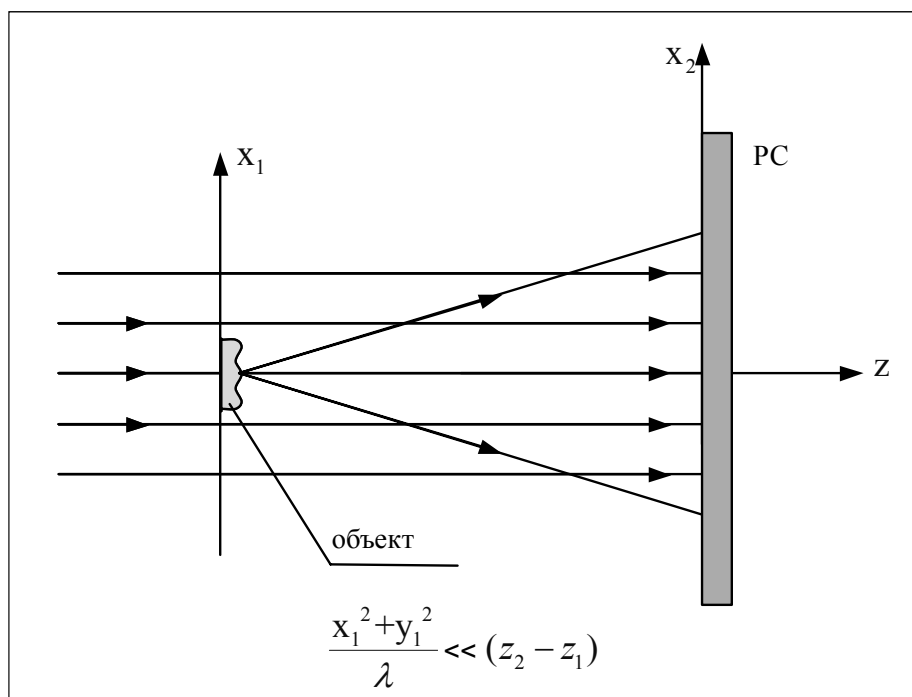


Рис.4.10.Практическая реализация голограммы Фраунгофера при исследовании мелкодисперсного распределения частиц. (Томпсон, 1967г.)

Голограмма Фурье – пропускающая голограмма, полученная в результате взаимодействия двух когерентных волн, комплексные амплитуды которых в плоскости регистрирующей среды являются фурье-образами объекта и источника излучения, формирующего опорную волну. В настоящее время термин "фурье-голограмма" применяют и в тех случаях, когда распределение амплитуд объектной волны в плоскости регистрирующей среды соответствует произведению фурье-образа объекта на медленно меняющийся фазовый множитель. При этом

опорный источник и объект должны располагаться строго в одной плоскости, перпендикулярной оси системы. Регистрация голограммы Фурье возможна и без использования оптических систем – это соответствует безлинзовой фурье-голограмме. Голограммы Фурье применяются в качестве пространственных фильтров для распознавания образов. Для записи голограмм Фурье обычно используются двумерные (плоские) объекты (например, транспаранты), позволяющие производить строгое фурье-преобразование. На рис.4.11 приведена схема получения голограмм Фурье, предложенная Ван дер Люгтом.

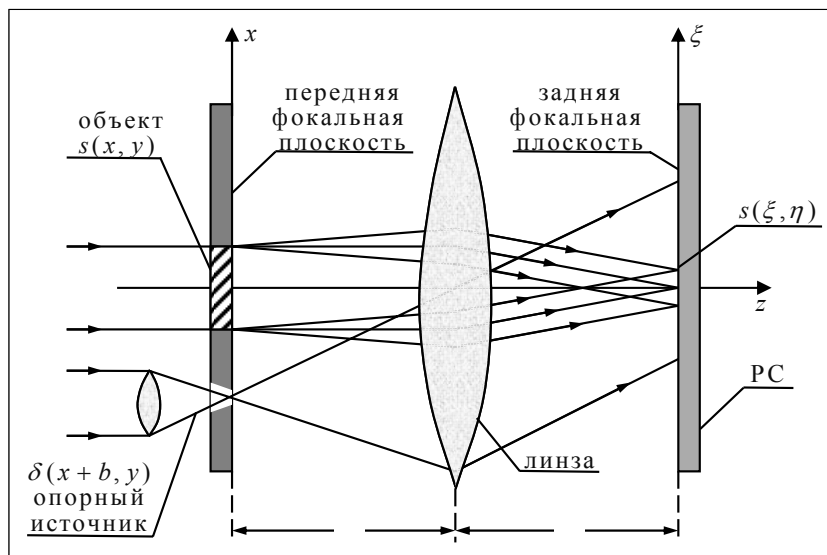


Рис.4.11.Схема получения голограмм Фурье (по Ван дер Люгту).

Особенности схемы получения голограмм Фурье:

- Для записи используются двумерные объекты (транспаранты), позволяющие производить строгое фурье-преобразование.
- Обеспечивает нечувствительность положения изображения к поперечному смещению голограммы
- Обеспечивает максимальную плотность записи информации

Голограмма Бентона

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 (S.A. Benton) в 1976г.

Радужные голограммы позволяют сократить избыточную информацию изобразительной голограммы за счет пренебрежения информацией о вертикальном параллаксе и представляют собой наиболее удачное решение в данном направлении - это пропускающие двумерные голограммы, зарегистрированные на тонкослойных светочувствительных материалах (толщиной менее 20мкм), допускающие восстановление белым светом. Восстановленное изображение объекта не имеет вертикального параллакса и меняет цвет при изменении угла наблюдения.

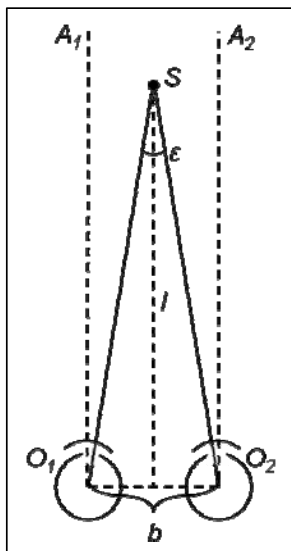
Главной особенностью таких голограмм является возможность получения фазовой модуляции за счет образования поверхностного рельефа регистрирующей среды, что позволяет производить копирование таких голограмм контактным способом и получать все известные радужные голограммы, переливающиеся всеми цветами радуги в белом свете и используемые в качестве значков, наклеек, этикеток и т.д.

Радужные голограммы положили начало «Защитной голографии» - технического направления, которое бурно развивается в настоящее время и связано с использованием голограмм для защиты от подделок продукции и документов. Современные технологии защитной голографии ушли далеко вперед по сравнению с первыми радужными голограммами, но начало направлению положили физические принципы создания голограмм с исключением информации о вертикальном параллаксе, разработанные и предложенные С.А. Бентоном, которые рассмотрим ниже.

***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 (см.рис.) и связан с расстоянием до объекта l соотношением $l = b/\epsilon$, где b – расстояние между узловыми точками обоих глаз.

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.

Рис.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.

Как известно, двумерная голограмма (как и традиционная, плоская дифракционная решетка) при освещении белым светом восстановит изображение, размытое в спектр. На рис.4.12а приведена схема записи голограммы точечного источника монохроматического излучения «А» с использованием опорного пучка, наклонно падающего на регистрирующую среду в виде стандартной фотопластинки.

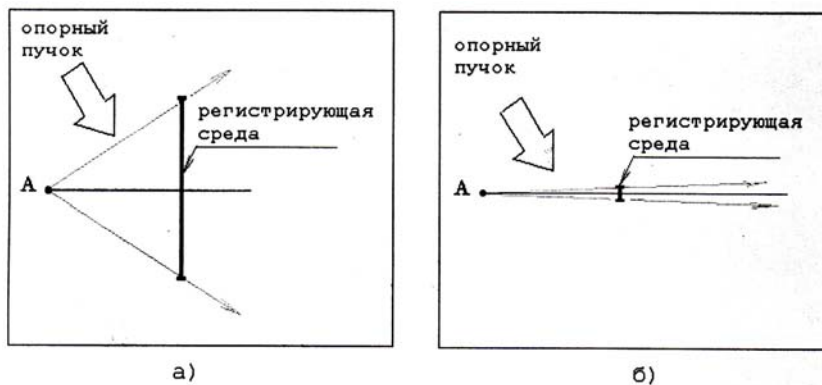


Рис.4.12.Схема записи двумерной голограммы точечного источника монохроматического излучения при использовании регистрирующей среды с разными геометрическими размерами.

При освещении полученной голограммы белым светом (рис.4.13а) вместо монохромного точечного источника A будет виден источник A , растянутый в спектр в вертикальном направлении, где A_c , A_z , A_k – изображения точечного источника различных цветов. Причем, как видно из рис.4.12а, лучи разного цвета (красный, зеленый, синий), которые формируют изображения источника A_c , A_z , A_k , попадая в глаз наблюдателя, восстанавливаются разными участками голограммы и наблюдатель видит размытое в спектр изображение источника A .

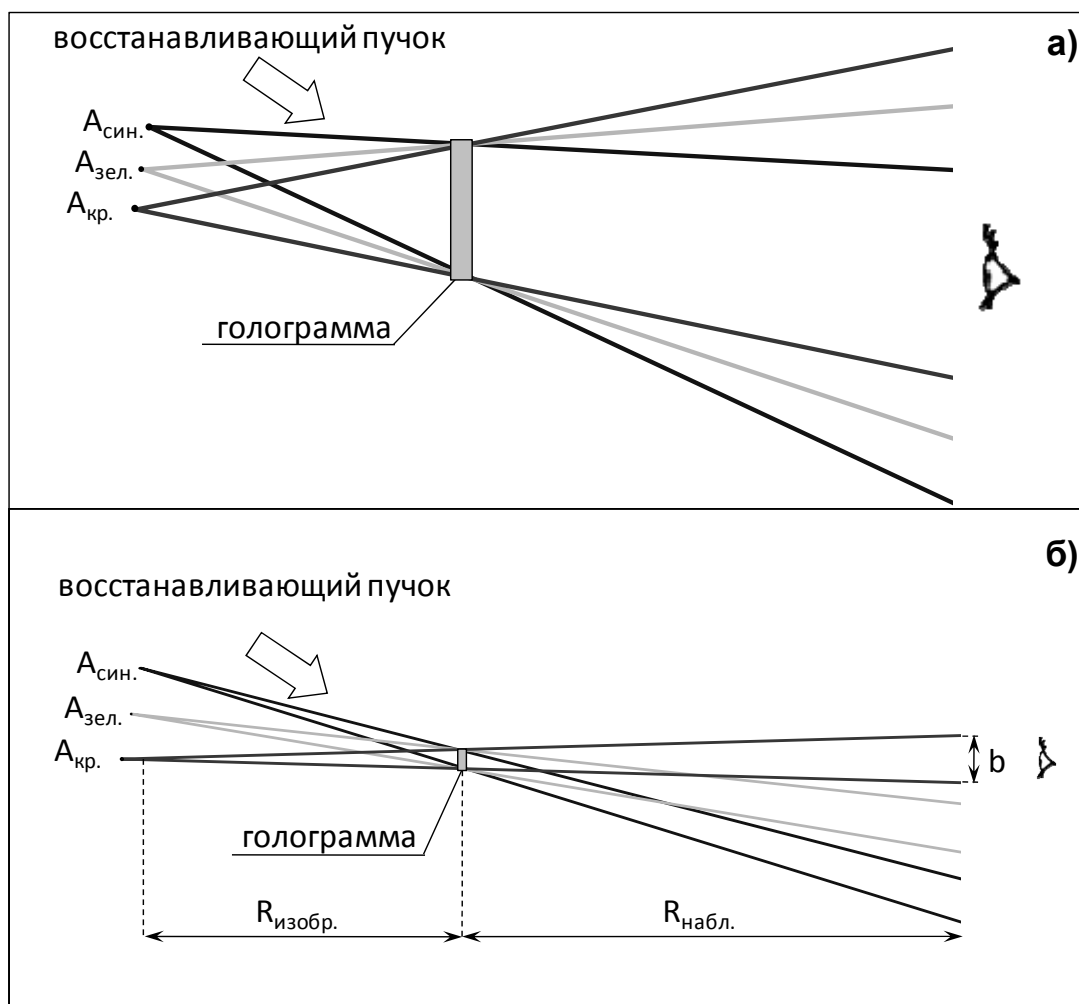


Рис.4.13. Реконструкция голограммы точечного источника белым светом.

Уменьшим угловые размеры объектного пучка в вертикальном направлении (рис.4.12б). Размеры полученной голограммы также уменьшаться (она станет похожа на щель); при ее реконструкции белым

светом (рис.4.136) наблюдатель, глаза которого расположены в горизонтальной плоскости, видит уже не спектр, а окрашенное изображение точки, цвет которого зависит от положения глаза наблюдателя, так как в глаз наблюдателя попадут лучи, прошедшие через один и тот же участок голограммы - либо красный, либо зеленый, либо синий (рис.4.136). При этом важным параметром в данной схеме является размер «окна» наблюдения (b), при котором изображение источника кажется «неразмытым».

Качество наблюдаемого изображения при освещении такой голограммы зависит от расстояния до голограммы наблюдателя ($R_{\text{набл}}$) и изображения объекта ($R_{\text{изобр}}$), а также от размера окна наблюдения – b , определяемого в данном случае размером голограммы. Для получения изображения объекта хорошего визуального качества соотношение между этими параметрами определяется формулой [7]

$$b = R_{\text{набл}} \lambda / R_{\text{изобр}}$$

На практике обычно используют: $b = (2-8)$ мм, $R_{\text{изобр}} = (2-3)$ см, $R_{\text{набл}} = (30-50)$ см.

Различные схемы записи радужных голограмм используют, как правило, щелевые диафрагмы для ограничения параллакса в одном, обычно вертикальном, направлении и предусматривают наблюдение изображения при расположении глаз наблюдателя в другом, горизонтальном направлении.

Процесс получения тиража радужных голограмм схематично представлен на рис.4.14.

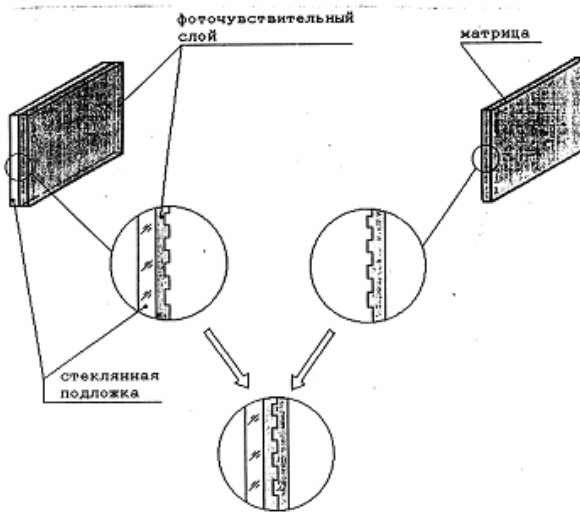
Свойства и особенности применения радужных голограмм подробно рассмотрены в работах [7,8] и монографии [9].

Голограмма сфокусированного изображения – голограмма, при регистрации которой изображение объекта (либо сам объект), проектируемое обычно оптической системой, располагается в плоскости регистрирующей среды или вблизи нее (см. рис.4.15). При освещении такой голограммы центральная (или какая-либо другая) плоскость сечения трехмерного изображения объекта совпадает 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 позволяет снизить требования к размерам, пространственной когерентности и монохроматичности источника излучения при восстановлении объектной волны и увеличить яркость изображения объекта, благодаря ограничению угла наблюдения.

**ПОЛУЧЕНИЕ ТИРАЖА РАДУЖНЫХ ГОЛОГРАММ
1 ЭТАП**

ПОЛУЧЕНИЕ ГОЛОГРАММЫ-ОРИГИНАЛА
(мастер-голограммы) на
рельефографическом материале

ПОЛУЧЕНИЕ МАТРИЦЫ для
тиражирования голограмм



**ПОЛУЧЕНИЕ ТИРАЖА РАДУЖНЫХ ГОЛОГРАММ
2 ЭТАП**

КОПИРОВАНИЕ
голограммы-оригинала на
полимерную пленку

ДОРАБОТКА ТИРАЖА
-нанесение отражающего
(металлического) покрытия
-нанесение защитного
(клеевого) покрытия
-вырубка из пленки отдельных
голограмм и элементов
-оформление в рамку отдельных
голограмм и элементов

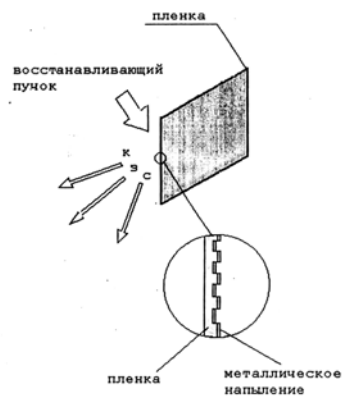
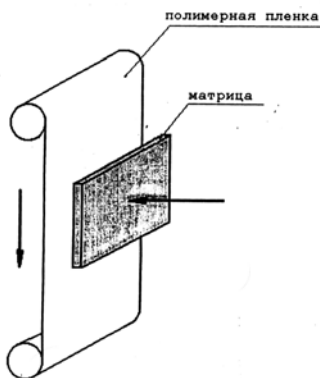


Рис.4.14.Схема получения тиража радужных голограмм.

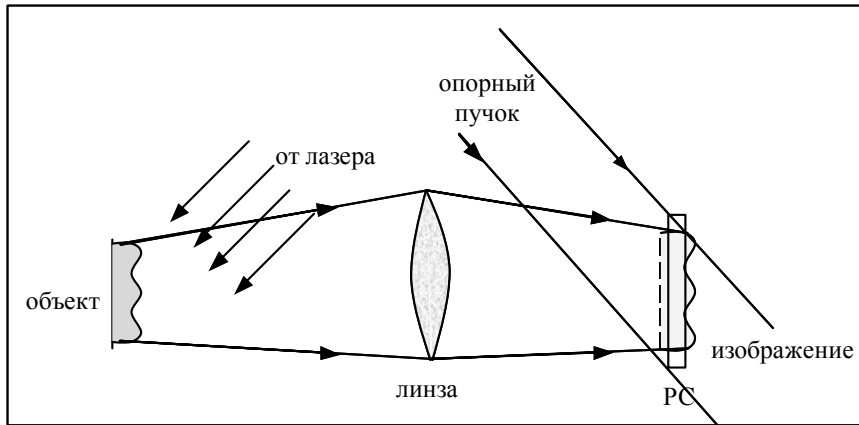


Рис.4.15. Принципиальная схема регистрации голограммы сфокусированного изображения.

Особенности голограммы сфокусированного изображения:

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

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

Композиционные голограммы

Для получения таких голограмм используют метод, который позволяет получать голограммы, воспроизводящие объемные изображения предметов и сцен, освещенных естественным светом. Метод предложен в 1967 г американским исследователем Р.В. Полем (R.V. Pole) [10], сочетает голографию и фотографию (интегральную фотографию Г. Липпмана [11]) и рассмотрен Ю.Н. Денисюком в 1975 г. [12] как один из самых перспективных методов для сокращения избыточности голографической записи (на стадии формирования системы ракурсов) при воспроизведении полной иллюзии реальных сцен и событий.

Суть метода, описание которого приведено в работе Ю.Н.Денисюка «Изобразительная голография» [5], заключается в следующем.

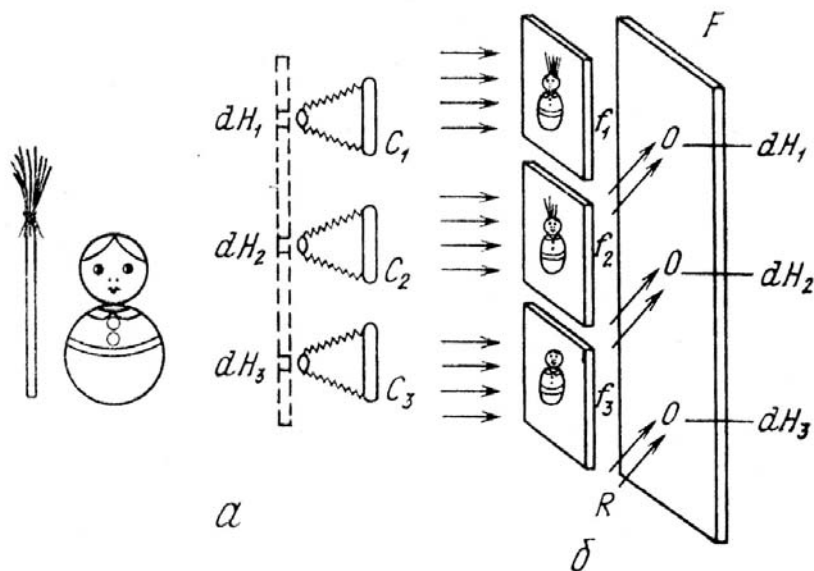


Рис.4.16.Схема регистрации сцены (а) и регистрации (синтеза) композиционной голограммы (б).

На первом этапе производится многоракурсная съемка сцены методами обычной фотографии (рис.4.16а) – в данном случае матрешка с расположенной за ней метлой фотографируется (регистрируется) из многих точек зрения dH_1 , dH_2 , dH_3, \dots при помощи фотоаппарата, который последовательно занимает положения C_1 , C_2 , C_3, \dots . В результате получают множество фотографий-ракурсов изображаемой сцены f_1 , f_2 , f_3, \dots , на которых сцена зарегистрирована с различных сторон. В частности, на фотографии f_3 матрешка закрывает метлу; на фотографии f_1 конец метлы виден над головой матрешки.

На втором этапе производится регистрация (синтез) композиционной голограммы (рис.4.16б) - фотографии-ракурсы изображаемой сцены записываются на фотопластинку F в виде отдельных голограмм dH_1 , dH_2 , dH_3, \dots с помощью референтного луча R (рис.4.16б). При этом положение регистрируемых голограмм dH_1 , dH_2 , dH_3, \dots должно точно соответствовать данному ракурсу изображаемой сцены на первом этапе, как это показано на рис.4.16а. Полученная (синтезированная) таким образом композиционная голограмма состоит из большого количества отдельных голограмм, каждая из которых представляет определенный ракурс предмета (или сцены).

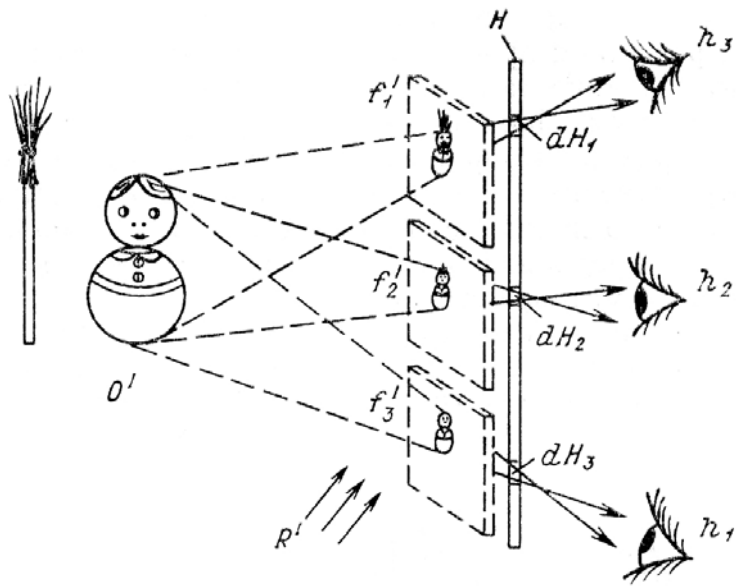


Рис.4.17.Наблюдение изображения предмета с помощью композиционной голограммы.

При считывании полученной композиционной голограммы используется луч R_1 (см. рис.4.17), совпадающий по направлению с референтным лучом R , использовавшимся при регистрации голограммы. Каждый из участков композиционной голограммы, представляющий собой отдельную голограмму, восстанавливает изображение зарегистрированного на нем ракурса предмета. Поскольку положение участков голограммы с записанными на ней ракурсами точно совпадает с положением точек, из которых эти ракурсы регистрировались, наблюдатель, перемещающийся относительно поверхности композиционной голограммы, регистрирует такую смену ракурсов, которая точно соответствует смене ракурсов при наблюдении реального предмета. В частности, в положении h_1 наблюдатель видит изображение ракурса f_3 , восстановленное участком dH_3 ; перемещаясь в точку h_2 , он через участок dH_2 видит изображение ракурса f_2 . Это изображение уже несколько отличается от того, которое наблюдалось из точки h_1 : на ракурсе f_2 из-за головы матрешки начинает показываться конец метлы. На ракурсе f_1 метла выдвигается еще больше. Правильная закономерная смена ракурсов при изменении положения точки наблюдения композиционной голограммы создает у наблюдателя впечатление, что он осматривает реальный предмет.

Особенности метода получения композиционных голограмм:

- Позволяет создать иллюзию объемной сцены произвольных пространственных размеров
- Для записи композиционной голограммы требуется регистрирующая среда более низкого разрешения, чем для записи голограмм Денисюка
- При наблюдении изображения сцен и предметов не требуется дополнительных оптических элементов (линз и т.п.)
- Процесс получения голограмм сложный и трудоемкий.

Как писал в 80-е годы XX-го столетия Ю.Н. Денисюк: *«Техника синтеза композиционных голограмм весьма сложна, и создаваемые ими изображения пока что недостаточно совершенны, однако нет сомнения в том, что именно этот метод открывает широкие перспективы внедрения голографии в изобразительную технику. В частности, по-видимому, именно композиционная голография будет положена в основу создания голографического объемного кинематографа и телевидения, воспроизводящих полную иллюзию действительности происходящих перед зрителем событий»*. Метод получения изобразительных голограмм путем синтеза композиционных голограмм в XX-м веке, действительно, не получил широкого распространения из-за трудоемкости реализации данного процесса, но он явился основой современных способов получения объемных изображений, сочетающих достижения изобразительной голографии и компьютерных технологий.

Как правило, изображение сцены (или объекта) для записи современной композиционной голограммы создается на компьютере, который представляет изображение объекта с различных точек зрения в виде миллионов отдельных картинок-ракурсов. Каждый из таких ракурсов является основой для регистрации так называемой «пиксельной» голограммы, размер которой может быть очень маленьким (существенно меньше одного миллиметра). Проектируются и создаются специальные печатающие устройства для регистрации «пиксельных» голограмм на светочувствительный материал для получения композиционной голограммы, считывание которой можно производить источником излучения со сплошным спектром [см., например, 13].

Несмотря на то, что техника создания объемных изображений с помощью композиционных голограмм по-прежнему является достаточно дорогой и трудоемкой, но она предоставляет уникальные зрелищные и демонстрационные возможности, с использованием которых связаны дальнейшие перспективы развития различных направлений демонстрационных технологий. Зрелищность и уникальный характер

получаемых демонстрационных эффектов во многих случаях полностью компенсируют затраты на создание таких голограмм.

Литература

1. Островский Ю.И. Голография и ее применение. - Л.:Наука. - 1973. - 180с.
2. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. - М.:Мир. – 1973. - 686с.
3. Вьено Ж.-Ш., Смигальский П., Руайе А. Оптическая голография. Развитие и применение / Перевод под ред. Ю.Н.Денисюка. – М.:Мир. 1973. – 214с.
4. Оптическая голография / Под ред. Колфилда Г. - М.:Мир. 1982. - т.1,т.2. – 736 с.
5. Денисюк Ю.Н. Изобразительная голография // Труды ГОИ. 1988. Т.68. Вып.202. с.212-229. (Опубликовано в международном ежегоднике «Наука и человечество», 1982, М.:Знание)
6. Андреева О.В., Парамонов А.А., Андреева Н.В. Прикладная голография. Методические материалы к экспериментальному практикуму. – СПб: СПбГУИТМО. 2008. – 150 с.
7. Гальперн А.Д., Парамонов А.А. О характеристиках голограмм, полученных с помощью модифицированной схемы записи "радужных" голограмм // Оптика и спектроскопия, 1989, т.66, вып.3, с.655- 661.
8. Гальперн А.Д., Парамонов А.А. и др. Регистрация и копирование "радужных" голограмм псевдоцветных изображений // Оптико-механическая промышленность, 1986, №4, с.36-38.
9. Марипов Б.А. Радужная голография. – Фрунзе. - 1988.
10. Pole R.V. Appl. Phys. Letters. 1967. V.10. №1. P. 20.
11. Lippman G. C. R. Acad. Sci. 1908. V.146. P. 446.
12. Денисюк Ю.Н. Журн. технич. физики. 1975. т.XLV. №12. с.2574.
13. www.ultimate-holography.com

§5. Типы голограмм по характеру фотоотклика регистрирующей среды.

В данном разделе рассмотрены основные типы голограмм, которые определяются характером отклика регистрирующей среды (РС) на световое воздействие, т.е. характером фотоотклика РС. Регистрирующая среда представляет собой светочувствительный материал, в котором 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 .

Оптический параметр среды, модуляция которого отображает распределение интенсивности в регистрируемой интерференционной картине, определяет тип голограммы: амплитудная, фазовая, рельефно-фазовая.

В зависимости от того, какой характер носят изменения параметров регистрирующей среды при записи – обратимый или необратимый, различают реверсивные РС (с обратимым фотооткликом) и нереверсивные РС (с необратимым фотооткликом). При этом зарегистрированные голограммы могут быть динамическими или статическими. Таким образом, при рассмотрении вышеуказанных случаев тип голограммы определяется характеристиками используемой регистрирующей среды [1-6].

Рассмотрим типы голограмм в зависимости от оптического параметра среды, модуляция которого отображает распределение интенсивности в регистрируемой интерференционной картине.

Амплитудная голограмма

Амплитудной принято называть голограмму, полученную в регистрирующей среде, в которой под воздействием интерференционного поля произошли изменения коэффициента поглощения. Таким образом, дифракция излучения на амплитудной голограмме обусловлена модуляцией (периодическим изменением) коэффициента поглощения среды. Амплитудные голограммы получают на галогенидосеребряных фотографических материалах, фотохромных средах, термопластических материалах и т.д. Эффективность амплитудных голограмм, как правило, невысока и зависит от типа и характера записи голограммы. 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.

Следует отметить, что при прохождении излучения через амплитудную голограмму изменяется как его амплитуда, так и фаза: изменение амплитуды происходит за счет модулированного изменения коэффициента поглощения среды, а изменение фазы - за счет того, что регистрирующая среда имеет показатель преломления, отличный от показателя преломления вакуума. Ниже приведена формула плоской монохроматической волны (в скалярном приближении), распространяющейся в направлении z

$$E = E_0 \cos(\omega t - kz) = E_0 \cos(\omega t - \varphi) = \operatorname{Re} E_0 e^{i\omega t} e^{-ikz} \quad (5.1)$$

$$\varphi = kz = (2\pi/\lambda) z, \text{ где } k - \text{волновой вектор.}$$

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

$$E_2 / E_1 = t \cdot e^{-ikT} \quad (5.2),$$

$$\text{где } t = e^{-\alpha T} \quad (5.3).$$

При работе с поглощающими средами, как правило, используют следующую терминологию:

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

α – амплитудный коэффициент поглощения;

τ – пропускание по интенсивности.

$$\tau = t^2 = e^{-2\alpha L} \quad (5.4)$$

Часто используют коэффициент поглощения по интенсивности – γ

$$\gamma = 2\alpha \quad (5.5)$$

Оптическая плотность излучения – D – десятичный логарифм величины, обратный коэффициенту пропускания (по интенсивности)

$$D = -\lg \tau = 2\alpha L \lg e = 2\alpha L \cdot 0,43 \quad (5.6).$$

При рассмотрении амплитудной голограммы-решетки (рис.2.3), полученной в линейном режиме записи, изменение амплитудного коэффициента поглощения в направлении вектора решетки (коллинеарного оси x) будет определяться выражением

$$\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot \cos(2\pi x/d) \quad (5.7),$$

где α_0 – среднее значение коэффициента поглощения; α_1 - амплитуда изменения коэффициента поглощения; d – период решетки. Величина α_1 определяет эффективность голограммы и зависит от условий получения голограммы и параметров регистрирующей среды.

Фазовая голограмма

Фазовой принято называть голограмму, если она получена в регистрирующей среде, в которой под воздействием интерференционного поля произошли изменения показателя преломления или толщины материала. Таким образом, дифракция излучения на фазовой голограмме обусловлена модуляцией (периодическим изменением) показателя преломления среды либо модуляцией (периодическим изменением) толщины среды (рельефографические материалы). Статические фазовые голограммы получают на галогенидосеребряных 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.

Регистрирующие среды (или светочувствительные материалы), в которых распределение интенсивности излучения в регистрируемом световом поле преобразуется в распределение изменения показателя

преломления среды, носят название «фоторефрактивные регистрирующие среды».

Для получения динамических фазовых голограмм обычно используют фоторефрактивные регистрирующие среды: электрооптические и жидкие кристаллы; прозрачные и слабопоглощающие нелинейные оптические среды. Максимальные значения дифракционной эффективности фазовых голограмм - 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.

Фазовая голограмма	
Двумерная	Трёхмерная
ДЭ = 33%	ДЭ = 100%

При рассмотрении фазовой голограммы-решетки (рис.2.3), полученной в линейном режиме записи, изменение амплитудного коэффициента поглощения в направлении вектора решетки (коллинеарного оси x) будет определяться выражением

$$n = n_0 + n_1 \cdot \cos(2\pi x/d) \quad (5.8),$$

где n_0 – среднее значение показателя преломления; n_1 - амплитуда изменения показателя преломления; d – период решетки. Величина n_1 определяет дифракционную эффективность голограммы и зависит от условий получения голограммы и параметров регистрирующей среды.

Изменения параметров регистрирующей среды при записи голограмм могут быть обратимыми и необратимыми.

На начальных этапах развития голографии получение голограмм базировалось исключительно на использовании регистрирующих сред с необратимым фотооткликом, которые позволяли получать так называемые статические голограммы, параметры которых не изменялись со временем. Свои первые голограммы Габор, Денисюк, Лейт и Упатниекс получили именно на таких средах: они использовали традиционные фотопластинки - галогенидосеребряные регистрирующие материалы.

Статическая голограмма

Голограмма, оптические параметры которой после ее получения не изменяются во времени, получила название статической голограммы. Для

получения статических голограмм, как правило, используют так называемые «регистрирующие среды со скрытым изображением», в которых 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. Процесс получения высокоэффективных статических голограмм на таких средах 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, защитная голография и т.д.

Особенности статических голограмм:

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

На рис.5.1 и рис.5.2 приведены примеры применения статических голограмм.

Примеры изобразительных голограмм



Рис.5.1. Применение статических голограмм: изобразительные голограммы различных объектов, полученные по методу Ю.Н.Денисюка.

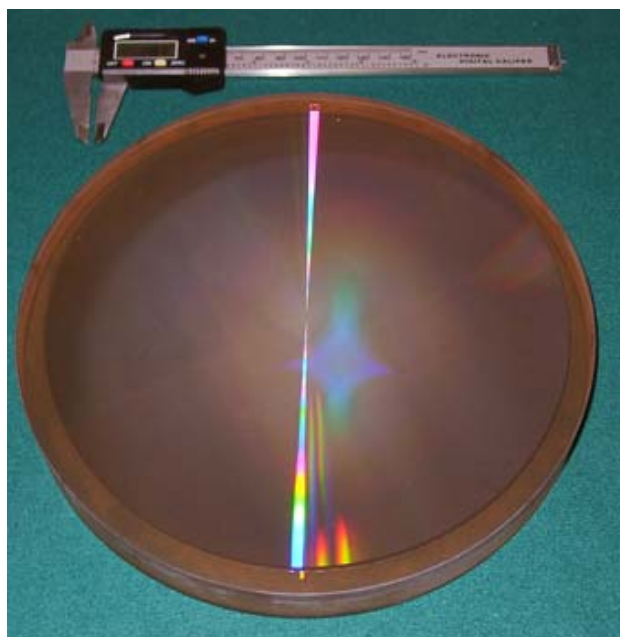


Рис.5.2. Применения статических голограмм: голограммный оптический элемент – голограмма-имитатор для контроля зеркала диаметром 8,4 м [7].

Большое значение в голографии имеет использование так называемых реверсивных динамических регистрирующих сред. Изменения параметров реверсивной регистрирующей среды, происходящие под воздействием излучения, носят обратимый характер, что является необходимым условием для получения динамических голограмм, как и динамический характер записи, который обеспечивает динамическая регистрирующая среда, в которой инициированные световым воздействием изменения параметров происходят непосредственно в процессе записи информации (под воздействием излучения). Для получения динамических голограмм обычно используют фоторефрактивные регистрирующие среды, среди которых выделяют два основных типа. Тип 1: регистрирующая среда динамическая с локальным откликом, в которой пространственное распределение фотоиндуцированного показателя преломления при записи синусоидальной интерференционной картины синфазно или противофазно распределению интенсивности в регистрируемой интерференционной картине. Тип 2: регистрирующая среда динамическая с нелокальным откликом, в которой пространственное распределение фотоиндуцированного показателя преломления при записи синусоидальной интерференционной картины сдвинуто по фазе по отношению к распределению интенсивности в регистрируемой интерференционной картине.

Динамическая голограмма

Динамическая голограмма регистрируется в среде, оптические параметры которой заметно изменяются непосредственно во время действия формирующего голограмму излучения, что приводит к дифракции излучения на голограмме в процессе ее регистрации, обуславливающей изменение характеристик записываемых волн и появление новых волн. Обычно считывание динамических голограмм 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 запись-считывание 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.). Различают стационарный и нестационарный режимы записи динамической голограммы. Стационарный режим записи, при котором амплитуда модуляции оптических параметров среды остается неизменной во времени, возможен, если время регистрации голограммы существенно превышает время релаксации среды. Нестационарный режим записи реализуется, если время записи голограммы меньше времени ее релаксации (или сравнимо с ним). При этом, благодаря возникающему пространственному рассогласованию голограммы относительно интерференционной картины формирующих ее волн, как правило, происходит нестационарный энергообмен - перераспределение энергии между взаимодействующими в объеме регистрирующей среды волнами, в результате которого возможно значительное усиление слабых волн за счет более сильных. 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 фоторефрактивные регистрирующие среды: электрооптические и жидкие кристаллы; резонансно поглощающие пары металлов, эффекты вынужденного нелинейного рассеяния света и т.д.

Особенности динамических голограмм:

- ☉ Решение задач оптической обработки информации в реальном времени;
- ☉ Возможность управлять интенсивностью, формой и направлением распространения волн;
- ☉ Использование нелинейных регистрирующих сред и более мощных источников излучения, чем используют в оптической голографии для получения статических голограмм.

Следует отметить, что эффекты, связанные с динамическим характером записи (когда интерференционная картина записывается в регистрирующей среде, которая реагирует на излучение непосредственно в процессе его воздействия), проявляются также и при записи статических голограмм на неревесивных средах. Это происходит при регистрации голограмм на светочувствительных материалах, которые не образуют скрытого изображения и не нуждаются в проведении постэкспозиционного усиления зарегистрированной голограммы. Такие эффекты (особенно при использовании больших экспозиций) свойственны многим средам, в том числе щелочно-галоидным кристаллам, кристаллам ниобата лития, полимерным материалам на основе фенантрехинона, материалу реоксан и др. С исследования

именно этих эффектов, свойственных записи информации на щелочно-галоидных кристаллах, ниобате лития, а также на реоксане, и было начато исследование закономерностей динамических голограмм [4,5,8].

При записи динамических голограмм возникает ряд интересных явлений, перспективных для практического использования. Рассмотрим явление нестационарного энергообмена (рис.5.3), которое возникает при записи голограмм на регистрирующих динамических средах с нелокальным откликом [4].

На кристалл V падают две плоские волны R и S, образующие стоячую волну с распределением интенсивности $I(x)$ (рис.5.3а – график слева). Благодаря свойствам кристалла ниобата лития (регистрирующая среда с нелокальным откликом) возникающее под действием этой стоячей волны распределение показателя преломления (гармоника распределения показателя преломления - фазовая решетка с максимумами, которые на рис.5.3 обозначены z_1, z_2, z_3) окажется несколько смещенной относительно регистрируемой интерференционной картины – вверх или вниз в зависимости от направления оптической оси кристалла С. Оказывается, что если упомянутый сдвиг равен четверти периода решетки, то по мере записи голограммы энергия выходящих из кристалла волн R^1 и S^1 , первоначально имеющих одинаковые амплитуды, начнет перераспределяться. При этом волна R^1 усиливается, а S^1 ослабляется. На рис.5.3б приведены зависимости интенсивности этих волн от времени.

Физический смысл этого явления заключается в следующем. Как видно из рис.5.3 при сдвиге на четверть периода максимумы интенсивности поля стоячей волны попадают на какие-то определенные «склоны» гармоники распределения показателя преломления. В результате оказывается, что волновое поле проходит через кристалл таким образом, что волны R и S становятся неравноправными. Одна из них (в данном случае R) отражается от гармоники показателя преломления как от более плотной среды, а другая волна (S) – как от менее плотной среды.

В такой ситуации, как известно, одна из составляющих при отражении теряет по фазе половину длины волны, а вторая сохраняет ту же фазу. Та компонента, которая, отразившись от склона гармоники показателя преломления, потеряла половину периода, сложится с прошедшей сквозь склон волной с обратным знаком. Амплитуды этих двух волн вычтутся друг из друга, и интенсивность соответствующей выходящей из кристалла суммарной волны уменьшится. Интенсивность другой покидающей кристалл волны, включающая компоненту, не изменившую фазу при отражении от структуры голограммы, соответственно увеличится.

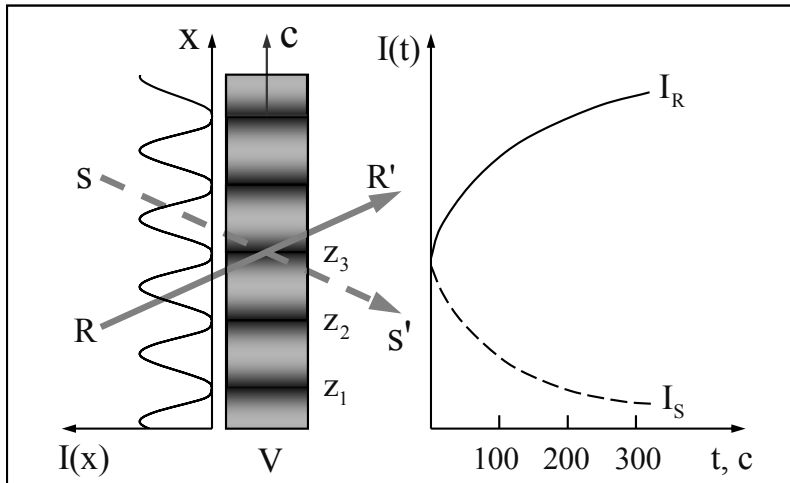


Рис.5.3.Иллюстрация явления нестационарного энергообмена в кристалле ниобата лития. Направленная передача энергии между волнами R и S (интерферирующими в объеме V) – а; $I(t)$ – зависимость интенсивности выходящих волн (I_S и I_R) от времени экспозиции динамической голограммы – б. [4]

Данное явление было предложено использовать в лазерных системах для коррекции формы волнового фронта: с помощью нестационарного энергообмена волн R и S, обеспеченного динамической сдвиговой голограммой, происходит перекачка энергии из пучка мощного лазерного излучения R с деформированным волновым фронтом в слабый по мощности пучок S с требуемой формой волнового фронта – рис.5.4.

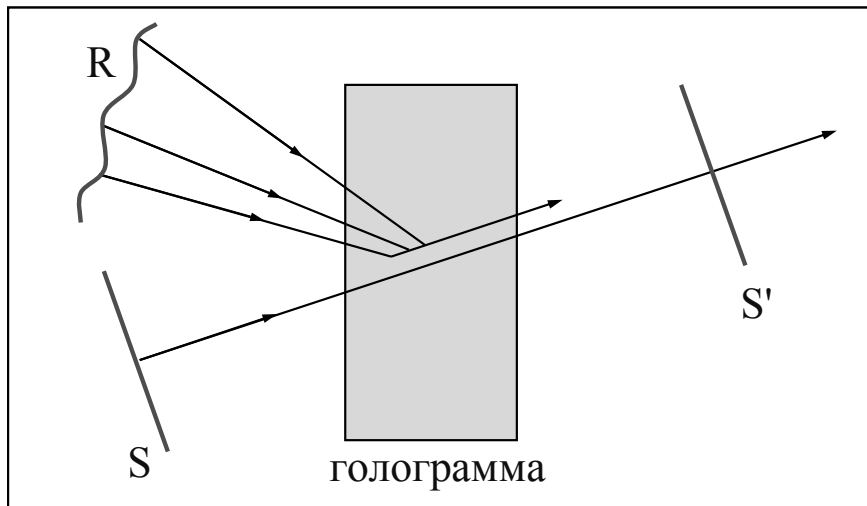


Рис.5.4.Коррекция формы волнового фронта с помощью динамической сдвиговой трехмерной голограммы.[4]

Литература

1. Денисюк Ю.Н. Принципы голографии. - Л.:ГОИ. 1978. - 125с.
2. Островский Ю.И. Голография и ее применение. - Л.:Наука. 1973. - 180с.
3. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. - М.:Мир. 1973. - 686с.
4. Денисюк Ю.Н. Некоторые проблемы и перспективы голографии в трехмерных средах // В кн.: Оптическая голография / Под ред. Колфилда Г. - М.:Мир. 1982. т.2.- с.691-729.
5. Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В. Фоточувствительные электрооптические среды в голографии и оптической обработке информации. – Л.:Наука. 1983. - 270с.
6. Оптическая голография / Под ред. Колфилда Г. - М.:Мир. 1982. - т.1,т.2. – 736 с.
7. Полещук А.Г. Методы и системы для интерферометрического контроля асферической оптики с помощью синтезированных голограмм. Труды конференции «Голография экспо-2008». – СПб. 2008. С. 21-24.
8. Дмитриев В.Г., Тарасов Л.В. Прикладная нелинейная оптика. - М.:Физматгиз. 2004.

§6. Основные свойства голограмм.

В этом разделе рассмотрим основные свойства голограмм, которые обусловлены спецификой голографического метода и представляют новые возможности по сравнению с традиционными методами:

- возможность восстановления объектной волны;
- делимость голограммы;
- воспроизведение широкого диапазона градаций яркости объекта;
- обращение волнового фронта;
- ассоциативные свойства;
- мультиплицирование изображения;
- предельные параметры по информационной ёмкости.

Рассмотрение будем по возможности иллюстрировать с помощью эффектов, наблюдаемых в изобразительной голографии, так как возможность демонстрировать изобразительные голограммы значительно облегчает объяснение сложных оптических явлений, даже если они напрямую не относятся к изобразительной технике.

Восстановление объектной волны

С помощью голограммы имеется возможность воспроизвести объектную волну – это значит восстановить параметры волны - амплитуду, фазу, спектральный состав, состояние поляризации, включая распределение параметров волны в пространстве и их изменение во времени.

«Уникальный характер голографии, как фактически единственного способа объективной записи информации о форме и структуре предметов, предопределил необычайно широкий диапазон ее практических приложений, простирающийся от тяжелого машиностроения до исследований в области термоядерной плазмы и лингвистики» [1]. Изобразительные голограммы демонстрируют свойство восстанавливать волновое поле объекта с наибольшей наглядностью даже для людей далеких от техники.

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

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

Весьма существенны также и эффекты стереоскопического, бинокулярного видения. Эти эффекты возникают благодаря тому, что

глаза наблюдателя, расположенные в двух разных точках, воспринимают несколько различные изображения. Мозг регистрирует эти различия и извлекает из них информацию о расстояниях до предметов.

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

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

Именно на воспроизведении светового поля, заключенной в котором информации мы так доверяем, и основан механизм воссоздания образов с помощью голограммы». [2]

В заключение обсуждения данного свойства голограммы приведем еще одно высказывание Ю.Н. Денисюка о возможности создания оптических копий объекта. «Очевидно, что предельным случаем структуры, свойства которой совпадают с оптическими свойствами объекта, является точная копия предмета съемки. Естественно, что такая копия восстановит волновое поле объекта при освещении ее излучением любого направления и любого спектрального состава. Если, однако, объект освещается излучением с ограниченным спектром и определенным направлением распространения, то он воздействует на волновое поле только частью своих оптических свойств. Модель этой части, обладающая способностью рассеивать данное излучение так же, как и объект, может вместе с тем сильно отличаться от него по своему внешнему виду». [3]

Таким образом, свойство голограммы, связанное с возможностью восстановления объектной волны, и достижение теоретического предела в этом вопросе – создание полноценной оптической копии объекта – является не только технической, но и философской проблемой.

Восстановленная объектная волна содержит такое количество информации, которую не может «освоить» наблюдатель и которая, как правило, не может быть полностью передана с помощью современных средств связи и систем передачи информации. Поэтому большинство современных технических приложений голографии ориентированы на сокращение передаваемой информации. Основная трудность сокращения избыточности записанной на голограмме информации связана с тем, что такое сокращение должно осуществляться с учетом особенностей зрительного аппарата человека.

«Хорошо разработана только одна группа методов сокращения избыточности, основанная на пренебрежении информацией, связанной с так называемым вертикальным параллаксом. При определенных условиях

изображения, лишенные вертикального параллакса, создают иллюзию объемности, хотя и кажутся несколько безжизненными.

Особо удачным в этом отношении следует признать метод «радужных голограмм». Успех метода был предопределен тем, что в этом случае не очень ценная информация о вертикальном параллаксе «разменивается» на возможность реконструировать двумерную голограмму обычным источником белого света.» [2]

В большинстве научно-технических приложений используют возможности голографии не только для восстановления объектной волны, но и для ее преобразования самыми различными способами.

Делимость голограммы

Делимость голограммы – одно из основных свойств, обусловленное спецификой голографического метода записи информации, заключающееся в том, что восстановление объектной волны возможно каждым отдельным, сколь угодно малым, участком голограммы. 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. Естественно, что уменьшение «окна» (площади рассматриваемой голограммы) приводит к ухудшению разрешения в изображении, получаемом с помощью восстановленной объектной волны.

Существуют определенные экспериментальные «тонкости», связанные с условиями проведения голографического эксперимента, которые позволяют в условиях конкретного эксперимента получить максимальный голографический эффект, в том числе и связанный со свойством делимости голограммы. В первую очередь это относится к условию освещения регистрирующей среды объектной волной. Максимальный голографический эффект достигается при условии, что при записи голограммы каждая точка объекта освещает всю поверхность регистрирующей среды. Именно такая ситуация показана на рис.6.1а: регистрация голограммы диффузно рассеивающего объекта производится таким образом, что излучение, рассеянное каждой отдельной точкой объекта освещает всю поверхность регистрирующей среды. Наблюдение изображения целого объекта при считывании такой голограммы (рис.6.1б) можно производить узким пучком через любой участок голограммы.

При получении голограммы нерассеивающего объекта (рис.6.1в) в такой же схеме регистрации излучение от определенной точки объекта

освещает только определенный участок голограммы. При считывании такой голограммы пучком ограниченного размера наблюдатель увидит только ту часть объекта, излучение от которой освещало этот участок голограммы при регистрации (рис.6.1г).

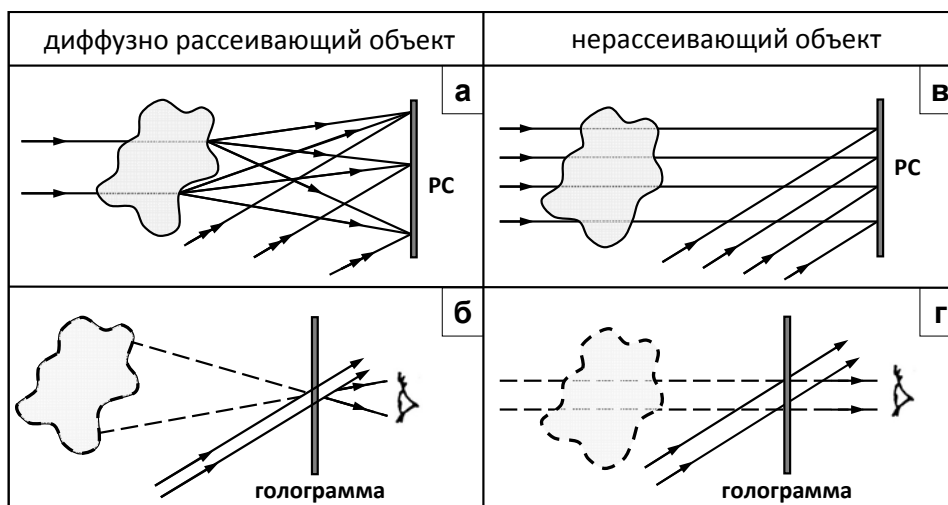


Рис.6.1. Регистрация голограммы (а,в) и наблюдение изображения (б,г) при использовании диффузно рассеивающего объекта (а,б) и нерассеивающего объекта (в,г).

Для того чтобы получить голограмму нерассеивающего объекта свободную от данного недостатка, в голографических экспериментах используют диффузные экраны, или диффузоры (см.рис.6.2). Такой экран представляет собой диффузный рассеиватель (например, матовое стекло), обеспечивающий рассеяние света в большом телесном угле (идеальный рассеиватель - по всем возможным направлениям). Экран устанавливается таким образом, чтобы сформировать объектный пучок, удовлетворяющий требованиям создания максимального голографического эффекта. При этом важными параметрами являются расстояние от экрана до объекта и рассеивающие свойства (индикатриса рассеяния) экрана. При установке диффузного экрана должны быть выполнены следующие условия:

- Когерентность исходной волны, освещающей экран, должна сохраняться по всей площади экрана;
- Максимальная длина пути излучения от источника до голограммы через экран не должна превышать длину когерентности источника излучения;
- Экран должен быть неподвижным во время экспонирования голограммы – к стабильности данного элемента предъявляются

высокие требования, особенно при использовании непрерывных источников излучения.

- Использование диффузного освещения при регистрации голограммы выдвигает повышенные требования к разрешающей способности регистрирующей среды.

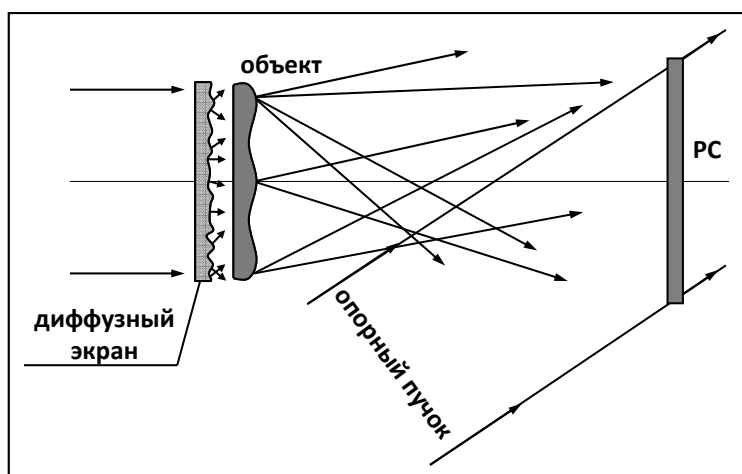


Рис.6.2.Получение голограммы при освещении прозрачного (нерассеивающего) объекта через диффузный экран [4].

Таким образом, если при регистрации голограммы каждая точка объекта освещает всю поверхность регистрирующей среды, то восстановление объектной волны возможно каждым отдельным, сколь угодно малым, участком голограммы.

Со свойством делимости тесно связана нечувствительность, вернее, очень малая чувствительность голографического изображения к повреждениям и дефектам голограммы (регистрирующей среды). В то время как при использовании изображений, полученных фотографическим способом, царапина или пятно на них приводят к полному уничтожению части информации, информация, записанная на голограмме при диффузном освещении, оказывается в большой степени нечувствительной к подобным дефектам. Механизм такой устойчивости обусловлен условиями получения максимального голографического эффекта – каждая точка восстановленного изображения формируется лучами, идущими со всей площади голограммы. При повреждении части площади голограммы из процесса формирования изображения исключается только часть лучей, что приводит к уменьшению яркости восстановленного изображения, пропорциональному соотношению дефектной площади к общей площади голограммы, без потери основной информации.

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

Воспроизведение широкого диапазона градаций яркости объекта

Распределенная форма записи, свойственная голограммам, обуславливает их способность воспроизводить широкий диапазон яркости в изображении объектов, недоступный другим изобразительным технологиям. Яркость в изобразительной технике является определяющим параметром - из всех световых величин именно яркость наиболее непосредственно связана со зрительными ощущениями, так как освещенности изображений предметов, формируемых на сетчатке глаза, пропорциональны яркости этих предметов.

Яркость (L) – поверхностно-пространственная плотность светового потока, исходящего от поверхности; равна отношению светового потока $d\Phi$ к геометрическому фактору $d\Omega dA \cos\theta$: $L = d\Phi/(d\Omega dA \cos\theta)$, 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 $\text{кд}\cdot\text{м}^{-2}$; в системе энергетических фотометрических величин яркость (энергетическая) измеряется в $\text{Вт}\cdot\text{ср}^{-1}\cdot\text{м}^{-2}$.

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

Соотношение наиболее ярких и наименее ярких деталей, которое характеризует каждый объект, не могут правильно передать методы получения изображений, обладающие ограниченным диапазоном воспроизведения градации яркости объекта. 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 фотографического процесса 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, а при считывании - каждая деталь изображения формируется излучением, собранным со всей площади голограммы. В результате световой поток, направляемый в изображение яркой 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.

В таблице 6.1, приведенной ниже, рассмотрен наиболее сложный с точки зрения передачи градации яркости объект – бриллиант на бархате. Яркость объекта характеризуется излучаемым им (отраженным или рассеянным) потоком энергии. При освещении рассматриваемой композиции максимальная интенсивность отраженного (рассеянного) излучения будет наблюдаться от граней бриллианта (практически 100%), в то время как поверхность бархата отражает всего $10^{-7} - 10^{-8}$ от падающего на него излучения. Т.е. яркость деталей (граней бриллианта и бархат) различается в десятки миллионов раз – наблюдатель очень эффективно фиксирует эту разницу с помощью своего зрительного аппарата. При использовании стандартных методов галогенидосеребряной фотографии возможно передать градации яркости объекта в пределах, как правило, не превышающих соотношение наиболее ярких и наименее ярких деталей 1000:1. (Как правило, это соотношение еще меньше – 100:1). Таким образом, распределение яркости фотографического изображения оказывается искаженным по сравнению с оригиналом, особенно при передаче ярких деталей и бликов, в чем каждый мог не раз убедиться на практике, пытаясь передать яркие детали на любительском фотоснимке.

Таблица 6.1. Диапазон градаций яркости на объекте и в изображении объекта, полученном фотографическим и голографическим способом.

На объекте	В изображении на фотобумаге	В изображении, формируемом объектной волной
$10^7 - 10^8$	$<10^3$	$\sim 10^5 - 10^6$

В то же время изображение, формируемое с помощью голограммы, зарегистрированной на практически таком же фотоматериале, как и фотоснимок, «способно правильно передавать детали, яркость которых в тысячи раз превышает среднюю яркость объекта. Фактически динамический диапазон яркостей восстановленного голограммой изображения ограничивается только шумом – постоянным фоном, обусловленным, например, рассеянием на зернистой структуре материала.»

«Следует отметить, что способность голограммы правильно передавать широкий диапазон яркостей объекта имеет большое значение в изобразительной технике. Например, в голографическом портрете прежде всего поражает воспроизведение естественного блеска глаз, и только затем зритель обращает внимание на пространственные эффекты.» [2]

Обращение волнового фронта

Возможность обращения волнового фронта – возможность пустить волны «вспять», обратно к объекту [2]. Это свойство голограммы открывает возможности, недоступные для известных ранее оптике методов.

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.

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

$$\text{Исходная волна } E = \operatorname{Re} E_0 \exp \{i(\omega t - kz)\} \quad (6.1)$$

$$\text{Обращенная волна } E = \operatorname{Re} E_0 \exp \{i(\omega t + kz)\} \quad (6.2),$$

где E_0 – амплитуда волны, распространяющейся вдоль оси z ; ω – круговая частота; k – волновое число ($k = 2\pi/\lambda$); λ – длина волны.

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

Рассмотрим пример формирования восстановленной объектной волны, комплексно сопряженной объектной волне, представленный на рис.6.3 и описанный Ю.Н. Денисюком в работе [2].

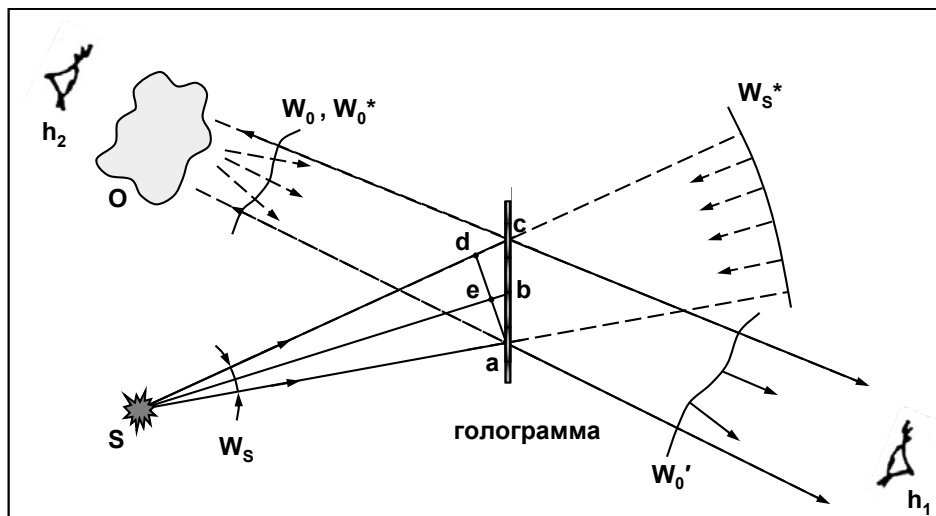


Рис.6.3. Формирование восстановленной объектной волны, комплексно сопряженной объектной волне [2].

Пусть на голограмме с помощью точечного источника зарегистрировано волновое поле некоторого объекта O , (рис.6.3). Если на такую голограмму направить сферическую волну W_s того же самого референтного источника S , то голограмма восстановит волновое поле объекта, т. е. распространяющуюся от объекта волну W_0' , соответствующую дальнейшему ходу волны W_0 , записанной на голограмме. Наблюдатель h_1 , регистрирующий это волновое поле, увидит пространственное изображение объекта O .

Предположим теперь, что та же голограмма H реконструируется сферической волной W^* , сходящейся к референтному источнику S . Оказывается, что голограмма восстановит в этом случае волну W_0^* , сопряженную по отношению к зарегистрированной на ней волне W_0 , т. е. волну, совпадающую по форме с волной W_0 , но распространяющуюся в обратном направлении. На рис. 6.3 волновые фронты прямой и сопряженной волн W_0 и W_0^* обозначены одной кривой, поскольку они совпадают, при этом лучевые векторы прямой волны нарисованы сплошными линиями, обратной — пунктиром.

Рассмотрим детально механизм этого интересного явления. Как уже отмечалось, голограмма воспроизводит на своей поверхности распределение фаз излучения, рассеянного объектом, за счет того, что пропускает только те части референтной волны, которые совпадают по

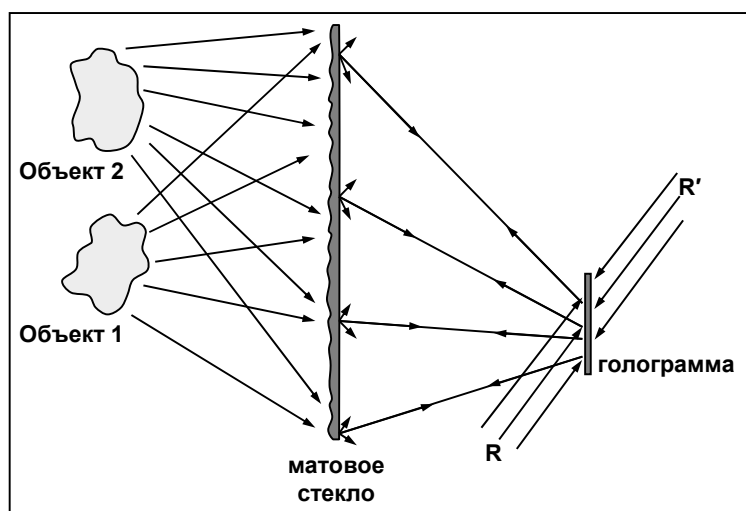
фазе с волной объекта, Задать функцию распределения фаз на некоторой поверхности означает определить степень запаздывания (опережения) колебаний во всех точках этой поверхности по отношению к какой-то одной произвольно выбранной референтной точке. Выберем в качестве референтной некоторую точку a , расположенную на одном из прозрачных участков голограммы. Как видно из рисунка, фазы колебаний на всех остальных прозрачных участках можно задать величиной отрезков, характеризующих удаление данного прозрачного участка от референтного источника S по сравнению с удалением референтной точки a . В частности, фаза в точке b характеризуется отрезком be , фаза в точке c — отрезком cd и т. д.

Рассмотрим случай восстановления голограммы сферической волны W^* , сходящейся в точке S . Нетрудно понять, что величины отрезков, характеризующих распределение фаз на голограмме, в этом случае останутся прежними, однако знак их изменится на противоположный. Действительно, если при восстановлении волной, исходящей из источника S , отрезки eb и dc характеризовали запаздывание колебаний в точках b и c по отношению к точке a , то при восстановлении волной, сходящейся в источник, эти же отрезки будут характеризовать опережение колебаний в точках c и b по отношению к колебаниям в точке a , поскольку сферическая волна W^* сначала доходит до точек c и b и только затем до точки a . Таким образом, при восстановлении сопряженной волной распределение фаз на поверхности голограммы изменит свой знак. Нетрудно понять, что новым граничным условиям соответствует восстановленная волна W^* , совпадающая по форме с волной W_0 , записанной на голограмме, однако распространяющаяся в обратном направлении — именно в этом случае опережающие части фронта превращаются в отстающие, а отстающие в опережающие.

Наблюдатель h_2 , регистрирующий созданное сопряженной волной изображение, увидит весьма удивительную картину: если при прямой реконструкции наблюдатель h_1 видел, например, барельеф лица, то при обращении голограммы наблюдатель h_2 увидит изображение того же лица, однако оно будет выглядеть так, как будто на него смотрят изнутри. Например, если наблюдатель h_1 видел выпуклый овал и выступающий вперед нос, то наблюдатель h_2 увидит вогнутый овал и нос в виде углубления. В целом такое изображение, известное под названием «псевдоскопическое», имеет вид слепка, полученного при вдавлении оригинала в пластический материал.

Следует отметить, что получение псевдоскопического изображения далеко не главное практическое следствие явления обращения волновых

фронтов, в основном это явление используется в приложениях, связанных с наблюдением сквозь неоднородные среды.» [2]



Схема, поясняющая суть метода компенсации искажений, возникающих наблюдении объектов сквозь оптически неоднородные среды, основанного на обращении хода лучей с помощью голограммы [2].

Схема, поясняющая суть метода компенсации искажений, возникающих наблюдении объектов сквозь оптически неоднородные среды, основанного на обращении хода лучей с помощью голограммы, представлена на рис.6.4. Излучение объектов O_1 и O_2 проходит через оптически неоднородную среду, например, матовое стекло. На первый взгляд кажется, что в прошедшем через матовое стекло излучении информация об объекте безвозвратно потеряна. Во всяком случае, вместо объектов виден равномерный фон. Для того, чтобы снова восстановить изображение, рассеянное матовым стеклом, излучение регистрируется на голограмме H с помощью референтного луча R . Экспонированная таким образом и проявленная голограмма устанавливается относительно матового стекла в прежнее положение, и на нее направляется излучение R' , сопряженное по отношению к излучению R , падавшему на голограмму при ее записи. Ход лучей через голограмму обращается, восстановленное излучение идет через неоднородную среду строго по обратному направлению и приобретает фазовые набеги обратного знака. В результате внесенные матовым стеклом искажения компенсируются, и на выходе возникают изображения объектов O_1 и O_2 . [5]

Изобразительные голограммы незаменимы при демонстрации явления «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.6.5 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.

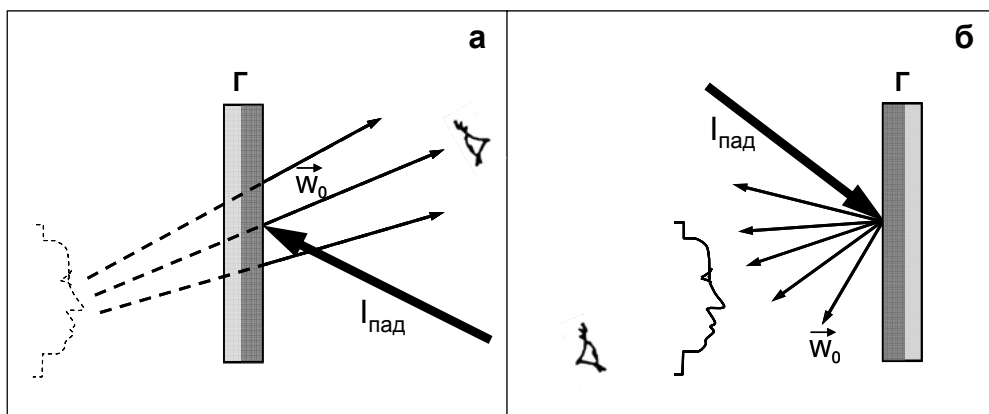


Рис.6.5. Наблюдение изображения объекта с помощью голограммы Денисюка при использовании исходной опорной волны (а) и обращенной (б). $I_{пад}$ – падающая на голограмму волна, предназначенная для считывания информации; W_0 – восстановленная объектная волна, формирующая при наблюдении мнимое (а) и действительное (б) изображение объекта.

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

зеркалом). Многие оптические схемы адаптивной оптики используют явление обращения волнового фронта.

Ассоциативные свойства голограммы

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

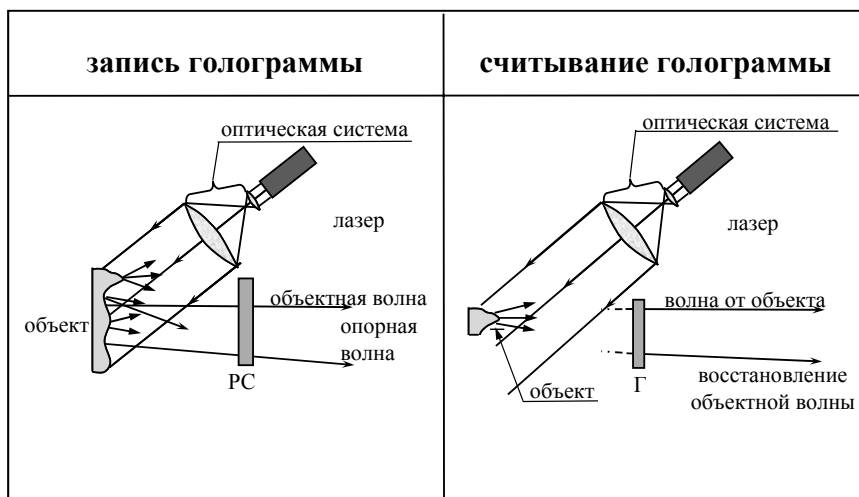


Рис.6.6. Иллюстрация ассоциативных свойств голограммы – принципиальная схема записи и считывания безопорной голограммы.

Безопорная голограмма – голограмма, при записи которой не используется опорная (референтная) волна и голограмма регистрируется излучением только объектной волны в объемной регистрирующей среде. Интерференционная структура голограммы обусловлена когерентным взаимодействием излучения различных частей объекта. Такая схема демонстрирует ассоциативные свойства голограммы – восстановление объектной волны при освещении голограммы излучением, сформированным только отдельным участком объекта.

При получении безопорной голограммы (рис.6.6а.) излучение каждой точки объекта, интерферируя с излучением всех его остальных точек, формирует в объеме регистрирующей среды множество пространственных решеток (простейших голограмм), отличающихся пространственным периодом и ориентацией в пространстве. При освещении полученной таким образом голограммы излучением от какой-либо части записанного на ней объекта (например, как это показано на рис.6.6) излучение каждой из точек используемой части объекта в силу

селективных свойств трехмерных голограмм будет взаимодействовать только с теми решетками (простейшими голограммами), в формировании которых это излучение участвовало во время записи. Изображения, восстановленные каждой точкой освещающей части объекта, складываясь, усиливают друг друга, и в результате образуется единое яркое изображение объекта. Таким образом, по отдельной части записанной на ней сцены голограмма «вспоминает» всю сцену, т.е. восстанавливает полностью объектную волну, формирующую изображение объекта, использованного при записи.

Процесс получения изображения объекта с помощью безопорной голограммы *«весьма схож с ассоциативной памятью. Любой человек пользуется этим фундаментальным свойством мозга: коснулся нашего слуха небольшой отрывок полузабытой мелодии – и вот уже вспомнилась вся песня, принес ветер какой-то аромат – и в памяти возникнет образ цветка.*

Аналогия между трехмерной голограммой и мозгом весьма глубока и далеко не ограничивается лишь свойством ассоциативной памяти. В качестве примера иного свойства человеческого мозга, которым может обладать голограмма, следует упомянуть операцию, напоминающую «концентрацию внимания». Этот эффект имеет место при считывании голограммы, записанной в динамической среде, реагирующей на свет непосредственно в момент его воздействия. При восстановлении такой голограммы восстановленная волна, проходя далее через объем голограммы, начинает снова записываться, что приводит к усилению записи и постепенному «разгоранию» восстановленного изображения.» [3].

Мультиплицирование изображения

Ярким примером возможностей, которые открывает голография в области создания оптических элементов, является так называемый множительный голографический элемент, используемый в микроэлектронике, а также в некоторых других областях. Общая схема получения и использования такого элемента приведена на рис.6.7. На стадии получения элемента на регистрирующей среде (РС) с помощью референтного точечного источника S записывается специальный объект O, выполненный в виде регулярной матрицы точек. При реконструкции на место, которое занимал точечный источник, устанавливается объект, подлежащий мультиплицированию (транспарант, освещенный пучком лучей L). Каждая точка этого объекта в соответствии с условиями съемки изображается голограммой в виде регулярной матрицы точек. В целом голограмма восстанавливает регулярную матрицу O^1 , составленную из

изображений мультиплицируемого объекта. Такой голографический мультиплицирующий элемент можно рассматривать как обобщенную линзу: в отличие от линзы, преобразующей точку предметного пространства в точку в пространстве изображений, такой элемент преобразует точку в пространстве предметов в матрицу точек в пространстве изображений [2].

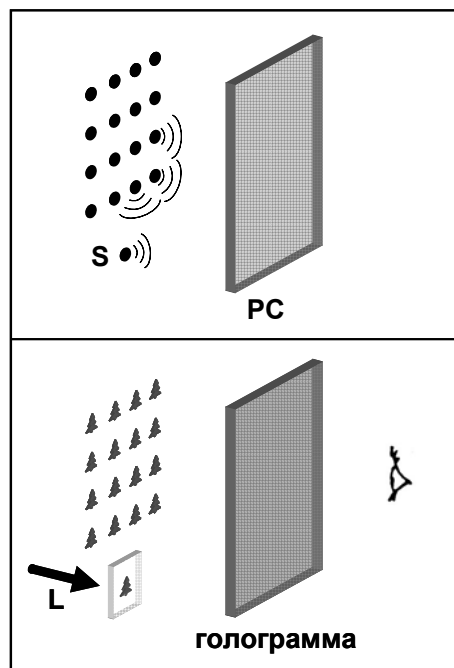


Рис.6.7.Принцип работы голографического множительного элемента: а – запись голограммы матричного элемента с использованием референтного источника S; б – мультиплицирование объекта-транспаранта, освещаемого пучком лучей L.

Такой элемент в эпоху бурного развития голографии и ее практических приложений (в основном это 70-е годы XX столетия) получил применение в следующих случаях:

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

Преимущества голографического метода мультиплицирования изображений перед всеми другими используемыми методами заключается в том, что два важных свойства элемента - яркость изображения и его разрешение - при использовании голографического метода обусловлены независимыми параметрами и увеличение разрешения в изображении объекта напрямую не связано с уменьшением его яркости, в то время как в неголографических методах в связи с необходимостью выбора размера отверстия увеличение разрешения, как правило, связано с потерей яркости [6].

Предельные параметры по информационной емкости

Идею использования уникальной возможности трехмерной голографии для создания оптической памяти сверхвысокой емкости высказал П.И. Ван Хирден еще в 1963 году. [7] По мнению Ю.Н. Денисюка *«сходство некоторых свойств голограммы и мозга подтверждает гипотезу физиолога Р.И. Берля о том, что мозг хранит каждый бит информации не в одиночной пространственно-локализованной ячейке, а в виде одиночной пространственной гармонике возбуждения, занимающей весь его объем. Такой способ хранения информации обладает рядом достоинств, Например, повреждение одного или нескольких участков мозга не вызывает в этом случае полного исчезновения какой-либо части записанной в нем информации.»*

Вход в такую «нелокализованную» память весьма удобен в отличие от памяти на пространственных ячейках, где каждая расположенная внутри объема ячейка должна быть соединена с входным устройством специальным нервным волокном, в данном случае каждый элемент соединен только с ближайшими соседями.

Потенциальная емкость такого рода памяти грандиозна. П.И. Ван Хирден показал, что число независимых гармоник, с помощью которых может быть записана информация, равно объему голограммы с линейными размерами, равными длине волны света, использованного при ее записи ($V_{гол}/\lambda^3$). Для видимого света эта величина составляет порядка 10^{10} ячеек/см³.»[1]

С этой точки зрения понятна ситуация, почему в современных информационных технологиях дальнейшие перспективы увеличения плотности записи информации ориентированы на использование и применение голографических методов в этой научно-технической области. Прогнозы специалистов относительно развития запоминающих устройств различных типов (см. рис.6.8 и табл. 6.2) отводят на ближайшие 10-15 лет ведущее место в этой научно-технической области голографическим методам.

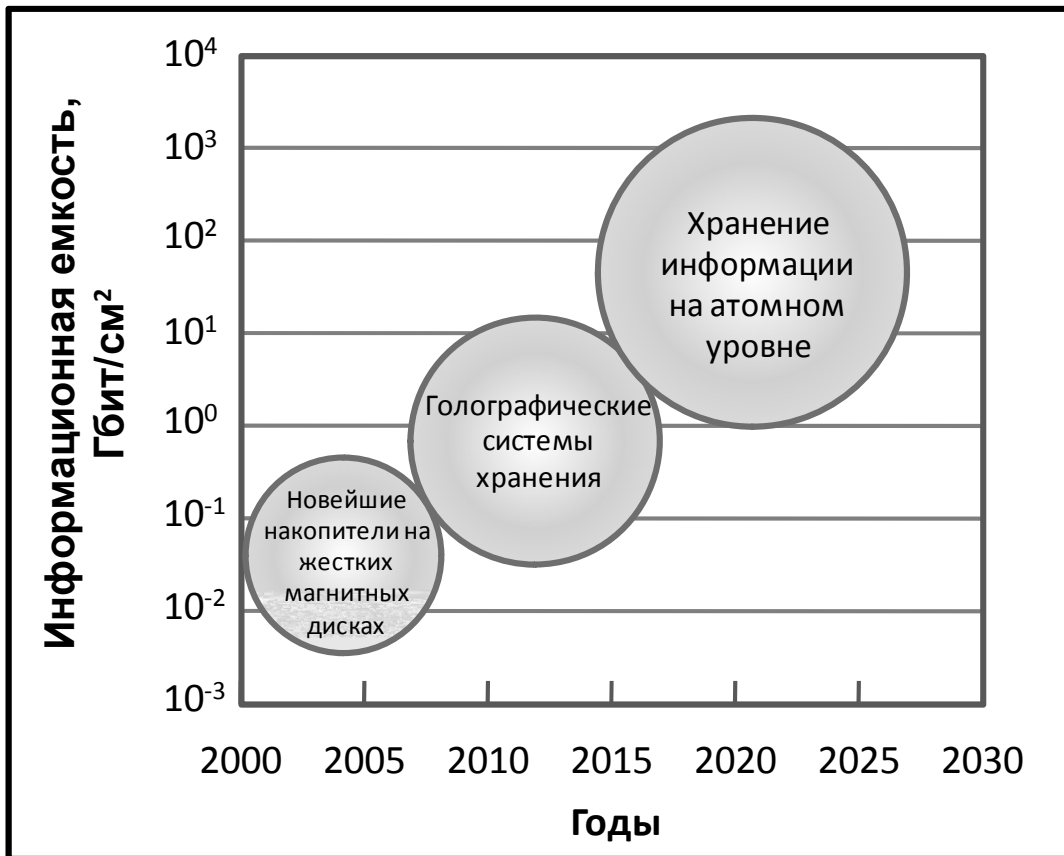


Рис.6.8. Развитие емкости запоминающих устройств (по данным IBM).

Таблица 6.2. Сравнение характеристик различных типов оптических дисков.

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

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.6.9).



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

Рис.6.9. 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.6.9).

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 течение трех-четырех лет довести емкость голографического диска до 1,6Тб и анонсирует перезаписываемые голографические диски.

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 1966-67г.г. и тогда же частично реализована в виде лабораторных систем и устройств, которые не выдерживали конкуренции с существующими системами. Принципиальная схема устройства голографической памяти ЭВМ, опубликованная в журнале BSTJ в 1967г., приведена на рис.6.10.

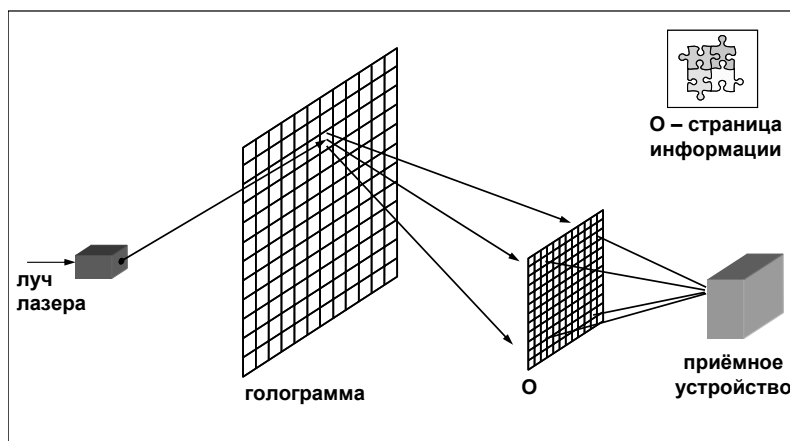


Рис.6.10. Принципиальная схема устройства голографической памяти. (BSTJ – 1967 г.).

Приведем описание этой принципиальной схемы, сделанное Ю.Н. Денисюком в работе [2].

«При записи информации на регистрирующую среду (фотопластинку) впечатывается система малых голограмм, на каждой из которых зарегистрирована одна страница памяти (одна клеточка в голограмме на рис.6.8). Информация на каждой странице кодируется в виде изображения, характеризующегося определенным распределением интенсивности в некоторой плоскости «O». Примерный вид такого распределения представлен в верхней правой части рисунка 6.10.

Извлечение информации из памяти осуществляется следующим образом. По команде счетного устройства луч когерентного излучения L с помощью отклоняющего устройства D направляется на определенную голограмму, на которой записана страница информации, необходимая для решения данной задачи. Голограмма восстанавливает изображение этой страницы в плоскости «O», затем распределение интенсивности в этом изображении считывается матрицей фотоприемников и подается на вход счетного устройства С. В случае, если необходимо вспомнить

другую страницу информации, угол отклонения луча изменяется и соответственно восстанавливается другая голограмма. Условия записи голограмм выбираются таким образом, чтобы восстановленные изображения страниц точно проецировались на одну и ту же матрицу фотоприемников.»

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

- Источники света
- Дефлекторы пучков света
- Составитель страниц
- Среда для записи голограмм
- Матрица фотодетекторов (приемников излучения)
- Различные вспомогательные оптические элементы и электронные устройства

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

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.

При создании голографической памяти одной из самых сложных проблем является создание регистрирующей среды для записи, хранения и перезаписи голограмм, которая может быть легко и технологично сформирована в виде удобного в эксплуатации носителя информации. Каждая фирма, претендующая на создание голографической памяти, предпринимает свои собственные разработки в этом направлении, которые представляют «know how» фирмы и не разглашаются. Однако в создании таких регистрирующих сред имеются общие принципы и закономерности. Одно из развиваемых направлений: диски изготавливаются из светочувствительного полимерного материала и имеют толщину порядка 1,0-1,5мм, которая обеспечивает возможность наложенной записи при регистрации информации голографическим способом.

Аналогом, а в ряде случаев и прототипом таких сред является полимерный светочувствительный материал на основе органического красителя фенантренхинона (ФХ), разработанный конце 80-х годов XX века в Государственном Оптическом Институте им. С.И. Вавилова (ГОИ) для целей объемной голографии [9].

Литература

1. Денисюк Ю.Н. Голография и ее перспективы // Журнал прикл. Спектроскопии. 1980. Т.33. С.397-414.
2. Денисюк Ю.Н. Сборник избранных статей по голографии // Труды ГОИ. Л.: ГОИ. 1988. Т.68. Вып.202. – 265с.
3. Денисюк Ю.Н. Некоторые проблемы и перспективы голографии в трехмерных средах// В кн.: Оптическая голография / Под ред. Колфилда Г. - М.:Мир. 1982. т.2.- с.691-729.
4. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. - М.:Мир. 1973. - 686с.
5. Денисюк Ю.Н. Принципы голографии. - Л.:ГОИ. 1978. - 125с.
6. Г.Колфилд. Мультиплицирование изображений. В кн.: Оптическая голография / Под ред. Колфилда Г. - М.:Мир. 1982. т.2.- с.661-668.
7. Van Heerden P.J. Theory of Optical Information Storage in Solids. – Applied Optics. 1963. 2. №4. p. 393.
Т.Гейлорд. Хранение цифровой информации. В кн.: Оптическая голография / Под ред. Колфилда Г. - М.:Мир. 1982. т.2.- с.414-451.

Часть 3. Анализ свойств голограмм

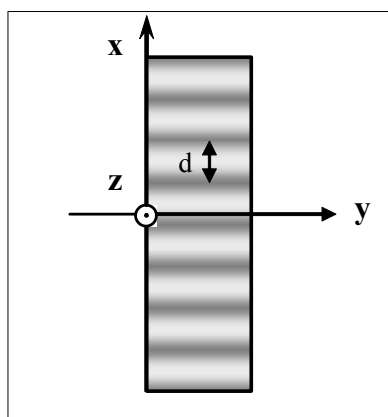
§7. Классификация голограмм. Теоретический анализ трехмерных голограмм. Основные положения теории связанных волн.

Анализ свойств голограмм и количественные оценки их параметров включают следующие основные этапы:

- рассмотрение и оценка характера распределения интенсивности в регистрируемой интерференционной картине;
- определение отклика среды на воздействие излучения;
- анализ дифракции излучения на зарегистрированной структуре.

При анализе, как правило, рассматривают различные варианты разделения голограмм, связанные с учетом их толщины, и два предельных варианта интерференционной структуры: элементарные голограммы, т.е. голограммы-решетки и голограммы сложных волновых полей.

Математический аппарат, разработанный для традиционных (плоских) дифракционных решеток, (полученных, например, методом нанесения штрихов на гладкую поверхность) применим и для теоретического анализа плоских (двумерных) голограмм [1-3]. На рис.7.1 приведены основные соотношения, характеризующие свойства излучения при дифракции на плоских амплитудных и фазовых синусоидальных решетках (независимо от способа их получения).



Амплитудные голограммы:

$$t = \frac{\text{амплитуда прошедшего света}}{\text{амплитуда падающего света}}$$

$$t = t_0 - t_E$$

$$t_E = t_{E_0} + t_1 \cos \frac{2\pi x}{d}$$

Фазовые голограммы:

$$t = \exp[i\varphi(x)]$$

$$\varphi(x) = \varphi_0 + \varphi_1 \cos \frac{2\pi x}{d}$$

Рис.7.1. Рассмотрение дифракции излучения на пропускающей голограмме-решетке.

Переход от плоской регистрирующей среды к трехмерной не только расширил сферу исследований и предопределил переход голографии в область физики, но и поставил новые теоретические проблемы, связанные с исследованием физического явления, лежащего в основе всей голографии, суть которого заключается в «способности материальной модели волны интенсивности воспроизводить волновое поле со всеми его параметрами – амплитудой, фазой, спектральным составом, состоянием поляризации и даже с изменениями этих параметров во времени» [1,2]. Изучение этого явления представляет главную научную цель голографии.

В качестве теоретического критерия степени объемности в голографии используют параметр Клейна

$$Q = 2\pi\lambda T / (nd^2) \quad (7.1),$$

где λ – длина волны излучения, T – толщина голограммы, n – средний показатель преломления голограммы, d – пространственный период голограммы [3,4].

Теоретически обоснованная классификация голограмм, на основе которой применительно к данной конкретной ситуации может быть использовано соответствующее аналитическое описание, сформирована русской школой голографии (Сидорович В.Г., Зельдович Б.Я.) [5-8].

Элементарные голограммы – одномерные решетки (полученные при взаимодействии двух плоских монохроматических волн) – классифицируют следующим образом.

- **Плоские** (двумерные, 2D-) решетки: $Q \ll 1$.
- **Объемные** (трехмерные, 3D-) решетки: $Q > 10$.
- Промежуточный случай: $Q < 10$, когда решетку нельзя считать плоской, не имеет какого-либо специального названия и соответствующего аналитического описания.

Голограммы сложных волновых полей (полученные при взаимодействии двух или более волн произвольной формы) классифицируют следующим образом.

- **Плоские голограммы** (двумерные голограммы, 2D-голограммы): все парциальные составляющие пространственной частоты регистрируемой интерференционной картины удовлетворяют условию $Q \ll 1$.
- **Тонкослойные трехмерные голограммы** (тонкослойные объемные голограммы; толстослойные голограммы): средняя пространственная частота регистрируемой интерференционной картины (кроссмодуляционная структура голограммы) удовлетворяет условию $Q > 10$, а интермодуляционная структура (по крайней мере, одного из интерферирующих пучков) не

удовлетворяет этому условию (не выполняется критерий подавления шума Сидоровича-Зельдовича).

- **Трехмерные голограммы** (объемные голограммы; 3D-голограммы): кроссмодуляционная структура голограммы и ее интермодуляционная структура удовлетворяют условию $Q > 10$. Иначе: характерный размер неоднородностей в структуре голограммы существенно меньше ее толщины.

Кроссмодуляционная структура голограммы – структура, обусловленная взаимодействием парциальных составляющих пространственного спектра разных волн, формирующих интерференционную структуру.

Интермодуляционная структура голограммы – структура, обусловленная суммарным эффектом, полученным от вклада каждой из волн, формирующих интерференционную структуру, создаваемого взаимодействием парциальных составляющих пространственного спектра каждой волны, участвующей в образовании структуры голограммы. Другими словами, интермодуляционная структура голограммы обусловлена спекловой структурой волн, формирующих голограмму.

Теоретический анализ свойств трехмерных голограмм, который представляет главную научную цель голографии, находится в стадии своего развития [1-10]. В данном рассмотрении остановимся на важных для настоящего времени вариантах анализа, которыми являются:

- кинематические варианты теории трехмерных голограмм;
- теория связанных волн;
- модовая теория связанных волн, основанная на динамической теории дифракции.

Кинематические варианты теории трехмерных голограмм, разработанные в 60-х годах XX века [2], правильно описывая основной механизм трехмерной голограммы, не дают количественных соотношений, в частности, с их помощью нельзя рассчитать дифракционную эффективность. Например, используя условие Брэгга, можно определить условия эксперимента, при которых данная периодическая структура позволяет сформировать дифрагированную волну с максимальной интенсивностью, однако нет возможности определить эффективность данного преобразования. Такое рассмотрение по существу представляет собой схему одного из вариантов теории трехмерной голограммы в кинематическом приближении, которое исходит из предположения, что голограмма слабо воздействует на падающее на нее излучение. При этом вводятся существенные упрощения: пренебрегают изменением амплитуды восстанавливающей

(считывающей) волны по мере ее проникновения в глубь голограммы; считают, что восстановленная (дифрагированная) волна покидает голограмму, не взаимодействуя снова с ее структурой. Такое приближение достаточно хорошо описывает качественный характер большинства эффектов, присущих трехмерной голограмме, даже в том случае, когда взаимодействие голограммы с падающим на нее излучением не является слабым.

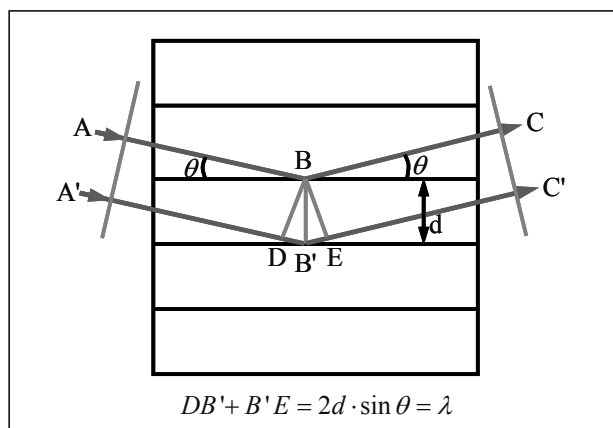


Рис.7.2.Выполнение условия Брэгга при рассмотрении дифракции излучения на одномерной решетке, сформированной в объемной среде (элементарная трехмерная голограмма-решетка)

Рассмотрим подробнее использование условия Брэгга при анализе свойств трехмерных голограмм. Условие Брэгга (условие Вульфа-Брэгга) определяет условие получения максимальной интенсивности дифрагированной волны при взаимодействии плоской волны с одномерной решеткой, полученной в объемной среде, и записывается следующим образом

$$2d \sin \theta = k\lambda \quad (7.2),$$

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, 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 ($\theta_{\text{Бр}}$) задает длину волны ($\lambda_{\text{Бр}}$) падающего на голограмму излучения, и наоборот. При отклонении от условий Брэгга ($\theta = \theta_{\text{Бр}} \pm \delta\theta$ и $\lambda = \lambda_{\text{Бр}} \pm \delta\lambda$)

интенсивность дифрагированной волны падает. Выражение "внебрэгговская реконструкция голограммы" означает, что интенсивность дифрагированной волны мала или близка к нулю.

Таким образом, условие Брэгга:

- определяет условие получения максимальной интенсивности дифрагированной волны;
- определяет выбор угла падения при задании длины волны падающего на голограмму излучения, и выбор длины волны при задании угла падения падающего на голограмму излучения;
- при отклонении от условий Брэгга ($\theta = \theta_{\text{Бр}} \pm \delta\theta$ и $\lambda = \lambda_{\text{Бр}} \pm \delta\lambda$) данное выражение не дает конкретной информации кроме общего заключения, что интенсивность дифрагированной уменьшается по сравнению с максимальным значением.

Используя условие Брэгга, можно определить условия эксперимента, при которых данная периодическая структура позволяет сформировать дифрагированную волну с максимальной эффективностью. При этом нет возможности оценить эффективность данного преобразования и определить параметры дифрагированной волны.

Тем не менее, знание закономерностей, которые определяют интенсивность дифрагированной волны, и параметров, от которых она зависит, играют определяющую роль при разработке технологии изготовления регистрирующих материалов, предназначенных для записи тех или иных типов трехмерных голограмм.

Именно применительно к решению этой весьма важной задачи используется теория связанных волн, предложенная американским исследователем Когельником [3,4]. Эта теория в настоящее время получила широкое распространение при анализе свойств объемных голограмм применительно к решению практических задач, возникающих при создании и разработке объемных регистрирующих сред для записи оптической информации, в том числе и записи голограмм

Рассмотрим основные положения теории связанных волн, необходимые для анализа результатов голографического эксперимента.

Предполагается, что голограмма представляет собой одномерную решетку в объемной среде (рис.7.3), где период решетки – d ; вектор решетки – $\mathbf{K} = |2\pi/d|$; пространственная частота голограммы – $\nu = 1/d$; толщина голограммы – T . При освещении голограммы рассматриваются две волны R и S . R – волна, проходящая в объеме голограммы без изменения направления (R – падающая, R' – прошедшая). S – волна, дифрагирующая на структуре голограммы – см. табл.7.1.

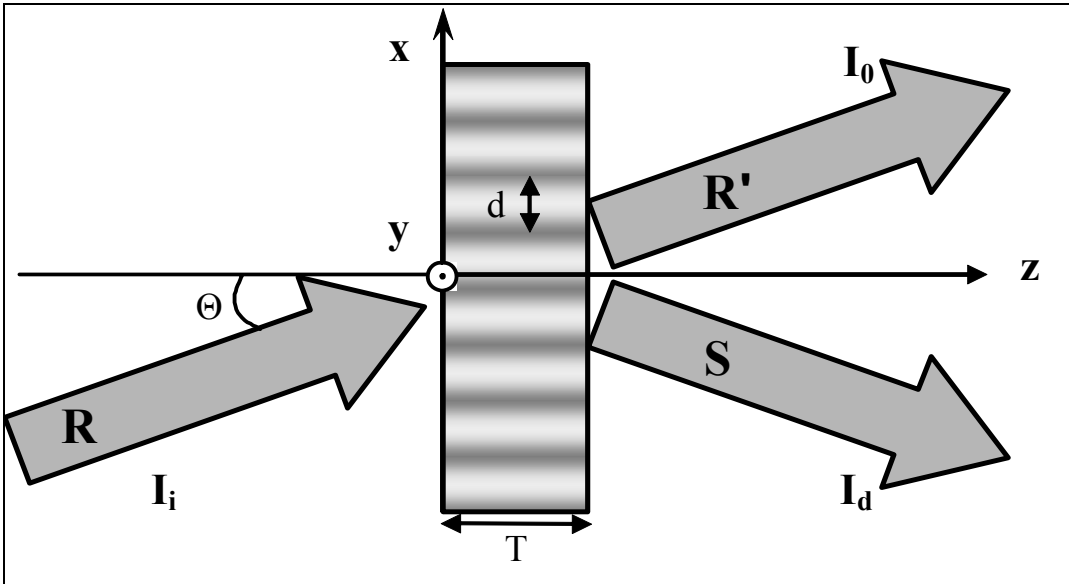


Рис.7.3.Схематическое расположение голограммы, падающей, прошедшей без изменения направления и дифрагированной волн.

Рассмотрение дифракции излучения на голограмме-решетке ищется при следующих условиях:

- малости изменения оптических параметров;

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

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

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

где α_0 – среднее значение коэффициента поглощения; α_1 - амплитуда изменения коэффициента поглощения; d – период решетки.

- отсутствия взаимодействия между R и S волнами;
- предположении, что падающая волна – плоская, монохроматическая, линейно-поляризованная.

Поле внутри объема голограммы:

$$E(x, z) = R(z) \cdot e^{-j \langle \vec{\rho}, \vec{r} \rangle} + S(z) \cdot e^{-j \langle \vec{\sigma}, \vec{r} \rangle}$$

Решение скалярного волнового уравнения:

$$\Delta E(x, z) + \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \cdot \varepsilon(x) \cdot E(x, z) = 0$$

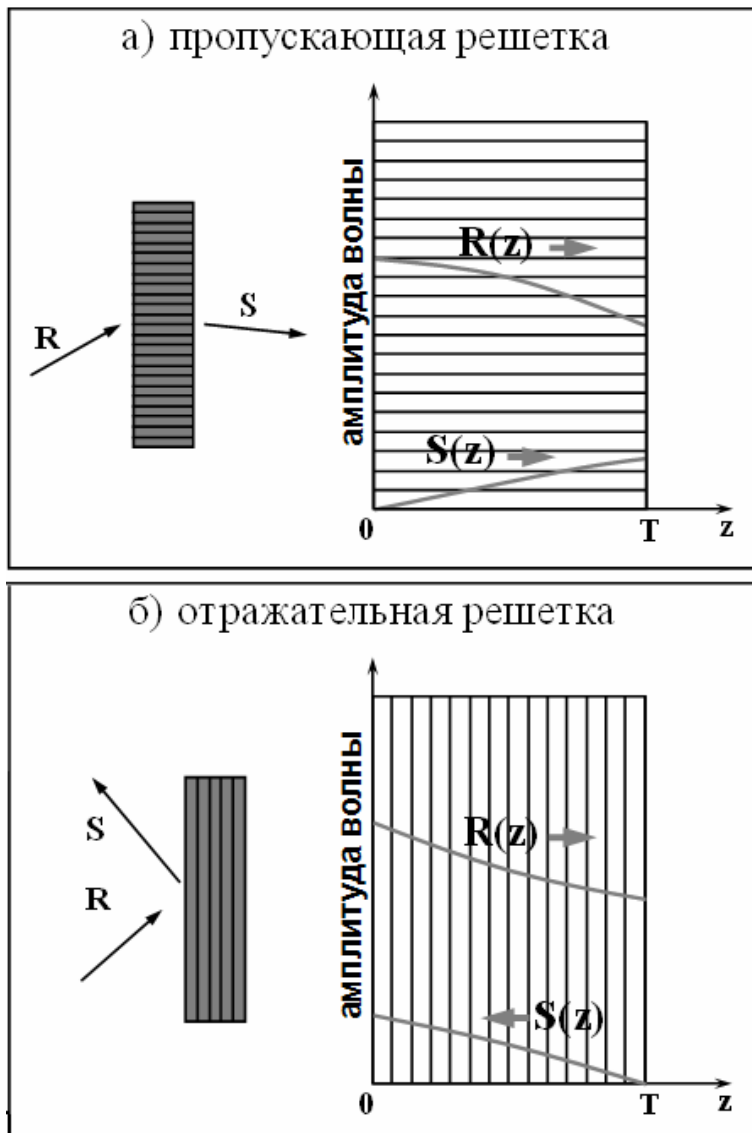


Рис.7.4.Изменение амплитуды связанных волн (прошедшей и дифрагированной) при прохождении через элементарную голограмму-решетку. а – пропускающая голограмма-решетка; б – отражательная голограмма-решетка.

Изменение амплитуды связанных волн (рис.7.4) может быть определено на основании известных параметров эксперимента (которые включают оптические параметры среды и амплитуду их модуляции в голограмме-решетке), при использовании формул теории, выведенных для определенного типа голограмм и состояния поляризации падающего излучения.

Основные параметры теории Когельника

Постоянная взаимодействия

$$\chi = \frac{\pi n_1}{\lambda} - \frac{i\alpha_1}{2} \quad (7.3).$$

Отклонение от условий Брэгга

$$\xi = T \cdot \frac{\kappa^2 - \sigma^2}{4\kappa \cos \Theta} = \frac{\pi \cdot T \cdot \delta\Theta \cdot \tan \Theta}{d} - \frac{T \cdot \delta\lambda}{2nd^2 \cos \Theta} \quad (7.4).$$

Амплитуда фазовой модуляции

$$\varphi_1 = \frac{\pi n_1 T}{\lambda \cos \theta} \quad (7.5).$$

В вышеприведенных формулах использованы обозначения, принятые в данном пособии: n_0 (n) – среднее значение показателя преломления; n_1 – амплитуда изменения показателя преломления; α_0 – среднее значение коэффициента поглощения; α_1 – амплитуда изменения коэффициента поглощения; d – период решетки; T – толщина голограммы; λ – длина волны излучения; 2θ – угол между интерферирующими пучками (угол между нулевым и дифрагированным пучками); $\delta\lambda$ и $\delta\theta$ – отклонение от условий Брэгга ($\theta = \theta_{\text{Бр}} \pm \delta\theta$ и $\lambda = \lambda_{\text{Бр}} \pm \delta\lambda$).

Решение волнового уравнения в работе [4] выполнено для различных условий эксперимента и рассмотрены параметры голограмм в следующих случаях:

- наклонного и нормального падения считывающего пучка на решетку
- для пропускающих и отражательных голограмм-решеток
- изменения коэффициента поглощения в голограмме (амплитудные голограммы-решетки)
- изменения показателя преломления в голограмме (фазовые голограммы-решетки)
- изменения коэффициента поглощения и показателя преломления в голограмме (амплитудно-фазовые голограммы-решетки)

В качестве основных параметров голограмм рассматривалась дифракционная эффективность и селективность голограммы-решетки.

Дифракционная эффективность определяется обычно как отношение потока излучения в дифрагированной волне данного порядка дифракции ($P_{\text{д}})_n$ 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 ДЭ, 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, $ДЭ = (P_d)_1 / \{(P_d)_1 + (P_d)_0\}$.

При дальнейшем рассмотрении считаем $R R^* = 1$, тогда

$$ДЭ = \eta = S S^* \quad (7.6).$$

Основные формулы теории связанных волн.

Фазовая пропускающая голограмма без поглощения:

$$\eta = \sin^2 \varphi_1 \quad (7.7)$$

Фазовая отражательная голограмма без поглощения:

$$\eta = \text{th}^2 \varphi_1 \quad (7.8)$$

Амплитудная пропускающая голограмма:

$$\eta = e^{\frac{-2\alpha T}{\cos \theta_0}} \cdot \text{sh}^2 \frac{\alpha_1 T}{2 \cos \theta_0} \quad (7.9)$$

Амплитудно-фазовая пропускающая голограмма:

$$\eta = \left(\sin^2 \frac{\pi n_1 T}{\lambda \cos \theta_0} + \text{sh}^2 \frac{\alpha_1}{2 \cos \theta_0} \right) \cdot e^{\frac{-2\alpha T}{\cos \theta_0}} \quad (7.10)$$

Изменение параметров дифрагированного излучения при отклонении условий считывания голограммы от условий Брэгга может быть проанализировано с помощью понятия «селективность голограммы».

Селективность голограммы – свойство голограммы, связанное с уменьшением интенсивности дифрагированной (восстановленной) волны (I_d) при отклонении условий освещения голограммы от оптимальных, определяемых условием Брэгга (см. рис.7.5). Для характеристики селективных свойств голограмм в теории связанных волн используется параметр ξ (часто его называют «параметр рассогласования»). 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. Максимум интенсивности волны, дифрагированной на объемной элементарной голограмме, наблюдается при угле Брэгга (θ_{Br}) и длине волны Брэгга (λ_{Br}), соответственно, так называемый параметр рассогласования $\xi = 0$. При отклонении от условий Брэгга ($\theta = \theta_{Br} \pm \delta\theta$ и $\lambda = \lambda_{Br} \pm \delta\lambda$) интенсивность дифрагированной волны

уменьшается в соответствии с изменением параметра ξ и может быть вычислена по соответствующей формуле. Напомним, что спектральная селективность голограммы ($\Delta\lambda$) количественно определяется как интервал длин волн (частот), в котором интенсивность дифрагированной волны превосходит половину ее максимального значения, 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 голограммы определяется рядом параметров, 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

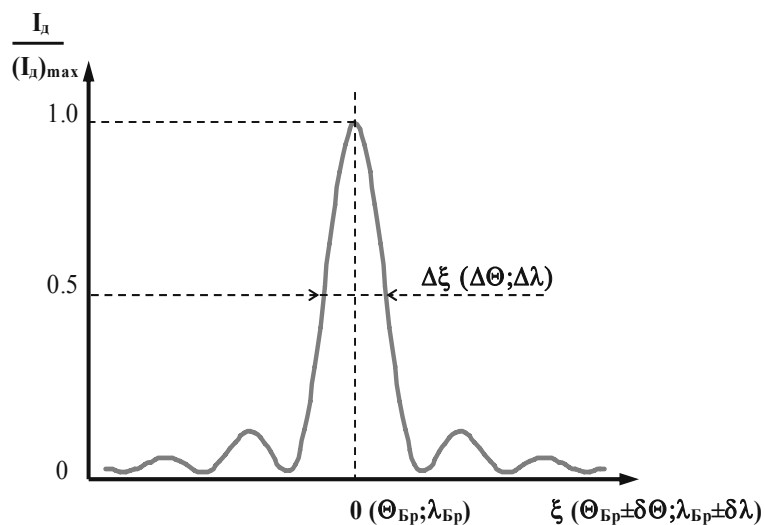


Рис.7.5.Контур селективности объемной голограммы-решетки. ξ – параметр рассогласования.

В строгом смысле слова теория связанных волн не является теорией трехмерной голограммы, так как голограмма по своему физическому смыслу представляет собой запись информации о сложном волновом поле, которое можно представить в виде суммы множества плоских волн. На основе теории связанных волн нельзя разработать общую теорию, учитывающую закономерности записи и воспроизведения волнового фронта, составленного из множества плоских волн. Трудность обусловлена тем, что одна и та же плоская волна, как правило, участвует в создании множества решеток. В таких условиях практически все решетки оказываются связанными друг с другом, и поле излучения,

восстановленное голограммой, в отличие от первого приближения уже нельзя представить в виде простой суммы полей, соответствующих отдельным решеткам. При этом теория Когельника не дает ответа на основной вопрос, как учесть все эти связи [2].

Наиболее полно свойства трехмерных голограмм описывает так называемая модовая теория трехмерных голограмм, в которой наиболее полно нашли отражение представления, основанные на динамической теории дифракции [5-10]. Модовая теория стала мощным стимулом к продолжению и дальнейшему развитию теоретических исследований в области объемной голографии. В рамках модовой теории впервые было доказано существование сложных волновых полей, названных модами голограммы, которые, несмотря на сложнейшую картину процессов дифракции на структуре голограммы, распространяются в ее объеме без искажений как через однородную среду с особым показателем преломления.

Таким образом, модовая теория сопоставляет согласованные волны (моды) определенным периодическим структурам и объемным структурам, полученным в результате регистрации сложных волновых полей. Каждой трехмерной голограмме (3D-голограмме) соответствует полная система согласованных с нею волн (мод), и любую волну, взаимодействующую с голограммой, можно разложить по этим модам. При этом применительно к фазовой трехмерной голограмме теория предполагает, что каждая мода проходит через голограмму как через однородную среду с определенным показателем преломления. В этом случае действие голограммы состоит в том, что она сдвигает относительную разность фаз между модами.

Модовая теория существенно упрощает рассмотрение процессов, протекающих в трехмерной голограмме, благодаря тому, что она автоматически учитывает очень сложные взаимные связи между рассеянием света на множестве решеток, из которых составлена голограмма, а также и потому, что аналогично теориям первого приближения представляет результат в виде суперпозиции независимых функций. Конкретно модовая теория была развита в применении к фазовым пропускающим, амплитудным усиливающим и трехмерным отражательным голограммам. Наиболее актуальным явилось применение модовой теории к описанию отражения света «Бриллюэновским зеркалом». В данном случае модовая теория правильно предсказывает значение полного коэффициента усиления в среде, которое необходимо, чтобы амплитуда обращенной волны превышала шум. Модовая теория позволяет также сформулировать условия устойчивости обращенной волны при ее распространении сквозь усиливающую голограмму. Все это нашло подтверждение в большом количестве экспериментов [2,5].

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. - М.:Мир. 1982. т.2.- с.691-729.
3. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. - М.:Мир. 1973. - 686с.
4. Kogelnik H. Coupled Wave Theory for Thick Hologram Gratings // The Bell System Technical Journal. 1969. Vol.48. No9. P. 2909-2947.
5. Сидорович В.Г. Расчет дифракционной эффективности трехмерных фазовых голограмм // Оптика и спектроскопия. 1976. т.41. №3. с. 507-510.
6. Сидорович В.Г. Теория преобразования световых полей трехмерными фазовыми голограммами. В кн.: Оптическая голография и ее применения / Отв.ред. Ю.Н.Денисюк и Ю.И.Островский. – Л.: Наука. 1977. с.4-12.
7. Зельдович Б.Я., Шкунов В.В. Спеклон // Известия АН СССР. Серия физич. 1984. т.48. №8 с.1545-1556.
8. Зельдович Б.Я., Шкунов В.В., Яковлева Т.В. Голограммы спекл-полей // УФН. 1986. т.149. вып.3. с. 511-549.
9. Корзинин Ю.Л., Суханов В.И. Пространственно-частотный вариант теории трехмерных голограмм. В кн.: Оптическая голография с записью в трехмерных средах. –Л.:Наука. 1986. с.52-74.
10. Корзинин Ю.Л. Теория трехмерных голограмм сложных волновых полей. В кн.: Голография экспо-2008. - СПб. 2008. с.48-50.

§8. Предельные значения основных параметров различных типов голограмм в линейном и нелинейном режимах записи.

Теоретическая оценка предельных значений различных типов голограмм производится с учетом условий их регистрации. В первую очередь необходимо учитывать характер зависимости амплитуды модуляции голограммы от воздействующей во время ее регистрации экспозиции. Характер данной зависимости определяет режим записи голограммы, который может быть линейным или нелинейным.

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.

При регистрации голограмм-решеток в линейном режиме распределение амплитуды модуляции оптического параметра в голограмме носит синусоидальный характер. При рассмотрении распределения амплитуды модуляции оптического параметра в голограмме-решетке, полученной в нелинейном режиме записи, в качестве предельного варианта используется решетка с прямоугольным профилем штриха (см. рис.2.9).

Основным параметром, по которому производится сравнение голограмм, является дифракционная эффективность [1]. В таблице 8.1 приведены максимальные значения дифракционной эффективности голограмм различных типов, полученных в линейном режиме записи и при использовании предельно нелинейного режима регистрации голограмм.

При анализе двумерных голограмм дифракционная эффективность голограммы определяется в (-1) порядке дифракции.

Оценка предельных значений ДЭ плоских (2D) амплитудных голограмм в линейном режиме записи, проводимая по анализу дифракции на плоской дифракционной решетке, показывает, что интенсивность волны, дифрагирующей в (-1) порядок, не может превышать 1/16 интенсивности падающего на голограмму потока излучения.

Оценка предельных значений ДЭ плоских (2D) фазовых голограмм в линейном режиме записи, проводимая по анализу дифракции на плоской дифракционной решетке (при условии неизменности амплитуды падающей волны и разложения в ряд Фурье с функциями Бесселя) показывает, что в этом случае интенсивность волны, дифрагирующей в (-

1) порядок, не может превышать значения 0,34 от интенсивности падающего на голограмму потока излучения.

Таблица 8.1. Оценка предельных значений дифракционной эффективности голограмм различных типов.

Тип	Виды голограмм	Модулируемая величина	Максимальная ДЭ, %	
			в линейном режиме записи	в нелинейном режиме записи
2D	пропускающие	Амплитуда	6,25	10
		Фаза	33,9	40
3D	пропускающие	Коэффициент поглощения	3,7	25
		Показатель преломления	100	100
	отражательные	Коэффициент поглощения	7,2	60
		Показатель преломления	100	100

Анализ свойств трехмерных голограмм и оценка предельных значений дифракционной эффективности проводится для голограмм-решеток с использованием формул теории связанных волн (теория связанных волн Когельника - см. §7).

Наибольший интерес для практики представляют трехмерные (объемные) фазовые голограммы, в которых отсутствует поглощение. На рис.8.1 и 8.2 приведены зависимости дифракционной эффективности пропускающих и отражательных голограмм от величины амплитуды фазовой модуляции. Как следует из приведенных данных предельные значения дифракционной эффективности таких голограмм, как пропускающих, так и отражательных, составляют 100%.

Следует отметить, что зависимость дифракционной эффективности (η) пропускающих фазовых объемных голограмм от величины фазовой модуляции (φ_1) носит осциллирующий характер (см. рис.8.1). При этом $\varphi_1 = k\pi \pm \arcsin\sqrt{\eta}$, где $k=0,1,2,3,\dots$. Поэтому по измеренным значениям ДЭ однозначное определение φ_1 для высокоэффективных голограмм можно произвести только с учетом формы контура селективности. На рис.8.1 (нижний график) приведены контуры селективности голограмм, которые имеют одинаковые значения ДЭ=50% (при считывании в условиях Брэгга) при различных значениях амплитуды фазовой модуляции. В таблице 8.2 приведены дополнительные данные, которые используют для того, чтобы однозначно определить величину φ_1 по измеренным значениям ДЭ

голограммы и форме контура селективности. Значение величины фазовой модуляции (φ_1) является важным для практики параметром, так как позволяет определить значение амплитуды модуляции показателя преломления регистрирующей среды (n_1), что необходимо при разработке технологии получения оптических элементов на данной регистрирующей среде.

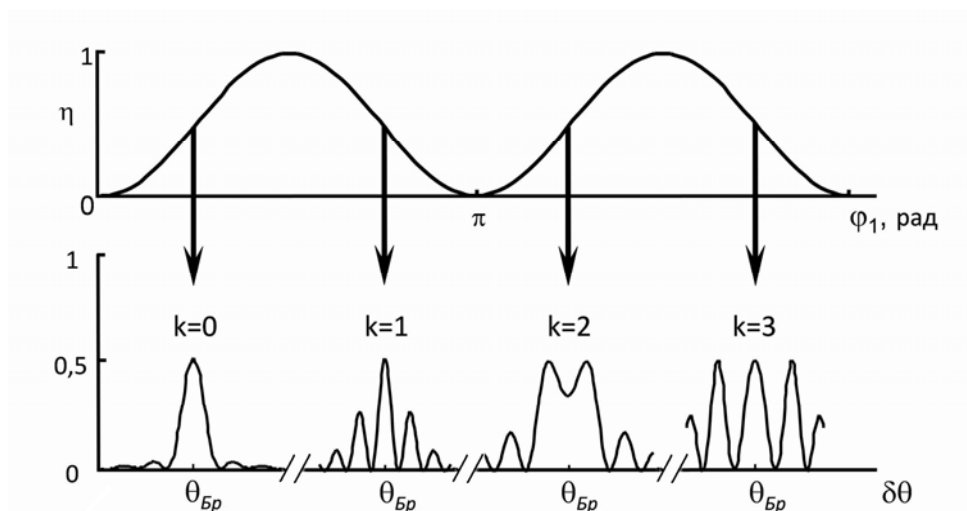


Рис.8.1.Зависимость дифракционной эффективности (η) фазовых пропускающих голограмм без поглощения от амплитуды фазовой модуляции (φ_1) - сверху; контуры селективности голограмм с одинаковой дифракционной эффективностью ($\eta = 50\%$) и различной величиной фазовой модуляции - внизу.

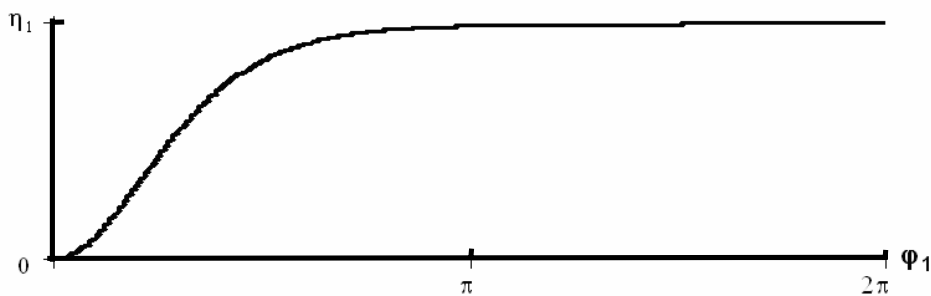


Рис.8.2.Зависимость дифракционной эффективности (η) отражательных объемных голограмм-решеток от величины фазовой модуляции (φ_1).

Таблица 8.2. Дополнительные данные для определения величины фазовой модуляции пропускающих голограмм по измеренным значениям ДЭ и форме контура угловой селективности голограммы.

Интервал измерений φ_1	$\varphi_1 (\eta)$	$d\eta/d\varphi_1$	$(d^2(I_d)/(d\theta)^2)_{бр}$	$ДЭ\perp/ДЭ\parallel$
1	2	3	4	5
0,0 – 0,5 π	$\arcsin\sqrt{\eta}$	> 0	> 0	> 1
0,5 – 1,0 π	$\pi - \arcsin\sqrt{\eta}$	< 0	> 0	< 1
1,0 – 1,5 π	$\pi + \arcsin\sqrt{\eta}$	> 0	< 0	> 1
1,5 – 2,0 π	$2\pi - \arcsin\sqrt{\eta}$	< 0	> 0	< 1

В случае наличия нелинейности изменяется характер зависимости амплитуды изменения оптического параметра по координате (в направлении вектора решетки). Для характеристики нелинейных свойств голограммы вводится понятие контраста

$$p = \alpha_1 / \alpha_0 \quad (8.1),$$

где α_1 – модуляция коэффициента поглощения в голограмме; α_0 – среднее значение коэффициента поглощения в голограмме.

В случае линейного режима записи голограммы $p = 1$. На рис.8.3 приведены возможные профили решетки, реализующие разные значения контраста при одинаковом среднем поглощении амплитудной голограммы, рассчитанные в работе [3].

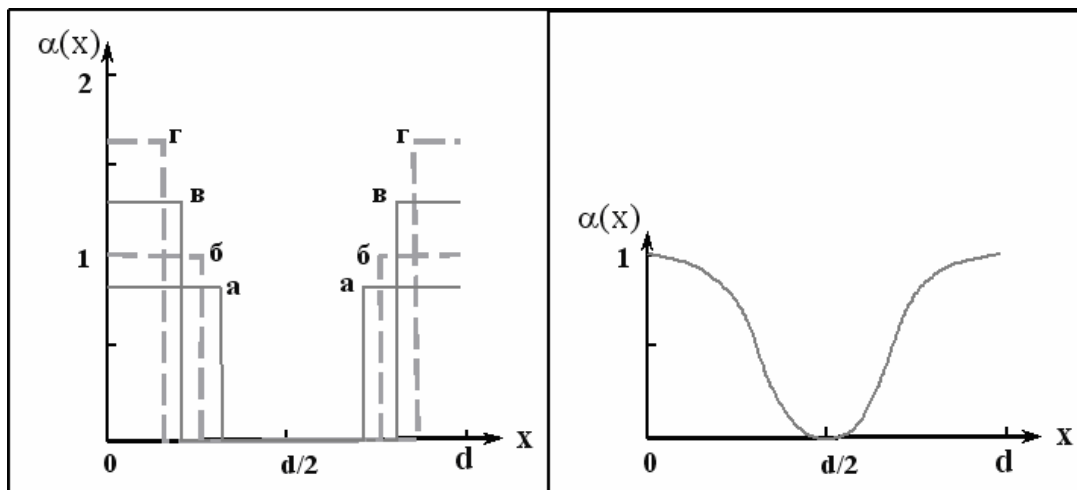


Рис.8.3. Возможные профили прямоугольной решетки, реализующие разные значения контраста $p = \alpha_1 / \alpha_0$ (среднее поглощение $\alpha_0 = 0,5$) – сверху; профиль решетки при $p = 1$ ($\alpha_1 = 0,5$) - внизу.

Результаты расчета дифракционной эффективности пропускающих и отражательных амплитудных голограмм в зависимости от среднего поглощения и различного контраста голограммы приведены на рис.8.4. Как видно, при увеличении нелинейности решетки, характеризуемой изменением контраста выше уровня $p = 1$, происходит увеличение максимально достижимых значений дифракционной эффективности для рассматриваемых типов голограмм.

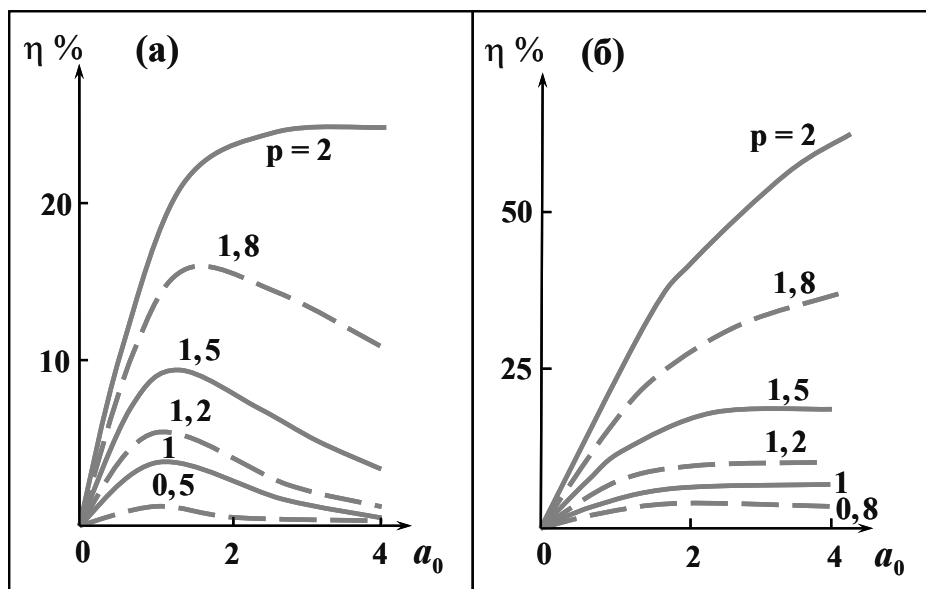


Рис.8.4. Зависимость ДЭ пропускающей (а) и отражательной (б) амплитудных голограмм от среднего поглощения (a_0). $p = \alpha_1 / \alpha_0$ –контраст.

Оценки предельных значений ДЭ различного типа голограмм в таблице 8.1 приведены для линейного режима записи и для режима с максимально выраженной нелинейностью. Как видно из приведенных данных, нелинейность позволяет значительно увеличить предельные характеристики амплитудных голограмм, в особенности трехмерных амплитудных голограмм, в то время как дифракционная эффективность фазовых голограмм может достигать 100% и в случае линейного режима записи.

Нелинейность режима записи играет определяющую роль во многих практических ситуациях, так как может значительно повысить эффективность зарегистрированных голограмм. В качестве примера можно привести получение изобразительных голограмм по методу Ю.Н.Денисюка на регистрирующих галогенидосеребряных фотографических слоях. Контраст регистрируемой интерференционной картины увеличивается при проведении постэкспозиционной обработки фотографических пластинок соответствующими проявляющими растворами за счет так называемых

краевых эффектов проявления. Это приводит к значительному увеличению (в 4-5 раз) контраста интерференционной картины, по сравнению с линейным режимом записи, а, следовательно, к увеличению ДЭ голограммы в 16-20 раз по сравнению с линейным режимом (см. рис.8.5 и рис.8.6). В отсутствие краевых эффектов проявления, в линейном режиме записи, эффективность изобразительных голограмм не превышала бы нескольких процентов. При наличии краевых эффектов ДЭ голограмм превышает 50% и позволяет получать высокоэффективные изобразительные голограммы, представляющие предмет гордости их создателей.

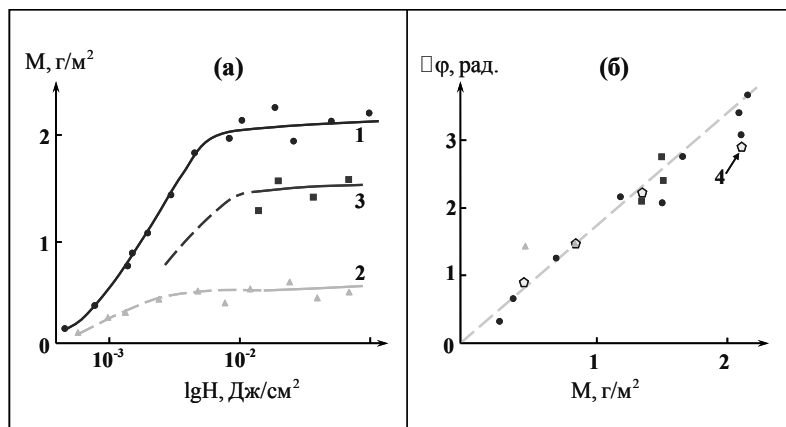


Рис.8.5. Экспозиционные зависимости поверхностной массы проявленного серебра M (а) и зависимость $\Delta\phi$ от M для слоев в ЛОИ-2 (б). 1 – ПРГ-1; 2 – ГП-2; 3 – ГП-8; 4 – расчет.

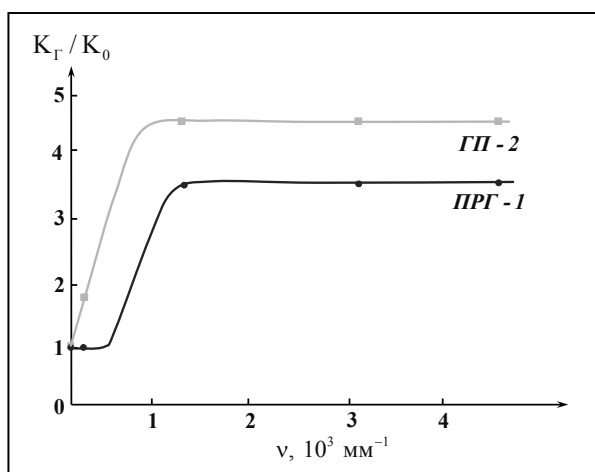


Рис.8.6. Функция передачи контраста при получении голограмм-решеток по методике получения изобразительных голограмм – зависимость контраста решетки от ее пространственной частоты при использовании различных проявляющих растворов. $K_r/K_0 = p$.

Действие краевых эффектов проявления при различной пространственной частоте регистрируемых голограмм-решеток демонстрирует рис.8.7.

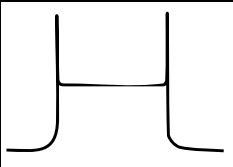
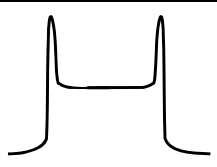
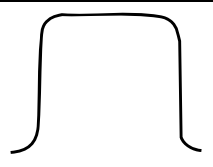
Форма штриха			
d, мм	0,1	0,01	0,001
ν , мм ⁻¹	10	100	1000
Δd , мм	0,001	0,001	0,001

Рис.8.7.Изменение профиля штриха в решетке с различным периодом за счет краевых эффектов проявления. d – период решетки, ν - пространственная частота решетки, Δd - изменение ширины штриха при наличии краевых эффектов.

Таким образом, предельные значения дифракционной эффективности голограмм различных типов определяются оптическими параметрами и толщиной регистрирующей среды, а также режимом записи голограммы. Используя формулы теории связанных волн и экспериментально измеренные параметры голограмм, можно оценить модуляцию оптических параметров регистрирующей среды и исследовать возможности их однозначной оценки и изготовления регистрирующих сред с заранее заданными параметрами.

Литература

1. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. - М.:Мир. 1973. - 686с.
2. Kogelnik H. Coupled Wave Theory for Thick Hologram Gratings // The Bell System Technical Journal. 1969. Vol.48. No9. P.2909-2947.
3. Алексеев-Попов А.В. Определение вкладов амплитудной и фазовой модуляции в дифракционную эффективность объемных отражательных голограмм // ЖТФ. 1982. т.52. №10. с. 2100-2103.

Часть 4. Техника голографического эксперимента

§9. Источники излучения для голографии.

В голографическом эксперименте источник излучения играет определяющую роль. Только с появлением лазеров – стандартных источников когерентного излучения - голографический эксперимент стал практически реализуем, и из теоретической области перешел в область практических приложений [1,2].

Используемые в голографии источники излучения подразделяют на две основные группы: источники излучения для записи голограмм и источники излучения для считывания голограмм. Как правило, к параметрам источников излучения для записи голограмм предъявляются гораздо более жесткие требования, чем к параметрам источников излучения, предназначенных для их считывания.

Основные параметры источников излучения, которые в первую очередь представляют интерес при подготовке голографического эксперимента, перечислены ниже и детально рассматриваются в ряде специальных дисциплин.

- Режим излучения (непрерывный, импульсный, импульсно-периодический)
- Длина волны излучения (определяет спектральную чувствительность используемой в эксперименте регистрирующей среды и цвет изображения объекта при считывании голограммы).
- Спектральный состав излучения - спектральная ширина линии излучения лазера, которая определяет ряд других параметров излучения.
- Когерентность излучения. Обеспечивается режимом работы лазера: используют одномодовый режим (генерируется одна мода излучения, которая может содержать несколько частот) и одночастотный. Для получения голограмм применяют лазеры с высокой степенью временной когерентности (длина когерентности – десятки см).
- Поляризация излучения – для регистрации голограмм наиболее предпочтительным является линейно-поляризованное излучение, в котором колебания вектора E происходят перпендикулярно плоскости расположения голографической схемы (поверхность оптического стола).
- Расходимость излучения – пространственный спектр излучения источника – чем уже пространственный спектр излучения источника, тем ближе такое излучение к коллимированному

(параллельному) пучку излучения, в котором все лучи параллельны друг другу с высокой степенью точности. Такой пучок предпочтителен с точки зрения обеспечения максимальной пространственной когерентности в схеме регистрации и является идеальным для создания в оптической голографической схеме интерференционной картины с заданными параметрами.

Как уже было сказано выше, комплекс требований к параметрам источника излучения существенно различается в зависимости от поставленных в эксперименте задач. Источник излучения для регистрации голограмм должен обладать следующими основными параметрами.

- Достаточная временная когерентность для того, чтобы в плоскости регистрирующей среды в течение всего времени записи голограммы (экспозиции) существовала стабильная (неподвижная) интерференционная микроструктура, образованная в результате когерентного взаимодействия объектной и опорной волн.
- Достаточная пространственная когерентность для того, чтобы объектная волна, рассеянная в данную точку регистрирующей среды от различных участков исследуемой поверхности (объекта), создавала четкую интерференционную микроструктуру именно с данным элементом волнового фронта опорной волны.
- Достаточная мощность и необходимая длина волны для того, чтобы обеспечить необходимый фотоотклик регистрирующей среды.

Таким образом, с точки зрения применения в голографическом эксперименте когерентность лазера является одной из важнейших характеристик. Степень когерентности лазера определяется постоянством разности фаз излучаемого света в двух фиксированных точках пространства в течение некоторого периода времени. Разность фаз в двух точках вдоль направления распространения света за время Δt определяет временную, или продольную, когерентность источника излучения, а в плоскости, перпендикулярной направлению распространения света, - пространственную, или поперечную, когерентность. Оба вида когерентности взаимосвязаны, и это приводит к ограничениям при аппаратурном решении оптических схем лазерных генераторов.

Временная и пространственная когерентность лазера обусловлены модовой структурой его излучения. Лазер может генерировать большое число разного вида продольных и поперечных световых колебаний, которые называются модами, имеют очень близкие друг другу значения длины волны и отличаются фазовыми соотношениями.

Моды принято сокращенно обозначать тремя индексами: m , n , q (каждый из которых может быть целым положительным числом: $0, 1, 2, 3, \dots$). Два первых числа m , n характеризуют различие световых

колебаний для поперечных направлений по отношению к оптической оси резонатора, а третье число q определяет различие световых колебаний в продольном направлении.

Важнейшим колебательным процессом, соответствующим основному излучению лазера, является одномодовый, отвечающий значению чисел $m = 0$, $n = 0$. Излучение при этом также называется одномодовым и обозначается TEM_{00} (буквы TEM являются начальными буквами английских слов: поперечное, электро, магнитное). Излучение лазера называется одночастотным, если колебательный процесс в резонаторе характеризуется числом $q = 0$. Для получения голограмм наиболее предпочтительным является одномодовый, одночастотный режим работы лазера [3].

Когерентность излучения. Волновой цуг – основное понятие при рассмотрении когерентных свойств излучения. Длительность цуга (τ) характеризует степень временной когерентности: τ – время когерентности. Расстояние τc называют длиной когерентности (c – скорость света). Чем больше τ , тем выше степень временной когерентности. В предельном случае полной когерентности $\tau \rightarrow \infty$. Такой бесконечно длинный волновой цуг соответствует плоской монохроматической волне.

В силу ограниченности во времени цуг не является монохроматической волной. Параметр $\Delta\omega$ характеризует степень размытия частотного спектра. Отношение $\Delta\omega/\omega_0$ называют степенью монохроматичности излучения. Степень монохроматичности излучения обратно пропорциональна длительности волнового цуга или, иначе говоря, обратно пропорциональна времени когерентности.

Излучение точечного источника всегда пространственно когерентно. Для протяженных источников степень пространственной когерентности зависит от размеров источника и расстояния от источника до точки наблюдения.

Источники излучения в порядке возрастания степени когерентности генерируемого ими излучения можно, примерно, расположить следующим образом: лампы накаливания, лампы дневного света, полупроводниковые светоизлучающие диоды, полупроводниковые лазеры, твердотельные лазеры на кристаллах и стеклах, жидкостные лазеры, газовые лазеры. Степень когерентности волны следует рассматривать как одну из ее важнейших характеристик. Многие другие характеристики волны связаны со степенью ее когерентности: степень монохроматичности связана со степенью временной когерентности; степень поляризации волны связана со степенью ее монохроматичности и, следовательно, оказывается связанной со степенью ее временной когерентности; направленность волны связана со степенью пространственной когерентности [4,5].

Существующие лазеры, в первую очередь, принято разделять по типу активной среды. Различают лазеры: газовые, жидкостные, твердотельные.

При выборе конкретной модели источника излучения учитываются эксплуатационные характеристики, такие как:

- Мощность излучения
- Стабильность параметров излучения
- Габариты источника

- Ресурс
- Потребляемая мощность
- Необходимость дополнительного энерго- и водообеспечения
- Влияние на окружающую среду

В ряде практических приложений, связанных с изобразительной голографией, голографической интерферометрией и некоторых других при регистрации голограмм наиболее широко используются газовые лазеры, работающие в непрерывном режиме [3,6]. Это обусловлено следующими причинами.

- Газовые лазеры многих типов давно выпускаются промышленностью, они являются более экономичными и доступными, чем лазеры других типов с аналогичными параметрами излучения.
- Многие модели газовых лазеров обладают рекордной долговечностью при сохранении основных выходных параметров.
- Газовые лазеры обладают очень высокой монохроматичностью излучения и чрезвычайно малой расходимостью лазерного пучка по сравнению с широко распространенными в настоящее время полупроводниковыми источниками излучения, что делает их незаменимыми в ряде научно-технических применений, связанных с метрологическими измерениями, а также при настройке и юстировке оптических систем.

При выполнении лабораторных работ по дисциплине «Прикладная голография», включающих регистрацию голограмм, используются газовые лазеры:

- Газовый лазер на основе смеси газов гелия и неона – длина волны генерации излучения 632,8 нм – для записи изобразительных голограмм
- Газовый лазер (ионный газовый лазер) на основе газа аргона – имеет целый спектр генерируемых длин волн различной мощности. Используют наиболее интенсивные линии – 458 нм, 488 нм, 514 нм – для записи голограммных элементов.

В таблице 9.1 приведены параметры некоторых моделей газовых лазеров, выпускаемых в настоящее время объединением «Плазма» (ОАО Научно-исследовательский институт газоразрядных приборов «Плазма», г. Рязань), по данным производителя данной продукции 2008 года.

Таблица 9.1. Газовые лазеры объединения «Плазма» (Россия).

Модель	ГН-2П	ГН-25-1	ГКЛ-100В	ЛГН-512	Д-5К
Наполнение (газ)	He-Ne (гелий-неон)	He-Ne (гелий-неон)	He-Cd (гелий-кадмий)	Ar (аргон)	Kr (криптон)
Длина волны излучения, мкм	0,6328	0,6328	0,440	0,458 (1)	0,6764 (1)
				0,488 (2)	0,6471 (2)
				0,5145 (3)	
Мощность излучения, Вт	2,0	25	0,100	1(1); 5(2); 5(3)	1(1); 3(2)
Поляризация	100:1	100:1	100:1	100:1	100:1
Расходимость, мрад	1,5	1,2	0,9	0,5	1,0
Диаметр пучка, мм	0,6	1,5	2,1	2,0	3,0
Потребляемая мощность, ВА (Вт)	15	80		40000	40000
Охлаждение	Воздушное, естественное			Водяное	Водяное

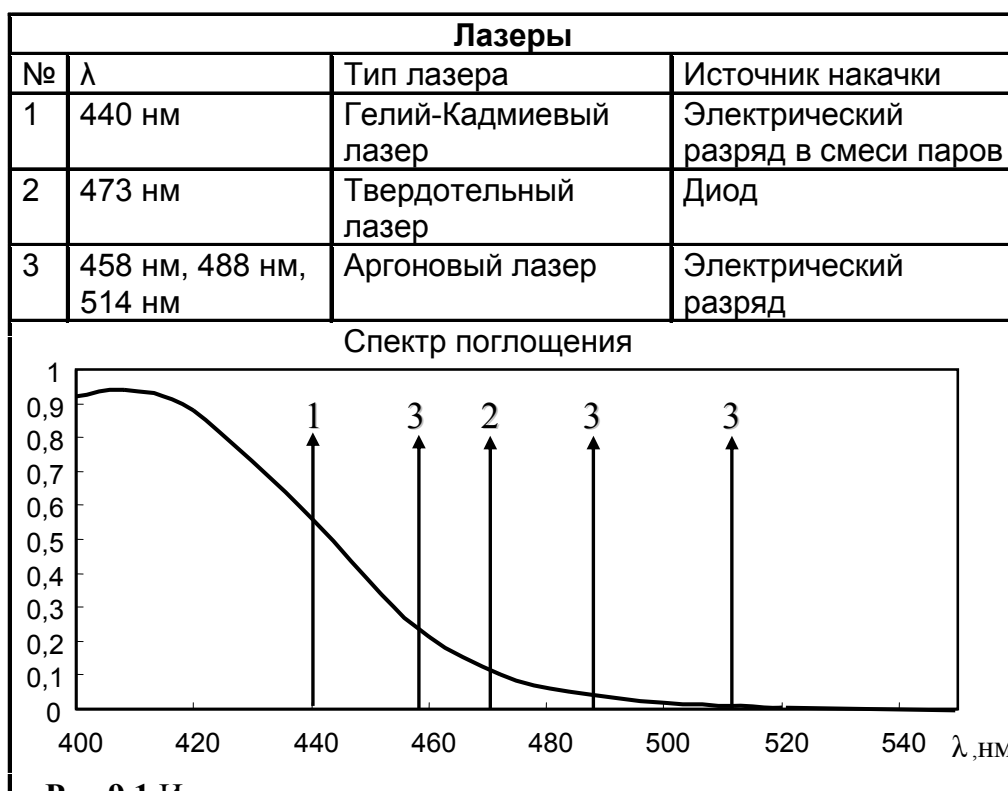


Рис.9.1. Источники излучения, пригодные для записи голограмм на материале «Диффен».

При подготовке голографического эксперимента необходимо использовать источник излучения с длиной волны в области спектральной чувствительности данной среды. На рис.9.1 приведен спектр поглощения регистрирующего материала «Диффен» [7], определяющий спектральную чувствительность данного материала, и длины волн наиболее распространенных газовых лазеров, которые могут быть использованы для получения голограмм на данном материале – это гелий-кадмиевый лазер и аргоновый лазер. Излучение гелий-неонового лазера ($\lambda = 632,8$ нм) является для данного материала неактивным, т.е. фотоотклик материала равен нулю, что не позволяет использовать такие источники излучения для записи голограмм, но имеется прекрасная возможность их использования для считывания информации в процессе записи голограммы без влияния на процесс регистрации.

При считывании голограмм в зависимости от условий проведения эксперимента к источнику излучения может быть предъявлен ряд требований:

- Определенная длина волны излучения.
- Определенный спектральный интервал используемого излучения (в зависимости от условий эксперимента требуемый интервал может составлять величину от долей нм до десятков нм).
- Определенный спектр пространственных частот используемого излучения (определенная «расходимость» пучка излучения).
- Заданная стабильность параметров излучения.
- Заданная мощность излучения.
- Заданная пространственная однородность пучка излучения.

Как правило, для считывания голограмм используется некогерентное излучение, чтобы избежать появления спеклов (см.§13). В системах оптической голографической памяти требуется обеспечивать считывание голограмм излучением той же длины волны, которая использовалась при записи, иначе возникают искажения, приводящие к потере информации (см.§6). При считывании трехмерных голограмм требуется обеспечить необходимые параметры считывающего пучка излучения: расходимость пучка должна быть существенно меньше угловой селективности исследуемой голограммы. При исследовании трехмерных голограмм излучением с широким пространственным спектром («расходящимся» пучком излучения) ширина интервала длин волн используемого излучения должна быть существенно меньше спектральной селективности исследуемой голограммы (см.§7).

В настоящее время в измерительных голографических схемах все более широкое распространение получают полупроводниковые источники излучения [8], которые являются высокоэкономичными и обладают малыми габаритами,

что в ряде практических случаев обуславливает преимущество их использования по сравнению с другими источниками излучения. При использовании стабилизированных источников питания полупроводниковые лазеры обеспечивают высокую стабильность параметров излучения.

Измерительные стенды учебных лабораторий кафедры фотоники и оптоинформатики оснащены полупроводниковыми лазерами KLM-650 мощностью 3-5 мВт, излучающими на длине волны 650-655 нм. Излучение таких лазеров обладает характеристиками, которые обеспечивают выполнение учебных задач (см.рис.9.2):

- Расходимость пучка излучения – менее 0,4 мрад.
- Степень линейной поляризации – 1.0.
- Ширина спектрального интервала – менее 0.1 нм.

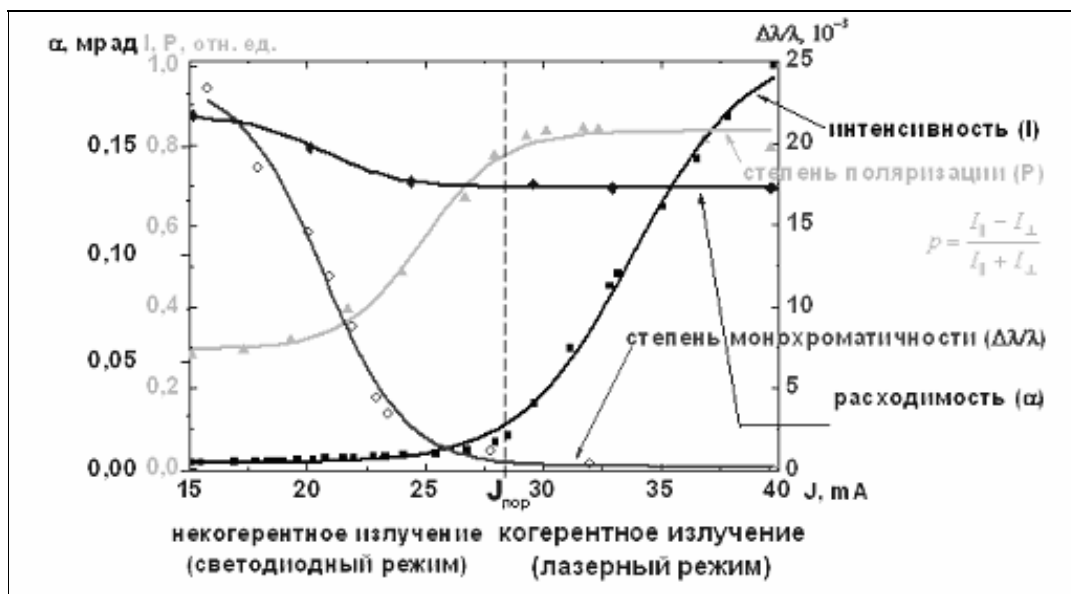


Рис.9.2.Параметры полупроводникового лазера KLM-650, используемого в голографических измерительных схемах.

Оценки расходимости пучка излучения таких лазеров, проведенные по измерениям профиля пучка излучения на различных расстояниях от выходного окна источника излучения (см. рис.9.3) свидетельствуют о том, что лазерный пучок имеет область так называемой «перетяжки», в пределах которой расходимость пучка излучения ничтожно мала. Именно в этой области, на расстоянии 50-70 см от выходного окна источника излучения, следует устанавливать исследуемые объекты-голограммы, считывание которых необходимо производить коллимированным (параллельным) пучком излучения.

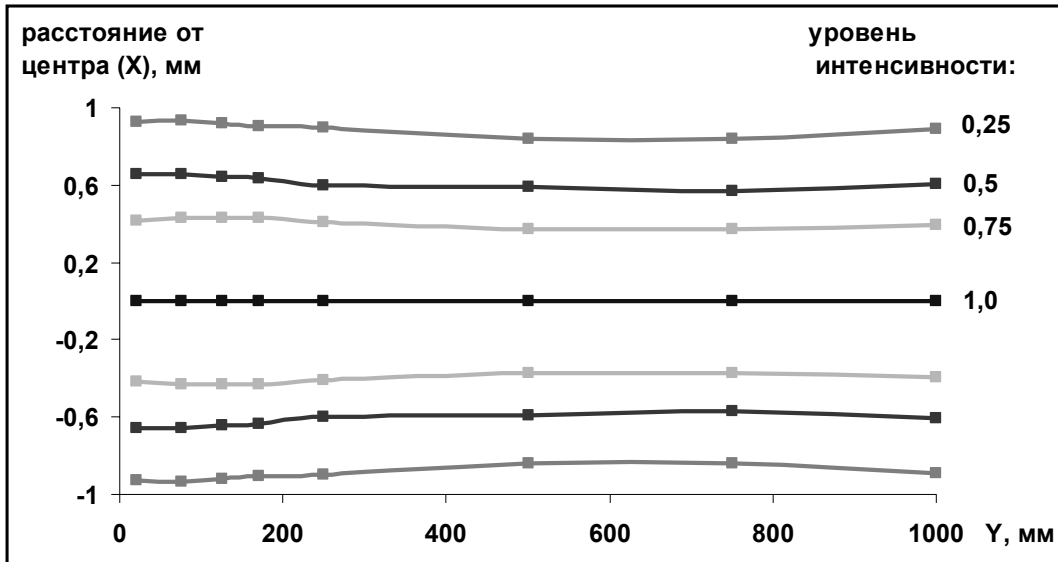
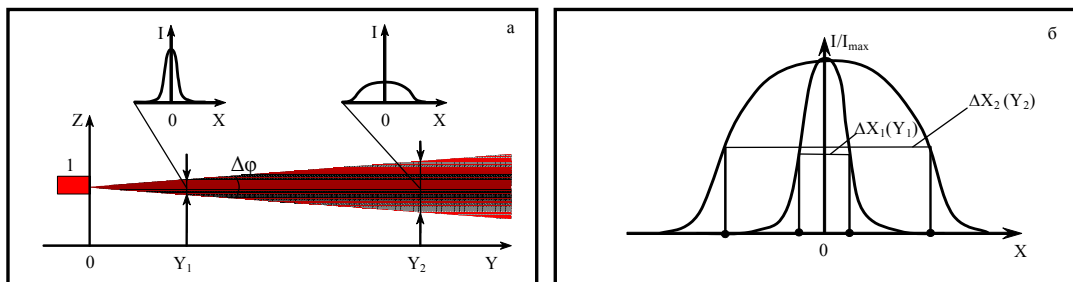


Рис.9.3. Оценка расходимости излучения по измерениям профиля пучка на различных расстояниях от выходного окна источника излучения.

Расходимость пучка излучения. Определение расходимости пучка лазерного излучения производится путем сравнения распределений интенсивности $I(x)$, полученных на разных расстояниях (y_1 и y_2) от выходного окна источника излучения (см. рис.). Сравнение производится по интервалу значений Δx , внутри которого интенсивность пучка превышает 50% от максимального значения (так называемая «полуширина» распределения интенсивности, или «полуширина пучка»). Расходимость пучка ($\alpha \equiv \Delta \psi$) оценивается следующим образом: $\alpha \equiv \Delta \psi = (\Delta x_2 - \Delta x_1) / (y_2 - y_1)$.



Схема, поясняющая понятие «расходимость излучения». а – геометрия схемы в плоскости yz : I – источник излучения; $\Delta \phi$ – расходимость пучка излучения в плоскости yz ; y_1, y_2 – расстояние от выходного окна источника излучения при проведении измерений профиля пучка излучения. б – распределение интенсивности в сечении пучка излучения по координате x (профиль пучка излучения) на разных расстояниях (y_1 и y_2) от выходного окна источника излучения; Δx_1 – полуширина пучка при y_1 ; Δx_2 – полуширина пучка при y_2 .

Литература

1. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. - М.:Мир, 1973. - 686с.
2. Оптическая голография. В 2 т. / Под ред. Колфилда Г. - М.:Мир. 1982. - т.1,т.2. – 736 с.
3. Комар В.Г., Серов О.Б. Изобразительная голография и голографический кинематограф. - М.: Искусство. 1987. – 286 с.
4. Ахманов С.А., Никитин С.Ю. Физическая оптика. – М.: МГУ. 1998. – 656 с.
5. Тарасов Л.В. Физические основы квантовой электроники. – М.: «Сов. радио». 1976. – 368 с.
6. Островский Ю.И., Бутусов М.М., Островская Г.В. Голографическая интерферометрия. - М.: Наука. 1977. - 339 с.
7. Андреева О.В., Парамонов А.А., Андреева Н.В. Прикладная голография. Методические материалы к экспериментальному практикуму. – СПб: СПбГУИТМО. 2008. – 150 с.
8. Андреева О.В., Парамонов А.А., Златов А.С. и др. Экспериментальный практикум по оптоинформатике. - СПб: СПбГУИТМО. 2008. – 136 с.

§10. Установки для регистрации голограмм.

Голографическая установка представляет собой комплекс различных устройств и элементов (оптических, механических, пневматических и т.п.), предназначенных для регистрации голограмм и обеспечивающих стабильность интерференционной картины относительно регистрирующей среды в процессе регистрации голограммы.

Голографическая установка, как правило, включает следующие основные части: источник излучения, голографическая схема, оптический стол (оптическая скамья, механическое основание), система защиты от вибраций (при использовании непрерывных источников излучения); система защиты от воздушных потоков и акустических воздействий; комплекс контрольно-измерительных приборов.

Голографическая схема - оптическая часть установки для регистрации голограмм. Обычно представляет собой интерферометрическую схему, в одно из плеч которой помещается объект. Голографическая схема включает 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 голографической схеме 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, схема 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 [1-8].

При регистрации голограммы необходимы: источник излучения, голографическая схема, регистрирующая среда и голографическая установка, которая при использовании непрерывных источников излучения в первую очередь должна обеспечить стабильность элементов голографической схемы, интерференционной картины и регистрирующей среды в процессе регистрации голограммы.

Голографическая оптическая схема состоит из узлов и элементов, размещаемых на жестком основании. Основными узлами

голографических схем, которые по существу представляют собой интерферометрические схемы различного вида, являются:

- Делитель лазерного пучка
- Расширитель лазерного пучка
- Устройство фильтрации лазерного излучения
- Поворотные зеркала и устройства
- Узел крепления объектов
- Узел крепления регистрирующей среды
- Затворы

Деление лазерного пучка в оптических схемах производится двумя основными способами – по волновому фронту и по амплитуде. На рис.10.1 схематически проиллюстрированы способы деления лазерного пучка, который предварительно расширен оптической системой. При использовании лазерного пучка, который не расширен оптической системой (так называемый «неразогнутый» пучок) деление можно производить только по амплитуде (вариант 1 на рис.10.1).

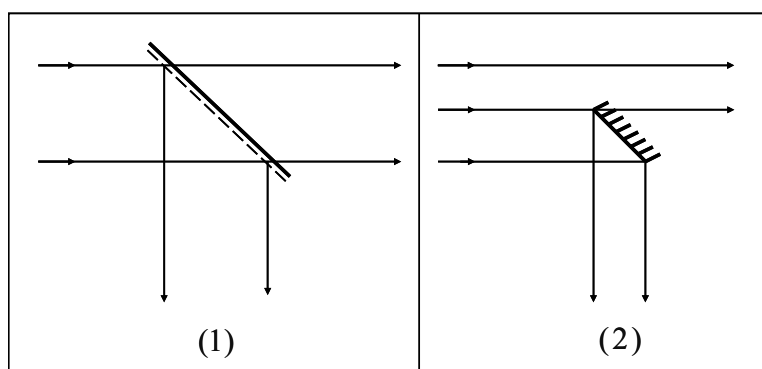


Рис.10.1. Деление лазерного пучка (после расширения) по амплитуде (1) и по волновому фронту (2).

Традиционно используемые устройства для деления пучка излучения по амплитуде представлены на рис.10.2. При этом применяются полупрозрачные зеркала, светоделительные кубики, поляризационные устройства, объемные голограммы-решетки.

- Полупрозрачные зеркала с диэлектрическим покрытием могут иметь различные характеристики (спектральные и энергетические характеристики коэффициентов пропускания и отражения); изготавливаются, как правило, на определенную длину волны и предназначены для работы в определенном диапазоне углов поворота относительно падающего излучения.

- Принцип использования клиновидности оптической пластинки при делении пучка излучения продемонстрирован на рис.10.2. Диэлектрические покрытия, нанесенные на клиновидные подложки, используют для обеспечения необходимых параметров делителей излучения на основе полупрозрачных зеркал.
- Светоделительный кубик обладает рядом значительных преимуществ – он обеспечивает снижение потерь на отражение за счет перпендикулярного падения пучка на поверхность и устойчивость к повреждениям за счет защиты рабочей поверхности с диэлектрическим покрытием. Однако при его использовании нельзя изменять такие параметры как угол между пучками, который неизменно составляет величину 90^0 , и соотношение пучков по интенсивности (как, правило, разделенные пучки имеют одинаковую интенсивность).
- Традиционные (плоские, 2D) дифракционные решетки, полученные различными способами и имеющие различные характеристики (период решетки, интенсивность излучения в различных порядках и т.д.), находят широкое применение в качестве устройств деления лазерного излучения по амплитуде. На рис.10.2 представлены пропускающая и отражательная дифракционные решетки, позволяющие формировать большое количество порядков дифракции.

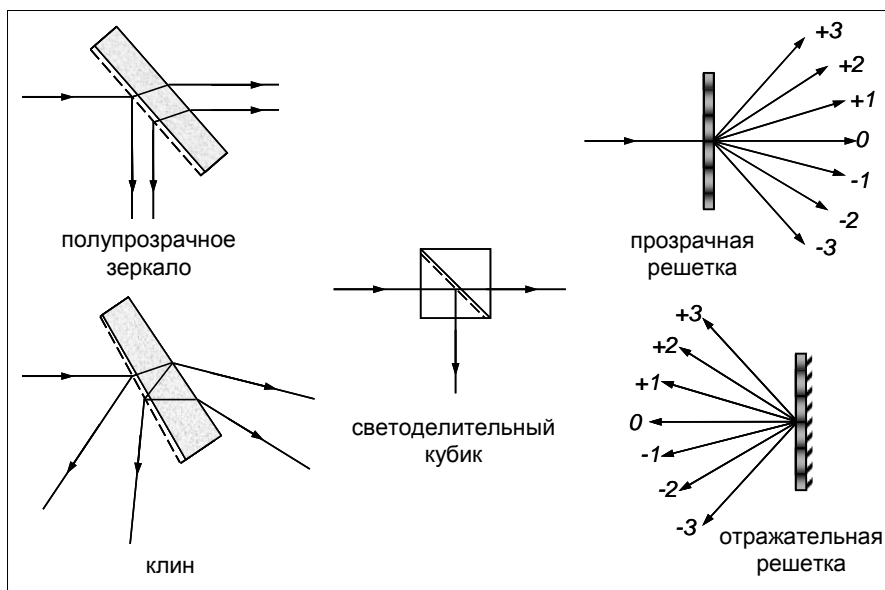


Рис.10.2.Традиционные устройства для деления световых пучков по амплитуде [2].

Для деления лазерного пучка по амплитуде в голографических схемах находят применение классические поляризационные устройства на основе двупреломляющих кристаллов и материалов, примеры которых приведены на рис.10.3.

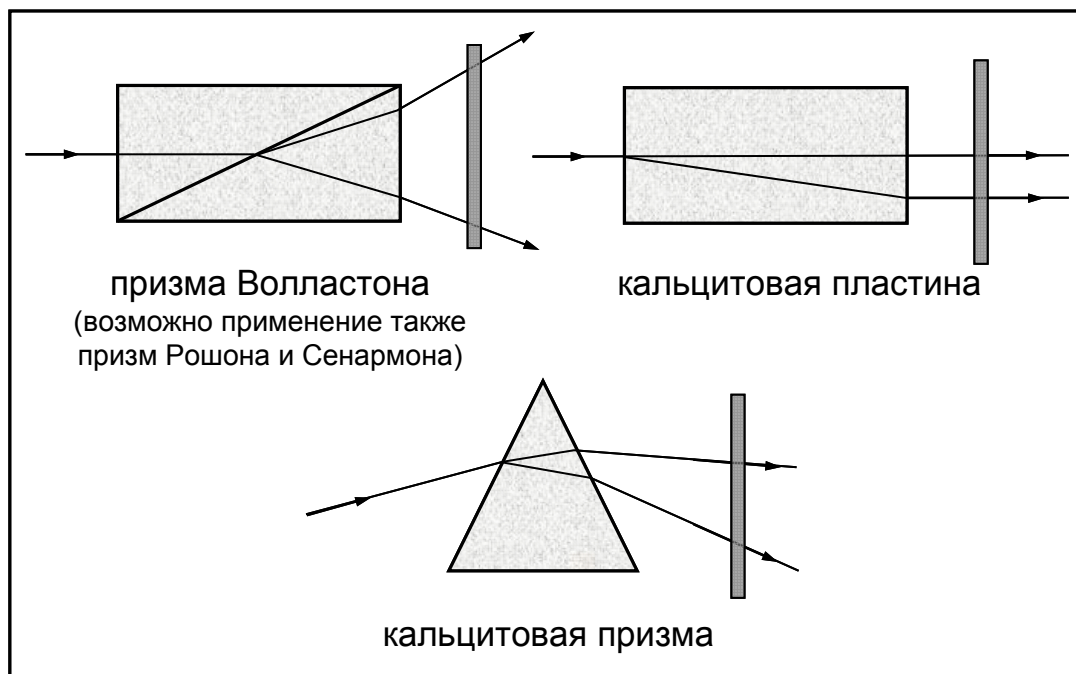


Рис.10.3.Поляризационные устройства для амплитудного деления световых пучков.

Схема поляризационного делителя лазерного пучка, в которой кроме двупреломляющей призмы (призма Фостера-Сили) использованы две полуволновые фазовые пластинки [1], приведена на рис.10.4. Данное устройство позволяет менять соотношение интенсивностей разделенных пучков, которые имеют одинаковое состояние поляризации.

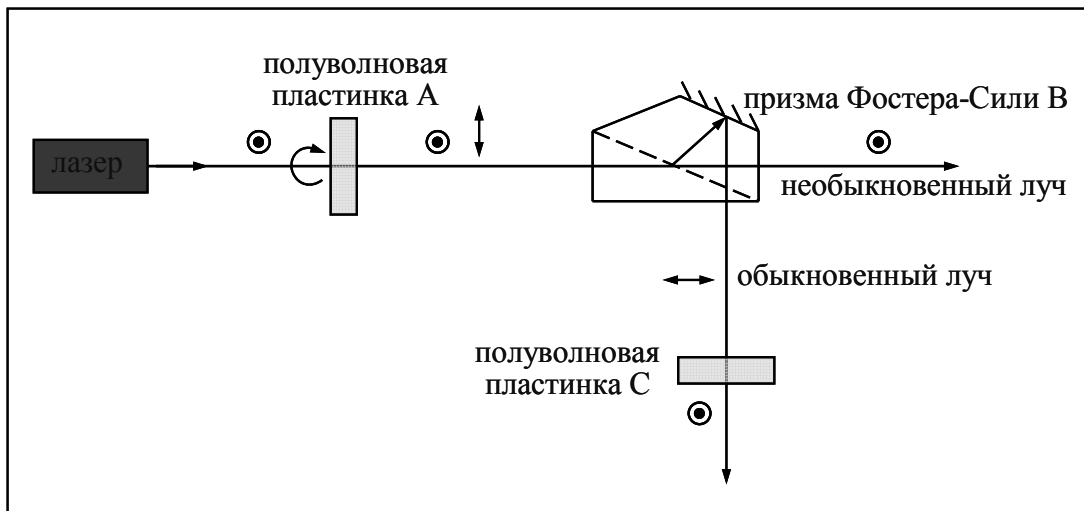


Рис.10.4.Поляризационный делитель лазерного пучка по амплитуде на основе двупреломляющей призмы [1].

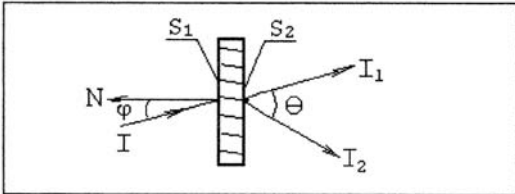
Широкие перспективы в качестве делителя лазерного пучка (именно лазерного пучка, обладающего определенными спектральными и пространственными характеристиками) имеют голограммы-решетки, полученные в объемных регистрирующих средах [4]. Делитель лазерного пучка по амплитуде на основе объемной голограммы обладает рядом принципиальных преимуществ, важнейшим из которых является возможность получения двух когерентных пучков с нулевой разностью хода при угле между пучками, который может иметь заранее заданную величину, причем довольно незначительную, в отличие от устройств на основе кубиков, полупрозрачных зеркал и др. Применение таких делителей требует определенной точности установки элемента в оптической схеме, а пространственный и временной спектры двух пучков могут различаться, если угловая селективность используемой голограммы меньше пространственного спектра разделяемого на когерентные пучки излучения. Основная информация о возможностях голограммного делителя приведена на рис.10.5.

Пример голографической схемы, предназначенной для записи голограмм-решеток, в которой используется принцип деления волнового фронта по амплитуде, приведен на рис.10.6. В данной схеме деление на два когерентных пучка осуществляется с помощью призмного интерферометра (на выходе из которого пучки имеют практическую нулевую разность хода), основным элементом которого является светоделительный кубик.

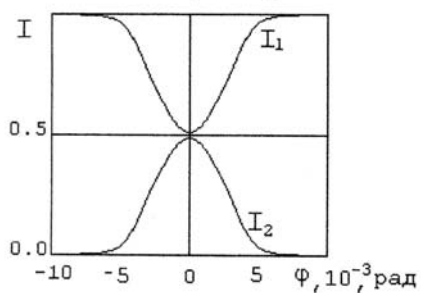
ОПТИЧЕСКИЙ ЭЛЕМЕНТ для получения двух когерентных пучков в голографических и интерферометрических схемах.

ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ:

- малый угол между когерентными пучками ($< 90^\circ$)
- низкие потери ($< 1\%$)



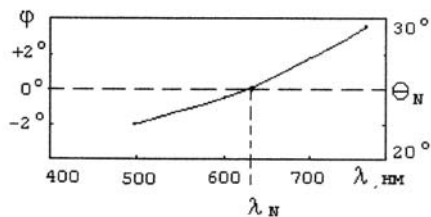
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ
в пучках I_1 и I_2



РАБОЧИЕ ПАРАМЕТРЫ

Обозначение	Опытный образец	Допустимый интервал при изготовлении
Длина волны, λ_N , нм (для $\Phi=0$)	633 нм	(450-1000) нм
Угол между пучками, Θ_N (для $\Phi=0$ и λ_N)	25°	$5^\circ - 90^\circ$
Угол падения пучка на делитель, $\Phi_{\text{раб}}$	0°	$0^\circ - 45^\circ$
Соотношение пучков по интенсивности, $I_1 : I_2$	50:50	от 50:50 до 5:95

ХАРАКТЕРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ



- Изменения λ и Θ при $\Phi \neq 0$

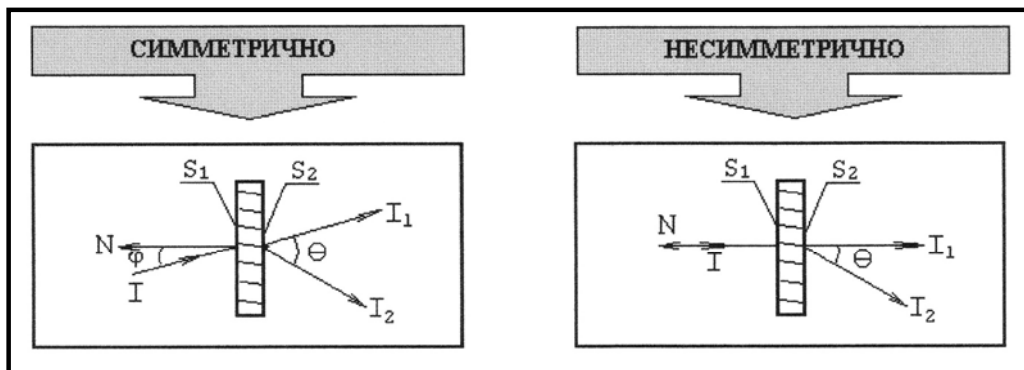
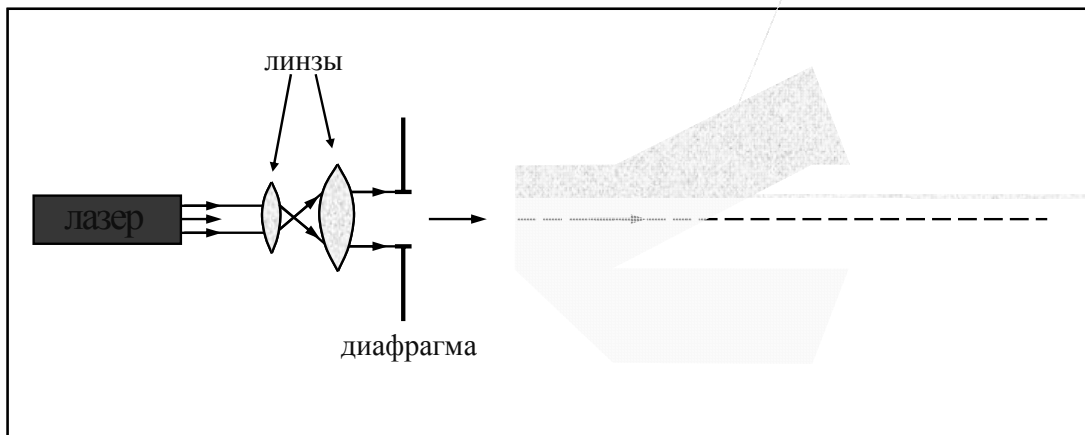


Рис.10.5. Малоугловой делитель лазерного пучка по амплитуде на основе объемной голограммы-решетки.



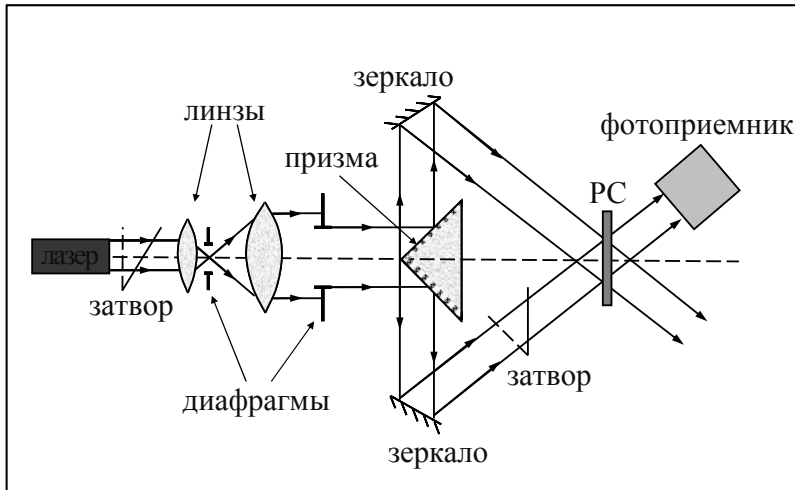


Рис.10.8. Голографическая схема, в которой реализован принцип деления лазерного пучка по волновому фронту при использовании в качестве делителя прямоугольной призмы.

Рассмотрим другие узлы голографической схемы, среди которых основным является узел расширения пучка излучения. Расширение лазерного пучка производится, как правило, с целью формирования сферического пучка с заданной расходимостью (заданным пространственным спектром) либо формирования коллимированного (параллельного) лазерного пучка требуемого диаметра. При расширении лазерного пучка обычно осуществляют и его пространственную фильтрацию путем установки точечной диафрагмы в фокусе оптической системы, как это показано на рис.10.9.

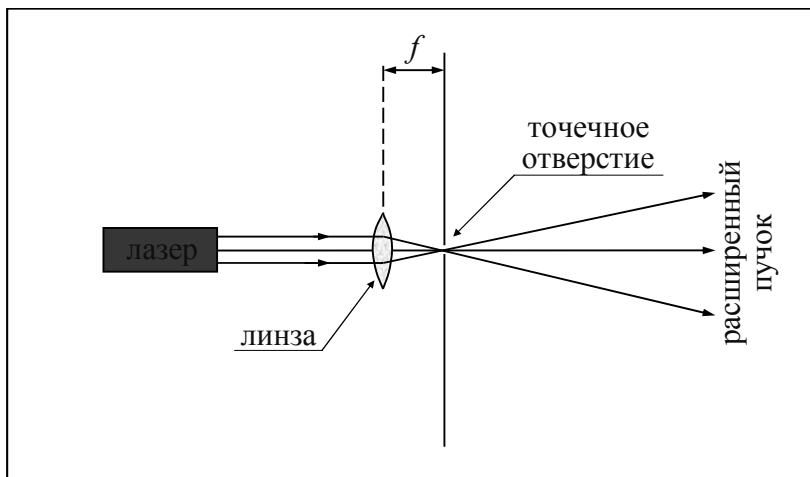


Рис.10.9. Формирование сферического пучка лазерного излучения и его фильтрация с помощью точечной диафрагмы.

Для получения коллимированного лазерного пучка нужного диаметра используют так называемые телескопические системы (рис.10.10), состоящие из двух линз (оптических систем), фокуса которых совмещены. Увеличение диаметра пучка определяется соотношением фокусных расстояний используемых линз (или оптических систем).

Система с положительной линзой, в которой задний фокус f_1 положительной линзы L_1 совмещен с передним фокусом f_2 положительной линзы L_2 позволяет осуществить фильтрацию излучения от шумовых волн с помощью точечной диафрагмы, установленной в точке совмещения фокусов.

Система с отрицательной линзой, в которой также задний фокус f_1 отрицательной линзы L_1 совмещен с передним фокусом f_2 положительной линзы L_2 , предпочтительна при использовании лазерного излучения большой мощности, так как в ней не происходит фокусировки лазерного пучка, которая может вызвать нежелательные эффекты, связанные с большой плотностью мощности излучения в оптической системе.

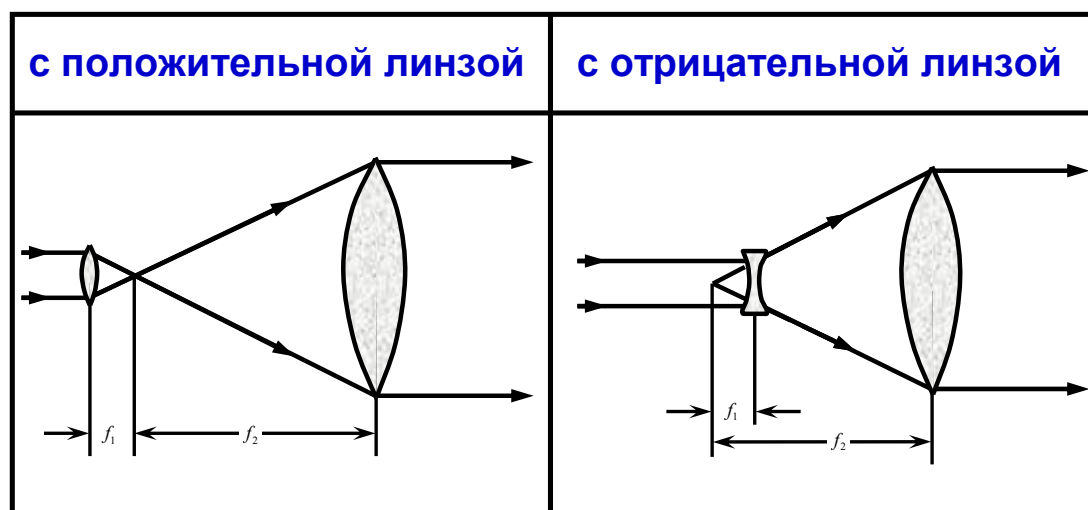


Рис.10.10.Примеры телескопических систем, формирующих коллимированный пучок лазерного излучения.

Расширение лазерного пучка можно производить в голографической схеме до деления пучка или после него. Каждая из модификаций схемы имеет свои преимущества и недостатки, поэтому вид схемы зависит от конкретных условий эксперимента.

Если делитель установлен в лазерном пучке до его расширения, имеются следующие преимущества: малый диаметр светового пучка, что приводит к снижению габаритов делителя; дефекты пучка, вносимые

делителем, могут быть устранены при расширении; объектный и референтный пучки формируются разными оптическими узлами. К недостаткам в этом случае следует отнести увеличение количества оптических элементов в схеме и повышение требований к стабильности установки.

Последние недостатки могут быть устранены, если делитель установлен в лазерном пучке после его расширения. При этом снижается количество элементов за счет использования одного набора элементов для расширения пучка. Однако при этом повышаются требования к габаритам за счет увеличения диаметра делимого пучка.

Фильтрация лазерного пучка от шумовых волн и рассеянного излучения осуществляется по принципиальной схеме, изображенной на рис.10.9, с помощью оптико-механического узла, изображенного на рис.10.11. Узел состоит из двух основных элементов – микрообъектива (фокус которого находится за пределами объектива – перед выходной поверхностью) и точечной диафрагмы, установленной в оправе с возможностью двухкоординатного позиционирования. Микрообъектив и диафрагма могут перемещаться друг относительно друга по оптической оси системы с большой точностью. Это позволяет установить диафрагму таким образом, чтобы ее положение совпало с задним фокусом микрообъектива (МО). Размер диафрагмы подбирается в соответствии с параметрами МО, чтобы диаметр круглой диафрагмы соответствовал диаметру пятна Эри в фокальной плоскости МО. В этом случае диафрагма пропускает только нулевой дифракционный порядок и задерживает дифрагированное излучение, которое представляет собой в основном шумовые волны и излучение, рассеянное на оптических неоднородностях элементов схемы.

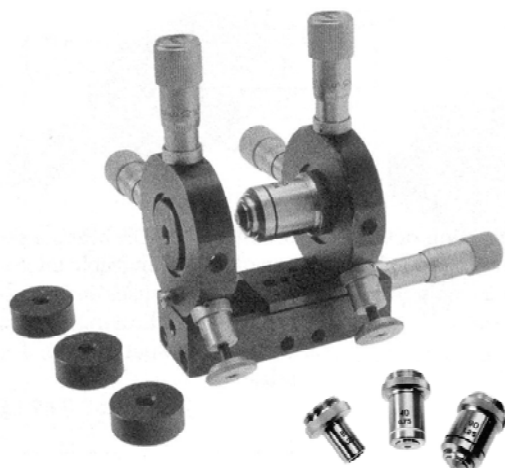


Рис.10.11. Оптико-механический узел, осуществляющий фильтрацию лазерного излучения от шумовых и рассеянных волн.

Важным моментом при регистрации голограмм является состояние поляризации интерферирующих пучков. Как уже было сказано, при регистрации голограмм наиболее предпочтительным является линейно-поляризованное излучение. При этом необходимо схему регистрации сформировать таким образом, чтобы колебания электрического вектора в пучке используемого излучения происходили в направлении, перпендикулярном плоскости расположения оптической схемы, как это показано на рис.10.12.

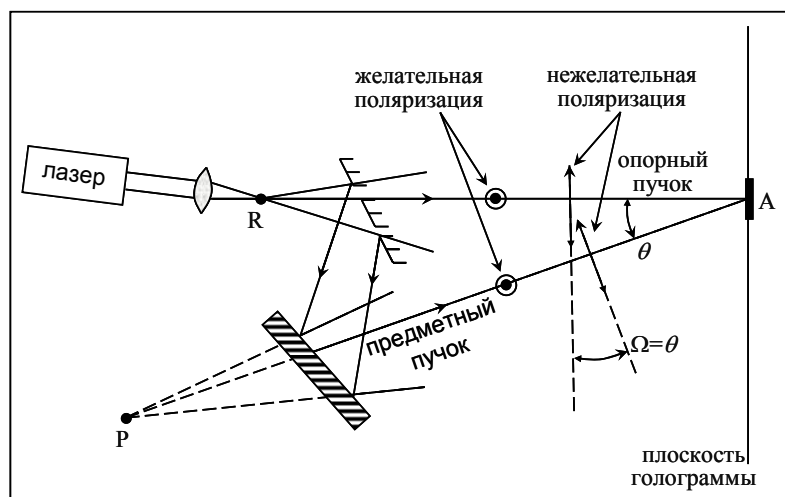


Рис.10.12.Пример голографической схемы с указанием предпочтительного направления колебаний электрического вектора. А – область регистрации голограммы.

Если излучение лазера линейно поляризовано, но направление поляризации является нежелательным, можно использовать различные способы, позволяющие повернуть направление колебаний электрического вектора.

В первую очередь используются фазовращающие пластинки (полуволновые пластинки), действие которых основано на двулучепреломлении: разность фаз между обыкновенным и необыкновенным лучами изменяется при прохождении лучей через пластинку, толщина которой подбирается таким образом, чтобы для определенной длины волны эта разность равнялась $\lambda/2$. При прохождении через полуволновую пластинку, установленную как показано на рис.10.13, направление колебаний вектора E изменяется на 90^0 и соответствует требованиям регистрации голограмм.

Изменить направление колебаний электрического вектора в лазерном излучении можно при использовании в оптической схеме двух

прямоугольных призм (см.рис.10.14) в определенной геометрической комбинации.

Для стабилизации элементов голографических схем их размещают на массивном жестком основании, при этом используют различные виброизолирующие системы, пример одной из таких систем приведен на рис.10.15.

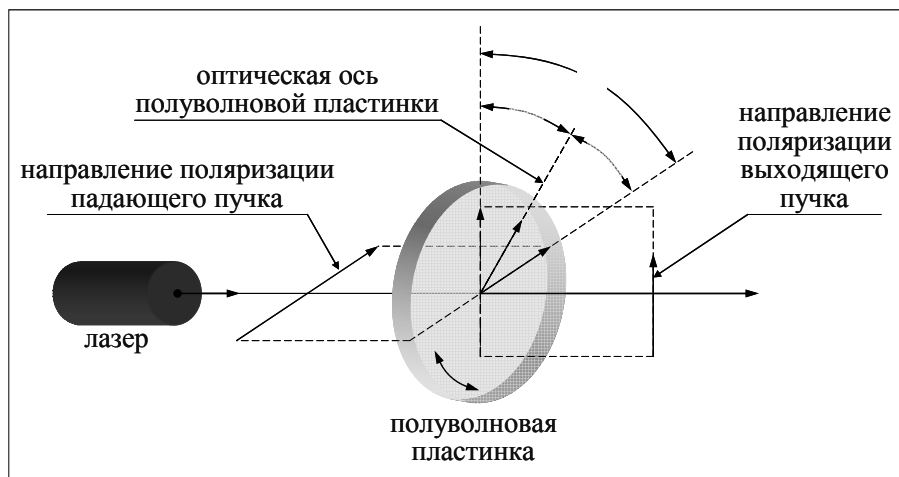


Рис.10.13.Изменение направления колебаний электрического вектора E в линейно поляризованном излучении с помощью полуволновой пластинки.

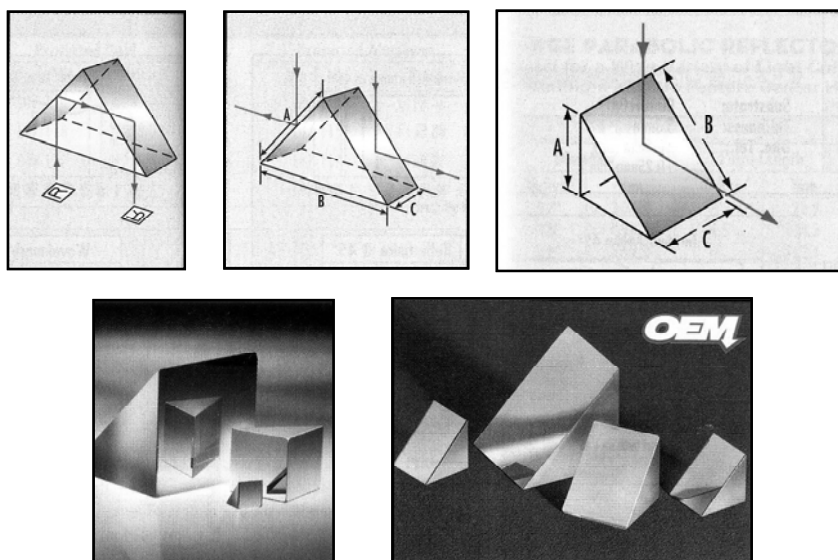


Рис.10.14.Прямоугольная призма – многофункциональный элемент голографической схемы.



Рис.10.15.Пример голографической установки, механическую стабильность которой обеспечивает виброизолирующий стол фирмы «Станда».

Литература

1. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. - М.:Мир. 1973. – 686 с.
2. Островский Ю.И. Голография и ее применение. - Л.:Наука. 1973. – 180 с.
3. Денисюк Ю.Н. Принципы голографии. - Л.:ГОИ. 1978. – 125 с.
4. Голография и голограммная оптика // Оптический журнал. 1994. №1. С. 26-70.
5. Оптическая голография / Под ред. Колфилда Г. - М.:Мир. 1982. - т.1,т.2. – 736 с.
6. Chung J. Kuo. Three-Dimensional Holographic Imaging. 2002. Wiley. (<http://eu.wiley.com>)
7. Вьено Ж.-Ш., Смигальский П., Руайе А. Оптическая голография. Развитие и применение / Перевод под ред. Ю.Н.Денисюка. – М.:Мир. 1973. – 214 с.
8. Миллер М. Голография: теория, эксперимент, применение / Перевод под ред. В.И. Суханова. - Л.:Машиностроение. 1979. – 207 с.

§11. Регистрирующие среды для голографии.

Регистрирующие среды для голографии – светочувствительные материалы, 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 . [1]. Регистрирующие среды для голографии являются светочувствительными материалами, предназначенными в первую очередь для целей голографии, поэтому имеют специфические особенности, которые следует учитывать при их применении и разработке.

Кроме основных сенситометрических характеристик (чувствительность, спектральная чувствительность и т.п.), используемых при оценке качества традиционных фотоматериалов, для голографических регистрирующих сред большое значение имеют параметры, определяющие возможность регистрации голограмм определенного типа: разрешение, толщина и фотоотклик материала [1-3].

- Разрешение материала (R) характеризуется максимальной пространственной частотой голограммы (минимальным периодом интерференционной картины), которая может быть зарегистрирована на данном материале и определяет возможность использования данного материала в определенной голографической схеме.
- Толщина материала (T) - одна из важнейших характеристик голографических регистрирующих сред, так как соотношение между периодом голограммы (d) и ее толщиной определяет тип голограммы (двумерная или трехмерная) и ряд важнейших характеристик, таких как: селективность, количество порядков дифракции, и т.д.
- Фотоотклик материала – отклик материала на световое воздействие определяет модуляцию определенного оптического параметра среды (соответственно, тип голограммы: амплитудная, фазовая, рельефно-фазовая); а также определяет характер изменения оптического параметра – обратимый или необратимый (соответственно, регистрирующие среды могут быть реверсивными и нереверсивными, а зарегистрированные голограммы - динамическими или статическими).

Проведение конкретного эксперимента, связанного с регистрацией голограмм, в ряде случаев предъявляет специфические и дополнительные требования к регистрирующим средам.

Например, светочувствительные материалы, разработанные для использования в голографических схемах с непрерывными источниками излучения, не могут иметь такие же номинальные характеристики при использовании в схемах с импульсными лазерами в связи с тем, что чувствительность фотоматериалов значительно снижается при уменьшении времени экспозиции (закон невзаимозаменяемости).

Необходимость обеспечения механической стабильности голографической схемы и стабильности параметров излучения в ряде случаев требует максимального сокращения времени экспозиции при съемке голограмм и повышения чувствительности используемых регистрирующих материалов.

Рассмотрим важнейшие характеристики используемых в голографии регистрирующих сред – чувствительность, разрешение, динамический диапазон - и способы их оценки.

Чувствительность регистрирующих сред для голографии

Чувствительность, традиционно обозначаемая символом S , характеризует свойство материала реагировать на уровень (количество) энергии воздействующего излучения. Чувствительность традиционных фотографических материалов определяется по энергии или по количеству освещения (экспозиция), которые нужно сообщить материалу для получения (после химико-фотографической обработки) определенного фотографического эффекта, например, заданной оптической плотности (D).

Чувствительность фотографического материала (как и любого светочувствительного материала) определяется по отношению к излучению определенного спектрального состава. Чувствительность фотографических материалов к излучению широкого спектрального интервала (интегральная чувствительность S) определяется на специальных приборах – сенситометрах. Источниками излучения в них служат лампы накаливания, имеющие определенную цветовую температуру ($2850\text{ }^{\circ}\text{K}$) и снабженные светофильтрами, которые дают возможность изменять цветовую температуру излучения.

Спектральная чувствительность S_{λ} – чувствительность к излучению определенного, как правило, достаточно узкого спектрального интервала, характеризуемого одной длиной волны. Для фотографических материалов S_{λ} определяется по отношению к монохроматическому излучению определенной длины волны λ с помощью специального прибора – спектросенситометра.

В мировой практике существуют различные способы выражения и оценки чувствительности светочувствительных материалов. В нашей

стране под интегральной чувствительностью понимают величину, обратную количеству освещения, которое необходимо для получения оптической плотности проявленного фотографического слоя 0,2 сверх вуали ($S_{0,2}$). $S_{0,2}$ измеряется в единицах ГОСТа и ее величина обратно пропорциональна экспозиции, необходимой для достижения искомой плотности. Таким образом, чем меньше величина экспозиции, необходимая для получения данной плотности почернения, тем выше чувствительность материала. В нашей стране также существует характеристика интегральной чувствительности - $S_{0,85}$, величина, обратная количеству освещения, которое необходимо для получения оптической плотности материала 0,85 сверх вуали, умноженная на десять. Величина $S_{0,85}$ используется наряду с $S_{0,2}$, но значительно реже. Под спектральной чувствительностью S_λ понимается величина, обратная количеству энергии монохроматического излучения, необходимому для получения оптической плотности проявленного материала, равной единице, сверх оптической плотности вуали.

Под оптической плотностью вуали (D_0) понимается оптическая плотность незасвеченного (неэкспонированного) участка фотографического материала после химико-фотографической обработки.

Для определения чувствительности и некоторых других параметров светочувствительных материалов используют так называемую «характеристическую кривую» - кривая зависимости оптической плотности материала (D) от логарифма экспозиции ($\lg H$).

Понятие "Экспозиция" (H) применяется при описании физических процессов в том случае, если результат воздействия излучения накапливается во времени, например, при регистрации информации в фотографии и в голографии.

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).

Чувствительность голографических регистрирующих материалов, как правило, характеризуют уровнем энергии (экспозицией H), который необходим для достижения определенных голографических параметров; например, достижения 1% дифракционной эффективности ($H_{1\%}$). $H_{1\%}$ - это экспозиция, необходимая для достижения 1% дифракционной эффективности голограммы. Используют также голографическую чувствительность – $S_{\text{гол}}$, как величину, обратно пропорциональную экспозиции, при которой дифракционная эффективность достигает 1%.

При получении трехмерных (объемных) голограмм чаще всего используют понятие «Оптимальная экспозиция» ($H_{\text{опт}}$). $H_{\text{опт}}$ – наименьшая экспозиция, при которой достигается область максимальных значений дифракционной эффективности регистрируемых голограмм. Для сравнения укажем, что фотографические материалы, используемые для регистрации изобразительных голограмм, имеют чувствительность $S_{0,2} \sim 0,001$ единиц ГОСТа и характерные значения оптимальных экспозиций $H_{\text{опт}} \sim 0,1 \div 0,01 \text{ Дж/см}^2$. На рисунке 11.1 приведена важная характеристика светочувствительных материалов для голографии – зависимость дифракционной эффективности от экспозиции и указана область оптимальных экспозиций.

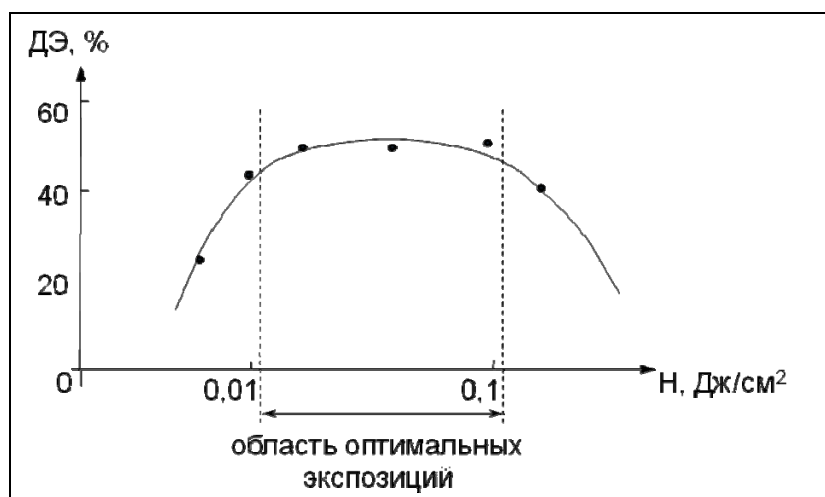


Рис.11.1. Зависимость дифракционной эффективности (ДЭ) отражательных трехмерных голограмм-решеток от экспозиции (H) для фотографических материалов, используемых при регистрации изобразительных голограмм по методу Ю.Н.Денисюка. Указана область оптимальных экспозиций – $H_{\text{опт}}$.

Разрешение регистрирующих сред для голографии

Разрешение светочувствительного материала (R), как правило, определяется значением максимальной пространственной частоты голограммы, которая может быть эффективно зарегистрирована. Величина максимальной пространственной частоты излучения для данного типа голограмм является важной величиной при выборе регистрирующей среды для ее получения.

Пространственная частота голограммы (ν) – величина, обратно пропорциональная пространственному периоду (d) 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 в см^{-1} . Любую голограмму можно представить как результат наложения элементарных голограмм, ориентированных произвольно, и характеризовать набором (спектром) пространственных частот. Обычно выделяют среднюю ($\bar{\nu} = 1/\bar{d}$), минимальную ($\nu_{\min} = 1/d_{\max}$) и максимальную ($\nu_{\max} = 1/d_{\min}$) пространственную частоту голограммы, последняя определяет разрешение регистрирующей среды (R), необходимое для записи всех пространственных частот голограммы. Следует отметить, что наименьшей пространственной частотой обладают осевые голограммы, полученные, например, по схеме Габора. В схеме Денисюка $\bar{\nu}$ максимальна и близка к $2/\lambda$.

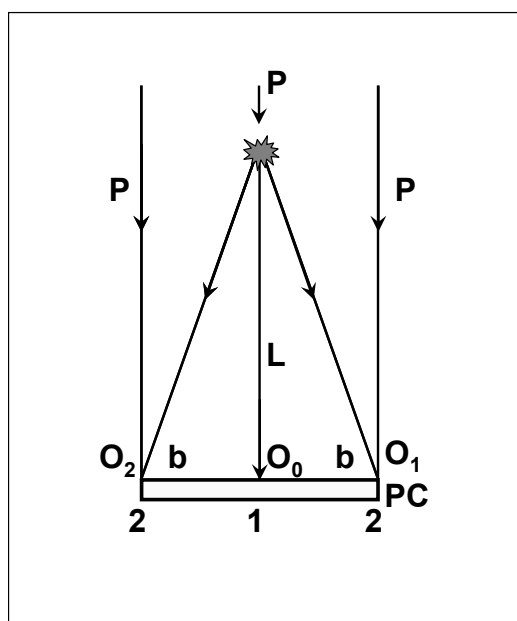


Рис.11.2.Изменение пространственной частоты голограммы (периода интерференционной структуры) при ее формировании плоским (P) и сферическим (O) волнами: на участке №1 регистрирующей среды (PC) – пространственная частота минимальна и близка к нулю; на участке №2 – пространственная частота максимальна

При записи голограммы период интерференционной структуры может изменяться в пределах площади голограммы, соответственно изменяется и пространственная частота голограммы. На рис.11.2. приведена схема формирования интерференционной картины в плоскости регистрирующей

среды (РС) при записи голограммы плоской референтной волной (Р) и сферической волной (О) от объекта-точки. На участке «1» регистрирующей среды период интерференционной картины максимален, так как интерферирующие пучки распространяются параллельно друг другу, а пространственная частота голограммы – минимальна (≈ 0). Максимальная пространственная частота голограммы (ν_{\max}) формируется на участках регистрирующей среды «2», где угол между интерферирующими пучками максимален ($2\theta = \arctg b/L$), период интерференционной картины составляет минимальную величину (d_{\min}), а пространственная частота голограммы максимальна (ν_{\max}).

Разрешение материала, необходимое для регистрации всех пространственных частот голограммы должно быть $R \geq \nu_{\max}$. Его можно оценить, используя выражение:

$$R \geq 2n \sin \theta / \lambda \quad (11.1),$$

где n – показатель преломления регистрирующей среды, 2θ – максимальный угол между интерферирующими пучками в среде, λ – длина волны излучения в воздухе [1].

В голографии в большинстве случаев при исследовании и разработке регистрирующих сред используют для характеристики разрешающей способности светочувствительного материала не конкретное число, относящееся к определенной пространственной частоте, а функцию передачи контраста (ФПК), или частотно-контрастную характеристику (ЧКХ). Такая функция характеризует зависимость амплитуды зарегистрированной голограммы-решетки (синусоидальной структуры) от периода (пространственной частоты) этой структуры и более полно характеризует регистрирующий материал, чем предельное значение R . Непостоянство ФПК (ЧКХ) в пределах пространственно-частотного спектра регистрируемой интерференционной картины различным образом влияет на качество изображения, восстановленного голограммами различного типа: для фурье-голограмм оно приводит к ограничению поля зрения, для голограмм Френеля – к падению разрешения в восстановленном изображении.

В связи с этим фактом следует отметить фундаментальное свойство голографического метода записи информации: тип голограммы (как и разрешающая способность регистрирующего материала) не оказывает принципиального влияния на конфигурацию изображения, полученного с помощью восстановленной голограммой волны. Однако это ни в коем случае не означает, что свойства голограммы вообще не зависят от свойств регистрирующего материала.

Разрешение ряда светочувствительных сред, в том числе и галогенидосеребряных фотографических материалов, при увеличении пространственной частоты снижается (рис.11.3, кривая 2). В то же время существуют регистрирующие среды, при использовании которых ФПК (ЧКХ) увеличивается при увеличении пространственной частоты голограммы (рис.11.3, кривая 1). Такой характер зависимости имеют материалы с диффузионным усилением, в которых амплитуда модуляции решетки зависит от скорости диффузии компонент противофазной структуры.

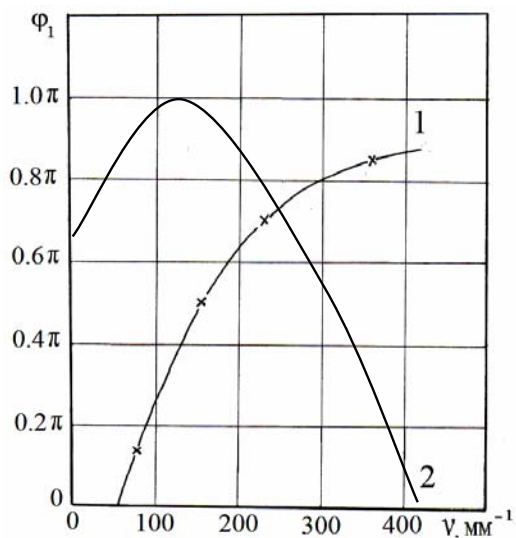


Рис.11.3. Зависимость амплитуды фазовой модуляции от пространственной частоты голограммы-решетки (ФПК, ЧКХ) при использовании материалов с диффузионным усилением (кривая 1) и галогенидосеребряных фотографических материалов (кривая 2).

Динамический диапазон регистрирующих сред для голографии

Динамический диапазон регистрирующих сред характеризует возможность регистрации сигнала (информации) на данном материале в линейном режиме. Линейность режима записи играет важную роль при регистрации голограмм, так как неискаженная передача интерференционной структуры обусловлена именно возможностью линейной регистрации сигнала и связана с динамическим диапазоном светочувствительного материала.

Линейный и нелинейный режимы записи голограмм. Важной характеристикой, определяющей параметры полученной голограммы, является режим записи голограммы, который может быть линейным и нелинейным. 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.

Характер режима записи голограммы («линейный» или «нелинейный») зависит от условий проведения эксперимента и ряда параметров регистрирующей среды, влияющих, в том числе и на ее динамический диапазон. Большое значение имеет линейность записи голограммы по площади регистрирующей среды, по объему (толщине) образца и ряд других факторов.

Напомним, что при осуществлении линейного режима записи голограммы-решетки изменение ее оптических постоянных можно описывать выражениями $\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot \text{Cos}(2\pi x/d)$ (5.7) и $n = n_0 + n_1 \cdot \text{Cos}(2\pi x/d)$ (5.8).

Динамический диапазон (D) характеризуется интервалом экспозиций (от H_{\min} до H_{\max}), в пределах которого возможна запись интерференционной структуры в линейном режиме. Динамический диапазон численно может быть определен как логарифм отношения H_{\min} / H_{\max} и измерен в децибелах

$$D = 0,1 \lg (H_{\max}/H_{\min}), \text{ dB (дБ)} \quad (11.2).$$

Значения экспозиций H_{\max} и H_{\min} , определяющие динамический диапазон, для каждого типа регистрирующей среды обусловлены различными физическими причинами. В зависимости от условий эксперимента, типа голограммы и т.п. динамический диапазон может быть определен и измерен различными способами, например, динамический диапазон среды может быть определен для каждой пространственной частоты регистрируемой голограммы.

В последнее время для характеристики динамического диапазона материалов, предназначенных для записи элементов архивной памяти и регистрации большого количества наложенных голограмм, используют характеристику $\Sigma\varphi_1$ [4], которая является суммой значений амплитуд фазовой модуляции всех наложенных голограмм, зарегистрированных на данном участке регистрирующей среды, т.е. голограмм, составляющих мультиплексную голограмму. На рис.11.4. 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. Часть этой зависимости можно аппроксимировать прямой линией, в пределах которой осуществляется режим линейной записи, т.е. фазовая модуляция зарегистрированной голограммы прямо пропорциональна ее экспозиции.

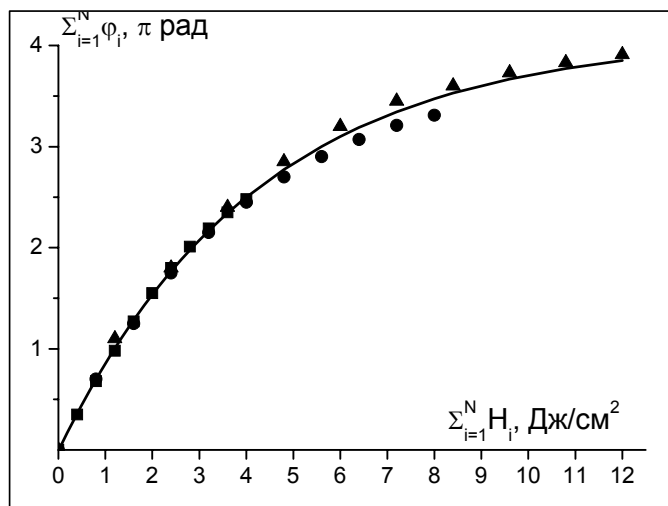


Рис.11.4. Зависимость суммарной амплитуды фазовой модуляции наложенных голограмм от их суммарной экспозиции (условные обозначения экспериментальных точек соответствуют голограммам с различными экспозициями) [4].

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 $\Sigma\phi_1 \cong 12$ радиан. Заметим, что для получения голограммы с ДЭ=50% необходимо обеспечить $\phi_1 \cong 0,75$ рад, в то время как при записи голограмм на голографический диск необходимая ДЭ, как правило, не превышает 1%.

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

Толщина регистрирующей среды и ее влияние на свойства голограммы

Толщина регистрирующей среды в большинстве случаев является определяющим фактором при формировании характеристик голограммы. Как уже было сказано, при $T_v \rightarrow 0$ голограмма является двумерной, при $T_v \rightarrow \infty$ - трехмерной. На практике, как правило, светочувствительный материал имеет определенную толщину и используется для получения голограмм определенного типа с требуемыми параметрами. На таких

образцах, например, на фотографических пластинках с толщиной светочувствительного слоя 10 мкм, в зависимости от геометрии записи можно получить и двумерные голограммы (например, голограммы Габора или Фраунгофера, где $v \rightarrow 0$) и трехмерные голограммы (например, голограммы Денисюка, где $v \rightarrow 2/\lambda$). Для получения голограмм, которые по своим свойствам можно считать двумерными, используются «тонкие» регистрирующие среды, как правило, в виде пленок (например, фототермопластики), толщиной которых можно пренебречь при рассмотрении характеристик голограмм.

В зависимости от типа регистрирующей среды в настоящее время различают следующие типы трехмерных голограмм: тонкослойные трехмерные голограммы - статические трехмерные голограммы в средах толщиной порядка 10-20 мкм; объемные (глубокие, 3D) голограммы - статические трехмерные голограммы в средах толщиной порядка 1000 мкм и более; динамические трехмерные голограммы, получаемые на реверсивных регистрирующих средах различной толщины [5,6].

Регистрирующие среды для трехмерной голографии

В настоящее время разработка и применение регистрирующих сред для трехмерной голографии сосредоточены в трех основных направлениях [2]:

- изобразительная голография
- фототехнология изготовления голографических оптических элементов
- информационные фототехнологии.

Наибольший интерес представляют фоторефрактивные материалы различного типа, т.е. материалы, в которых распределение интенсивности излучения в интерференционной картине преобразуется в изменение показателя преломления среды.

Галогенидосеребряные регистрирующие среды остаются основными регистрирующими материалами для изобразительной голографии и представляют собой промышленно выпускаемые фотоматериалы широкого ассортимента. Наиболее доступны в настоящее время галогенидосеребряные регистрирующие материалы отечественного производства, выпускаемые для регистрации голограмм излучением различных лазеров видимого диапазона с разрешением до 10000мм^{-1} [2].

Регистрирующие среды для получения объемных голограмм, предназначенных для создания голограммных оптических элементов, элементов систем архивной оптической памяти, и, особенно, для систем дисковой оперативной оптической голографической памяти, находятся в стадии разработки и создания промышленных образцов. Как правило,

такие регистрирующие среды изготавливаются в лабораторных условиях мелкосерийными партиями.

Следует отметить, что бурное развитие двумерной голографии в 60-70-х годах XX-го века было обеспечено тем, что для практических приложений двумерной голографии были использованы существующие промышленно выпускаемые светочувствительные материалы.

Получение объемных голограмм предъявляет целый комплекс требований к регистрирующим средам для их записи, часть которых далеко выходит за рамки возможностей традиционных материалов:

- 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.

В 70-80-х годах XX-го века практическое развитие объемной голографии сдерживало отсутствие светочувствительных материалов, удовлетворяющих комплексу данных требований. Особенно трудным оказалось создание регистрирующих сред большой толщины, при использовании которых геометрические размеры и характеристики образцов оставались бы неизменными с большой точностью (порядка нм) при регистрации голограмм, их постэкспозиционной обработке и дальнейшей эксплуатации.

Принципы конструирования объемных регистрирующих сред

При создании регистрирующих сред для объемной голографии большой вклад был внесен научными школами Государственного Оптического Института им. С.И.Вавилова [6]. В 80-х годах XX века были выдвинуты принципы конструирования, на основе которых был создан целый ряд принципиально новых объемных высокоразрешающих светочувствительных материалов, удовлетворяющих вышеприведенным требованиям [2,5-7].

В первую очередь был предложен принцип создания композиционной структуры безусадочных регистрирующих сред с толщиной порядка нескольких миллиметров. Принцип композиционной структуры заключается в следующем: регистрирующая среда представляет собой

композиционный материал, состоящий из жесткого каркаса и светочувствительной композиции.

Были разработаны композиционные материалы с различными вариантами светочувствительных композиций на основе нанопористых стекол двух типов, характеристики которых приведены на рис.9.5.

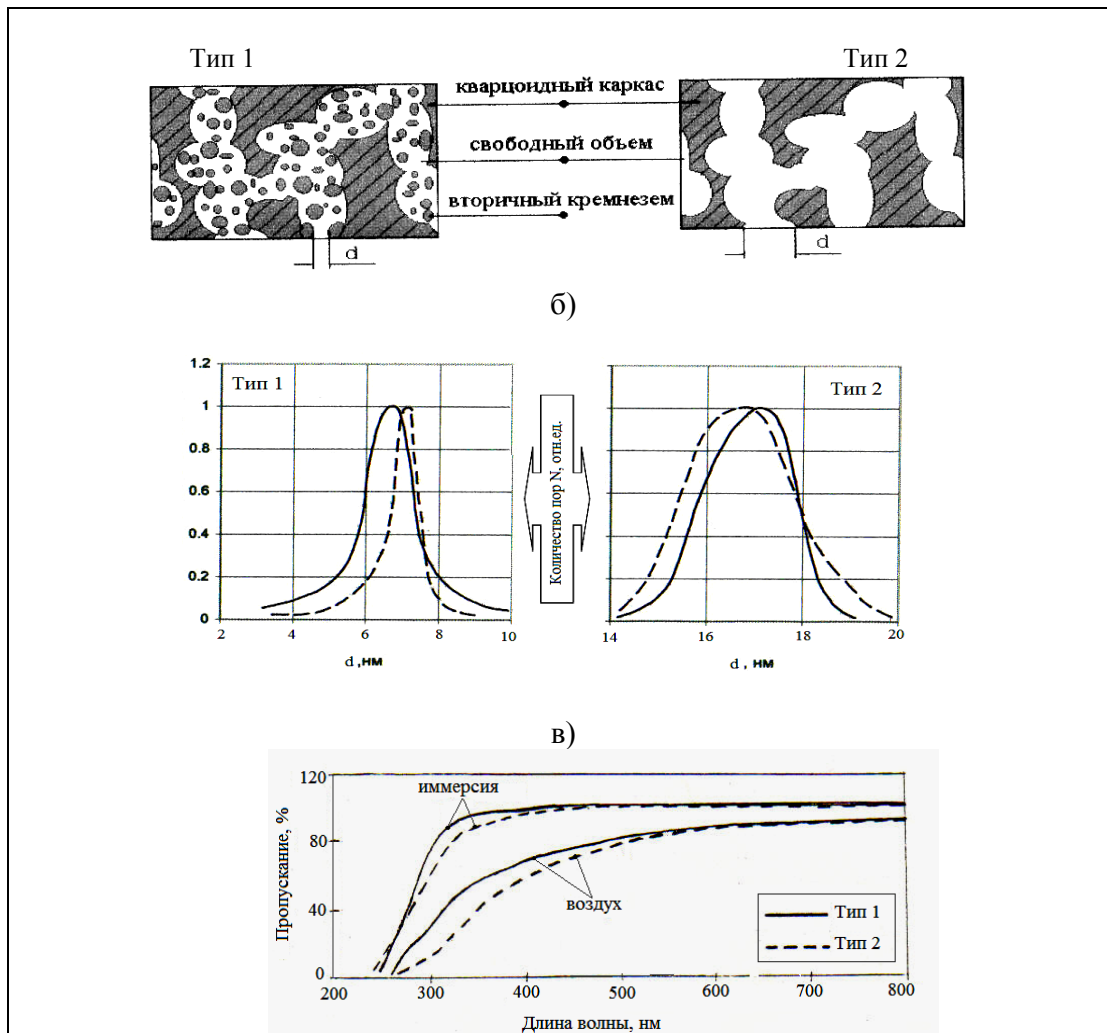


Рис.11.5.а – структура пористого стекла различных типов; б - распределение пор по размерам в пористых стеклах различных типов, сплошные кривые – образец толщиной 1мм, пунктир – середина образца толщиной 0,2 мм; в – спектры пропускания пористых стекол различных типов.

Наиболее эффективными оказались светочувствительные композиции на основе бихромированной желатины и галоидного серебра. Регистрирующие среды на основе пористых стекол по физико-

механическим свойствам близки к свойствам силикатного стекла и представляют собой практически безупрочные материалы (в настоящее время только лабораторного изготовления).

Примером композиционных материалов могут служить галогенидо-серебряные пористые регистрирующие среды для получения статических голограмм [8]. Процесс получения голограмм на таких средах содержит этапы, аналогичные процессу получения голограмм на традиционных галогенидосеребряных материалах: экспонирование и постэкспозиционная обработка в виде проявления, фиксирование, отбеливания.

Отличительные особенности галогенидосеребряных пористых регистрирующих материалов:

- высокая чувствительность;
- широта спектральной сенсibilизации;
- разнообразие методов постэкспозиционной обработки;
- высокая разрешающая способность.

Основой для получения галогенидосеребряных светочувствительных регистрирующих сред лабораторного изготовления являются пористые стекла типа 2 (см.рис.11.5), средний размер пор в которых составляет 16-18 нм. На рис.9.6а дано схематическое представление такой среды, основанное на визуализированных данных о структуре пористого стекла. При проведении расчетов и различного рода оценок часто пользуются упрощенной моделью пористой серебряносодержащей регистрирующей среды, которая приведена на рис.9.6б.

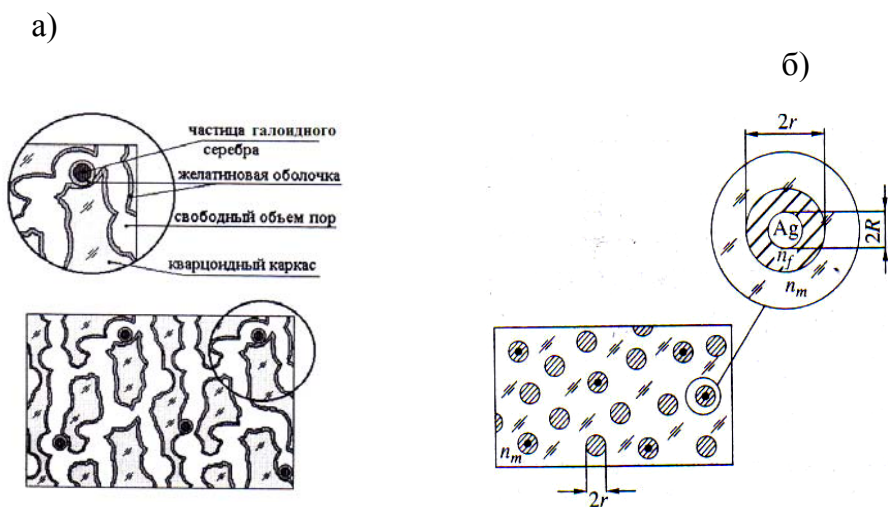


Рис.11.6.Схематическая структура пористой серебряносодержащей среды: а – визуализированный вариант, б - модель для проведения расчетов.

Светочувствительность пористой серебросодержащей регистрирующей среды обеспечивает галоидосеребряная композиция с желатиной в качестве защитного коллоида – традиционная светочувствительная композиция для изготовления фотографических материалов. До сих пор фотографические галоидосеребряные среды по совокупности параметров остаются непревзойденными светочувствительными материалами – их исследование и совершенствование имеют уже полуторавекую историю.

В список важнейших параметров галоидосеребряных слоев (среди которых – возможность получения высокой чувствительности, ширина спектральной сенсibiliзации, разнообразие методов постэкспозиционной обработки и т.д.) пористые галоидосеребряные среды добавляют еще один – возможность получения безусадочной среды значительной толщины, допускающей постэкспозиционную обработку химико-фотографическими растворами. Такую возможность обеспечивает пористое стекло – основа для изготовления пористых галогенидосеребряных сред, физико-химическая прочность которого близка к прочности силикатного стекла.

Следует обратить внимание также на то, что при химико-фотографической обработке пористых галогенидосеребряных сред формируются проявленные частицы серебра в виде коллоидных частиц серебра сферической формы, размер которых не может превышать максимальный диаметр пор, т.е. в данной среде после ее обработки не может быть частиц серебра с размером более 20 нм. Это создает условия для формирования среды, прозрачной в инфракрасной области спектра, которая может создавать эффективную фазовую модуляцию при получении голограмм и допускает введение иммерсии в свободный объем пор без снижения эффективности полученных голограмм. Кроме того, ограничение серебряных частиц по размеру (не более 20 нм в диаметре) в таких средах обеспечивает перспективу их использования при создании метаматериалов и наноразмерных оптических элементов. Трудоемкость и сложность получения таких регистрирующих сред могут быть компенсированы совокупностью параметров, недостижимых при использовании других сред и методов.

Принцип дисперсионной рефракции – способ формирования структуры голограммы путем изменения показателя преломления («рефракции») светочувствительного материала в результате воздействия регистрирующего излучения. Суть принципа сводится к тому, 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 (1978 г.; В.И. Суханов и Г.И. Лашков) для разработки принципиально новых регистрирующих сред для объемной голографии - фотохромных материалов с фотохимическим отбеливанием, и впервые применен авторами при создании полимерного светочувствительного материала «Реоксан»[5,6].

Изменение «рефракции» материала «Реоксан» (изменение его показателя преломления) под действием регистрирующего излучения и является основным способом формирования структуры голограммы. Светочувствительные компоненты данного материала растворены в полимерной матрице, которая обеспечивает жесткий каркас (твердую основу) светочувствительной среды.

Расширение ассортимента объемных регистрирующих сред и улучшение их эксплуатационных характеристик связано с реализацией третьего основного принципа конструирования объемных регистрирующих сред – принципа диффузионного усиления, который реализован при создании полимерных материалов на основе органического красителя фенантренхинона (ФХ). (Модификация среды, в которой реализован принцип диффузионного усиления – материал «Диффен» - подробно описан в приложении к лабораторным работам в учебно-методическом пособии «Прикладная голография. Методические материалы к экспериментальному практикуму», СПб, 2008)

Для сравнения в таблице 9.2. приведены основные характеристики объемных регистрирующих сред, разработанных в ГОИ для целей голографии.

Развитие объемной голографии обусловило появление динамической голографии, основанной на использовании нелинейных эффектов, возникающих в регистрирующей среде непосредственно в процессе воздействия излучения.

Таблица 11.2. Основные характеристики объемных регистрирующих сред, разработанных в ГОИ для целей голографии.

	Фотоматериал	Диффен
Светочувствительное вещество	AgHal	ФХ
Жесткая матрица	Пористое стекло	ПММА
Область спектральной чувствительности	<520; 580-650 нм	430-530 нм
Оптимальные экспозиции, $H_{\text{опт}}$, Дж/см ²	0,1-0,4	0,5-0,8
Динамический диапазон, D , рад.	>1,5	~14
Разрешение, R , мм ⁻¹	~5000	~5000

Динамическая голография представляет собой синтез голографии и нелинейной оптики, причем голография используется для описания сложных трансформаций волновых фронтов, а нелинейная оптика - для описания характера поведения светочувствительной среды при воздействии на нее излучения.

При получении динамических голограмм их параметры 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.). Различают стационарный и нестационарный режимы записи динамических голограмм. Стационарный режим записи, при котором амплитуда модуляции оптических параметров среды остается неизменной во времени, возможен, если время регистрации голограммы существенно превышает время ее релаксации. Нестационарный режим записи реализуется, если время записи голограммы меньше времени ее релаксации (или сравнимо с ним). При этом, благодаря возникающему пространственному рассогласованию голограммы относительно интерференционной картины формирующих ее волн, как правило, происходит нестационарный энергообмен - перераспределение энергии между взаимодействующими в объеме регистрирующей среды волнами, в результате которого возможно

значительное усиление слабых волн за счет более сильных (см. §5 данного пособия).

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 фоторефрактивные регистрирующие среды: электрооптические и жидкие кристаллы; резонансно поглощающие пары металлов, эффекты вынужденного и нелинейного рассеяния света и т.д.

Фоторефрактивные динамические среды – светочувствительные среды (светочувствительные материалы), в которых распределение интенсивности излучения в регистрируемом световом поле преобразуется в распределение изменения показателя преломления среды, а инициированные световым воздействием изменения параметров регистрирующей среды происходят непосредственно в процессе записи информации (под воздействием излучения). Различают динамические среды с локальным и нелокальным откликом: среда с локальным откликом (фоторефрактивная) – пространственное распределение фотоиндуцированного показателя преломления при записи синусоидальной интерференционной картины синфазно или противофазно распределению интенсивности в регистрируемой интерференционной картине; среда 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.

В качестве фоторефрактивных динамических регистрирующих сред в настоящее время используют фоторефрактивные кристаллы следующих веществ:

- ниобат лития (LiNbO_3);
- ниобат лития*, легированный атомами F ($\text{LiNbO}_3:\text{F}$);
- танталат лития (LiTaO_3);
- силикат висмута ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$);
- германат висмута ($\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$).

Также можно указать динамические регистрирующие среды, позволяющие получать амплитудно-фазовые голограммы - кристаллы фторида кадмия (CdF_2) с бистабильными примесными центрами [5].

Литература

1. Суханов В.И. Регистрирующие среды для голографии. В кн.: Физическая энциклопедия. 1994. т.4. с. 300-301.
2. Барачевский В.А. Светочувствительные регистрирующие среды: применение в голографии. В кн.: Ю.Н.Денисюк – основоположник отечественной голографии: Сборник трудов Всероссийского семинара/ СПб: СПбГУИТМО. 2007. - с. 226-240.
3. Мейкляр П.В. Физические процессы при образовании скрытого фотографического изображения. – М.:Наука. 1972.
4. Андреева О.В., Бандюк О.В., Пармонов А.А. и др. Высокоэффективные мультиплексные голограммы на полимерном материале «Диффен» // Оптич. Журнал. 2006. Т.73. №9. С. 60-63.
5. Суханов В.И., Вениаминов А.В., Рыскин А.И., Никоноров Н.В. Разработки ГОИ в области объемных регистрирующих сред для голографии. В кн.: Ю.Н.Денисюк – основоположник отечественной голографии: Сборник трудов Всероссийского семинара/ СПб: СПбГУИТМО. 2007. – с.262-276.
6. Суханов В.И. Трехмерные глубокие голограммы и материалы для их записи // Оптич. журн. 1994. №1. С. 61-70.
7. Денисюк Ю.Н. Некоторые проблемы и перспективы голографии в трехмерных средах // В кн.: Оптическая голография / Под ред. Колфилда Г. - М.:Мир. 1982. - т.2.- с.691-729.
8. Андреева О.В. Объемные регистрирующие среды для голографии на основе пористого стекла с галоидным серебром и полимера с фенантренхиноном // Проблемы когерентной и нелинейной оптики. СПб.: СПбГУИТМО. 2004. С. 58-88.

Часть 5. Цифровая голография и голографическая интерферометрия

§12. Цифровая голография.

Словосочетание «Цифровая голография» указывает на то, что практическая реализация голографического метода записи и воспроизведения информации осуществляется не в физическом эксперименте, а с помощью моделирования указанных процессов численными методами с использованием вычислительной техники.

Цифровая голография, как современное научно-техническое направление, имеет свои собственные технические проблемы и сложности, но принципиальная ситуация, связанная с использованием и применением данного направления, сформировалась к началу 70-х годов XX века. Этот взгляд на цифровую голографию, изложенный Ю.Н.Денисюком в предисловии к монографии «Цифровая голография» [1,2], не потерял своего принципиального значения и в настоящее время. Приводим его в сокращенном виде.

«Сотни исследователей детально и всесторонне изучают голографический процесс и факторы, влияющие на качество голограммы и восстановленного ею изображения. Однако голографический эксперимент и по настоящее время остается тонким физическим экспериментом, требующим уникального оборудования и большого мастерства от экспериментаторов, - слишком много факторов влияют на ход процесса получения голограммы и, в конечном счете, на ее качество.

- *Неравномерность лучистого потока в сечении предметного пучка искажает распределение интенсивности излучения в плоскости голограммы;*
- *фазовые неоднородности деталей оптической системы, дефекты фотослоя, неоднородности протекания фотохимического процесса по площади фотопластинки искажают фронты предметной и опорной волн;*
- *дефекты фотоэмульсионного полива непосредственно отражаются на качестве фотослоя;*
- *вибрации установки снижают разрешающую способность голограммы.*

Совокупное действие неблагоприятных факторов приводит к тому, что искажается микроструктура голограммы, безвозвратно теряется часть информации, а вместе с ней и надежда на получение высококачественного восстановленного изображения.

В детальном анализе микроструктуры голограммы, в установлении характера и степени подверженности ее рисунка действию разрушающих факторов лежит ключ к решению проблемы повышения качества голографирования.

Практика научных исследований показывает, что в тех случаях, когда сложность и взаимосвязанность физических процессов не позволяют в чистом виде анализировать протекание одного из них, можно с успехом использовать математическое моделирование, при котором за счет разумного абстрагирования от несуществующих факторов удастся выделить нужный процесс и проследить его ход.

С этой точки зрения цифровая голография может рассматриваться в том числе как метод моделирования голографии физической. Она несет с собой большие возможности мощного и гибкого машинного анализа процесса формирования голограммы, с одной стороны, а с другой – возможности органической стыковки вычислительного звена модели с реальными физическими звеньями на уровне исходного изображения, голограммы и восстановленного изображения.»

С точки зрения Ю.Н. Денисюка к моменту выхода цитируемого издания (1976г.) выявились следующие перспективные применения методов цифровой голографии:

- «расчет на ЭВМ заданных (в том числе оптимальных) голографических фильтров для осуществления пространственной фильтрации объектов, форма которых известно заранее;*
- восстановление изображений по голограммам, полученным неоптическими средствами (акустическими, радиолокационными и пр.);*
- визуализация условных изображений несуществующих предметов, например, рассчитанных на ЦВМ двумерных и трехмерных математических функций и т.д.»*

Ю.Н. Денисюк считает: «Что касается применения цифровой голографии в качестве метода исследования реальных голографических процессов, то, за исключением отдельных высказываний о такой возможности, сколько-нибудь исчерпывающих публикаций на эту тему до сих пор (1976г.) не появилось.»

«В то же время ждут своего решения такие вопросы, как выбор рационального способа корригирования оптических систем голограммными средствами, определение влияния фотографических шумов на глубину голографирования, оценка возможностей сжатия информации за счет использования голограммных методов в телевидении и целый ряд других неясных вопросов, решение которых затруднено

вследствие необходимости проведения голографических экспериментов на пороговом уровне.»

Перспективы цифровой голографии Ю.Н. Денисюк видит во *«внедрении новых вычислительных средств и средств ввода и вывода изображений: специализированных фурье-процессоров, параллельных процессоров, быстродействующих лазерных вводных устройств, выводных устройств высокого разрешения (плоттеров, дисплеев и т.п.).»* Именно эта научно-техническая область, связанная с перспективами цифровой голографии, бурными темпами развивается в XXI веке.

Рассмотрим основные этапы голографического процесса, реализующего голографический метод записи и воспроизведения волнового поля.

Запись волнового поля:

- формирование интерференционной картины с заданной объектной волной;
- регистрация интерференционной картины.

Воспроизведение волнового поля:

- формирование опорной волны и считывание голограммы;
- детектирование объектной волны, формирование изображения объекта.

Каким образом можно осуществить реализацию голографического процесса записи и считывания информации?

- Полностью физический эксперимент.
- Полностью численный эксперимент - расчет всех этапов голографического процесса с использованием массива чисел и методов математической обработки.
- Получение голограмм в физическом эксперименте – считывание и обработка методами цифровой голографии
- Получение голограмм методами цифровой голографии (синтез голограмм) – считывание и обработка в физическом эксперименте
- Всевозможное сочетание на различных этапах голографического процесса методов физического и численного эксперимента.

Технические трудности при осуществлении голографического процесса с помощью ЭВМ, связаны с выполнением следующих операций:

- Введение изображения объекта (или голограммы) в ЭВМ.
- Выполнение вычислительной процедуры над вводимой информацией.
- Выведение изображения объекта или голограммы из ЭВМ.

Понятие «цифровая голография» с необходимостью влечет за собой введение понятия «цифровая голограмма». В настоящее время термин «цифровая голограмма» подразумевает голограмму, структура которой рассчитана с использованием численных методов; данный термин имеет ряд синонимов: синтезированная голограмма, компьютерная голограмма [8], искусственная голограмма [4], каждый из которых имеет некоторые специфические особенности и области применения, так что в настоящее время нельзя полноценно заменить один термин другим без ущерба понимания конкретного научного контекста.

Приводимые в соответствующих публикациях (например, [3-7]) процедуры получения цифровых голограмм включают следующие основные этапы.

1. Ввод голографируемого участка изображения в ЭВМ.
2. Вычисление амплитудного и фазового спектров изображения с помощью определенных алгоритмов
3. Выполнение подготовительных процедур, зависящих от выбранного алгоритма выдачи цифровой голограммы из ЭВМ.
4. Выдача голограммы на печать в определенном масштабе.
5. Изменение полученной голограммы до заданных размеров.

В дальнейшем восстановление исходного изображения по его цифровой голограмме может проводиться как вычислительными, так и оптическими (физическими) методами.

Рассмотрим в качестве примера цифровых голограмм (синтезированных, компьютерных и т.д.), получение синтезированных голограмм Фурье простейших объектов-транспарантов по схеме, приведенной на рис.12.1 [3]. При этом связь координат в плоскости предмета и плоскости голограммы представлена на рис.12.2.

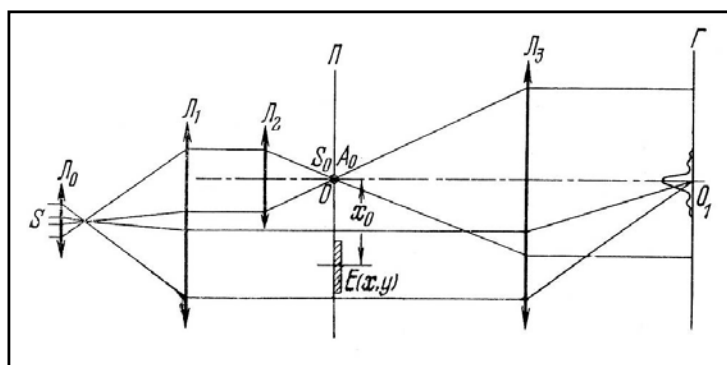


Рис.12.1. Принципиальная схема записи голограмм Фурье объектов-транспарантов.

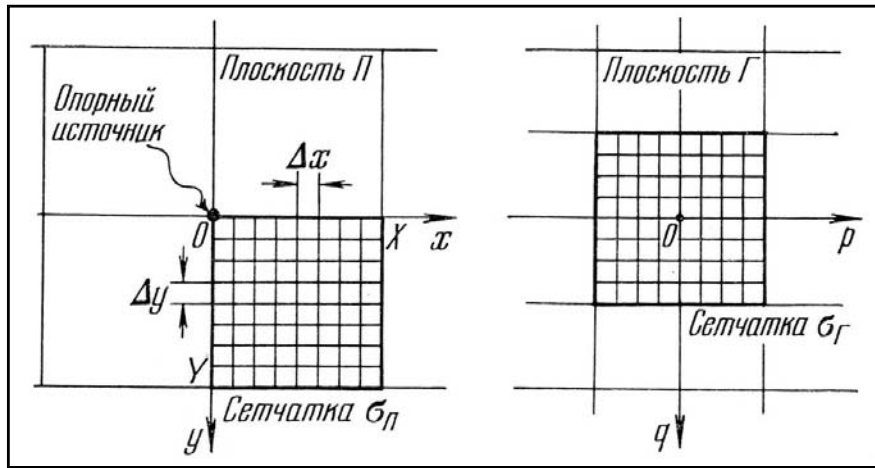


Рис.12.2.Связь координат опорного источника, плоскости предмета (П) и плоскости голограммы (Г) при проведении синтеза голограмм Фурье объектов-транспарантов.

Положение предмета-транспаранта в плоскости (П) и вид его двоичной голограммы Фурье представлены на рис.12.3 – 12.6. для различных положений предмета-точки и различных предметов транспарантов: точки, треугольной фигуры, буквы «С».

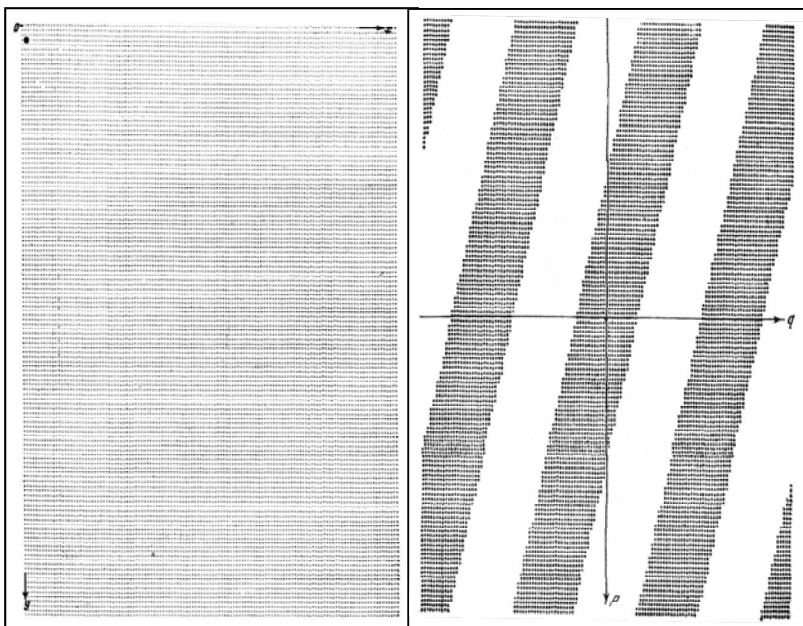


Рис.12.3.Положение точки и двоичная голограмма точки.

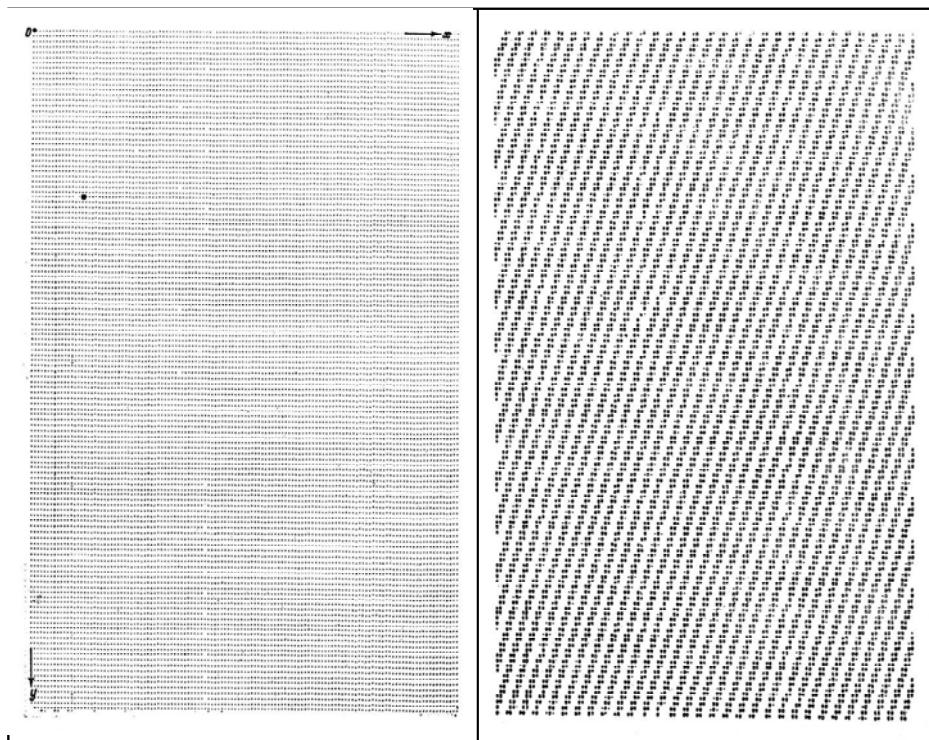


Рис.12.4.Положение точки и ее двоичная голограмма.

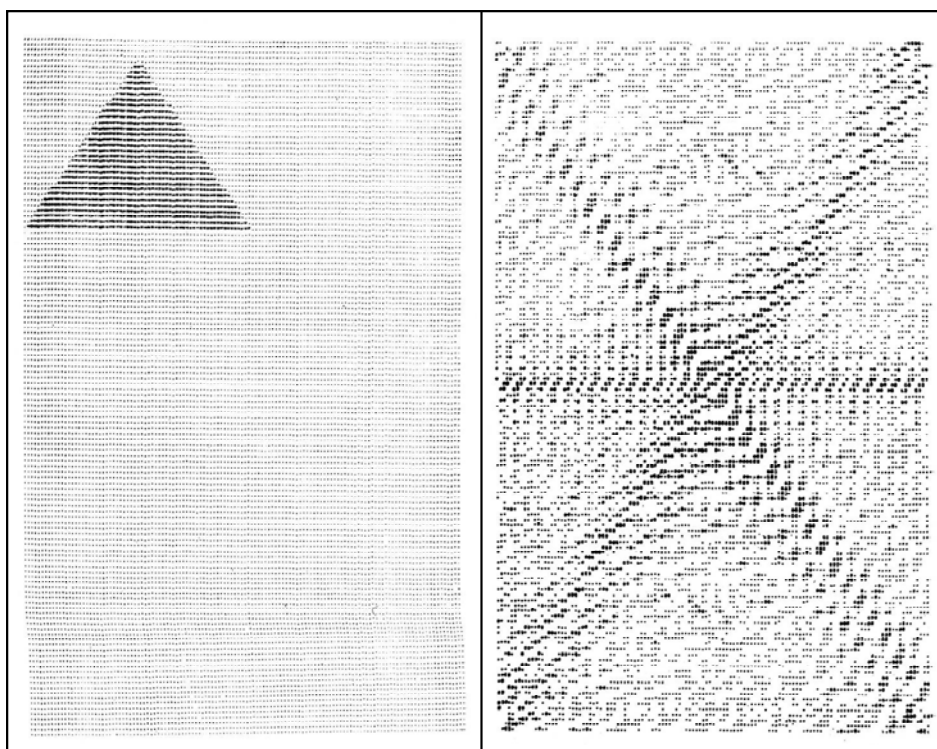


Рис.12.5.Изображение треугольника и его двоичная голограмма.

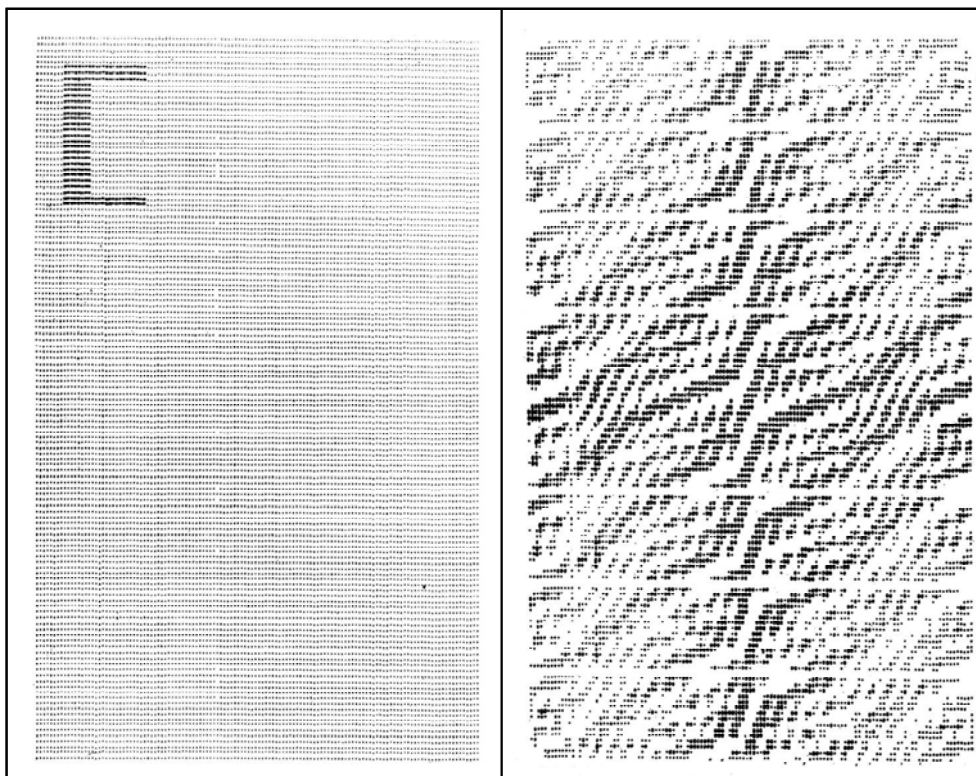


Рис.12.6.Изображение буквы «С» и ее двоичная голограмма.

Восстановление изображения предмета по синтезированной голограмме производится в оптической схеме, изображенной на рис.12.7.

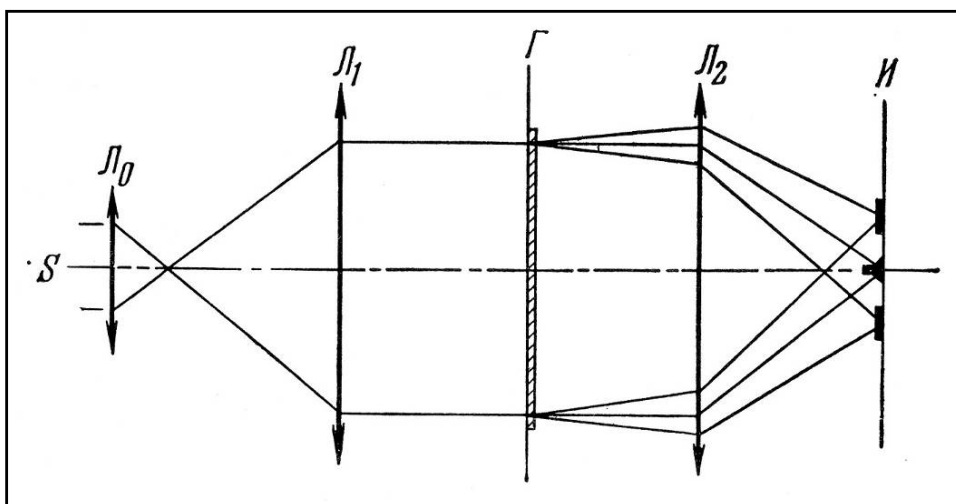


Рис.12.7.Принципиальная схема считывания голограммы при использовании синтезированной голограммы Фурье в качестве фильтра.

Перспективы использования синтезированных голограмм прогнозируются специалистами в следующих направлениях.

- Математическое моделирование характера процессов записи голограмм и связи параметров регистрирующей среды с условиями записи голограмм
- Получение голограмм-транспарантов с заданными параметрами и дифракционными свойствами
- Численные эксперименты по формированию голограмм и физические эксперименты по их считыванию

В работе [7] описан метод цифровой голографии, включающий проведение следующих этапов получения цифровой голограммы:

1. Формирование интерференционной структуры физическим способом
2. Ввод данных (распределение интенсивности в полученной интерференционной структуре) в ЭВМ
3. Обработка массива чисел и корректировка голограммы (интерференционной структуры)
4. Считывание голограммы – восстановление изображения

Оптическая схема установки для получения голограмм по данной методике, представлена на рис.12.8. Результаты считывания – на рис.12.9. С помощью преобразования Френеля формировались 4 изображения, которые затем обрабатывались методом фазового сдвига.

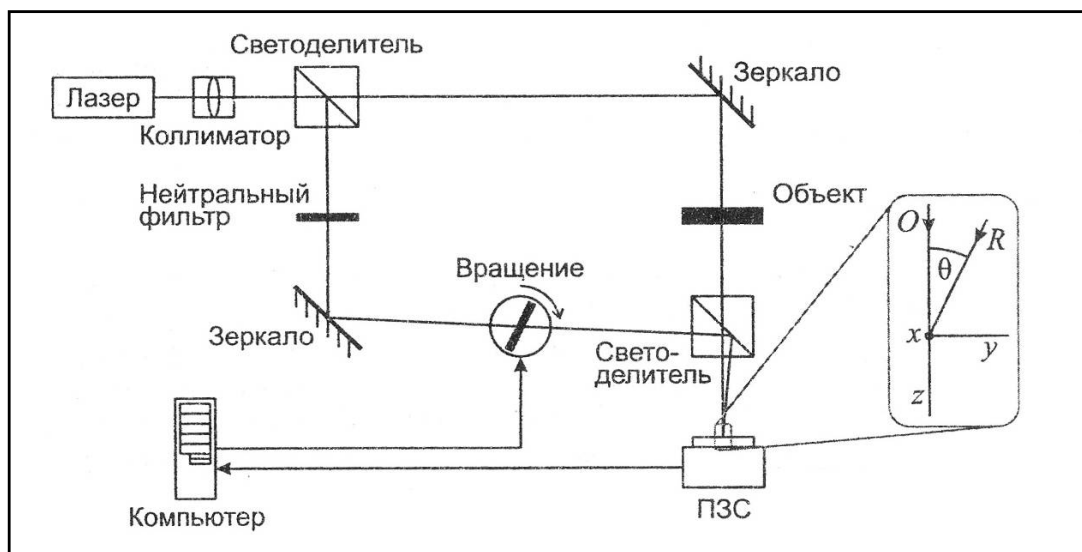


Рис.12.8. Оптическая схема экспериментальной установки для записи голограмм с заданными фазовыми сдвигами [7].

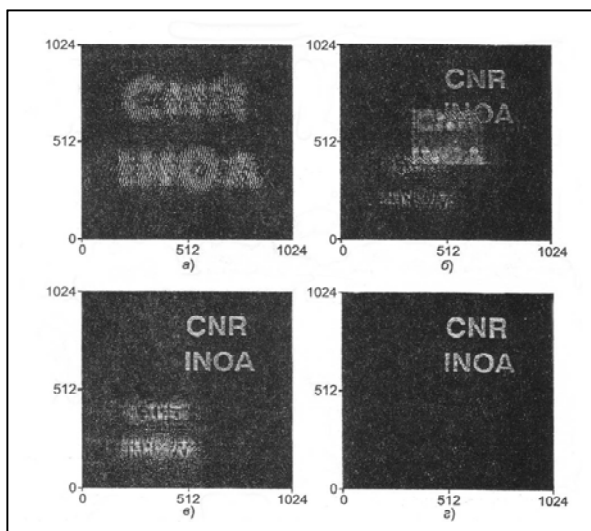


Рис.12.9.Изображение объекта (б,в,г), восстановленное с помощью цифровой голограммы (а) - численное восстановление изображения объекта: а – исходная голограмма; б – изображение, восстановленное по стандартной схеме; в – подавление нулевого порядка; г – изображение, восстановленное с помощью голограммы, скорректированной методом фазового сдвига (четырёхшаговый квадратурный алгоритм) [7].

Возможность получения цветных изображений объекта за счет использования нескольких различных длин волн записывающего излучения при записи цифровых голограмм иллюстрирует рис.12.10.

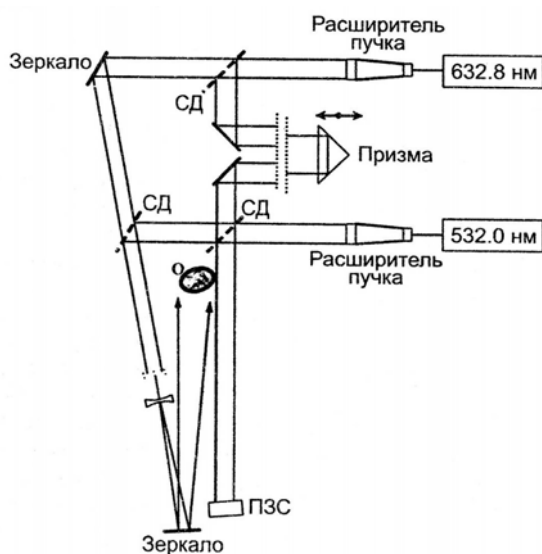


Рис.12.10.Оптическая схема установки для записи цифровых голограмм при использовании двух длин волн [7].

Теоретические разработки в области цифровой голографии [например, 11, 12, 13], в том числе в области цифровой микроскопии, позволили создать уникальные по характеристикам приборы, среди которых цифровой голографический безлинзовый микроскоп Numerical Vision LDHM-4 (рис.12.11). Цифровой микроскоп, в отличие от классического оптического, не содержит объективов, имеет возможность дополнительно получать распределение фазы волны в плоскости объекта и реконструировать по полученной фазе распределение высоты. Настройка на резкость осуществляется специализированным программным обеспечением неограниченное число раз после получения снимка цифровой голограммы.

Такой микроскоп может иметь широкие перспективы научно-технического применения:

- измерение высоты объектов с нанометровым разрешением;
- исследование биологических объектов;
- контроль состояния биочипов;
- карманные системы определения подлинности защитных голограмм и документов;
- контроль толщины напыления или глубины канавок;
- сборка, юстировка и контроль качества микромеханических систем.

**Безлинзовый цифровой голографический микроскоп
Numerical Vision LDHM-4**



Питание – 5 В, интерфейс –USB 2.0

Рис.12.11.Цифровой голографический микроскоп.

В заключение следует отметить перспективные направления развития цифровой голографии и технические средства, их обеспечивающие.

Перспективные направления развития цифровой голографии:

- Получение заданных (оптимальных) голографических фильтров для систем оптической пространственной фильтрации.
- Восстановление изображений по голограммам, полученным неоптическими средствами (акустическими, радиолокационными и др.).
- Визуализация условных изображений несуществующих предметов (например, рассчитанных двумерных и трехмерных математических функций).
- Метрологический контроль и диагностика: компенсация аберраций в оптических системах и оценка характеристик волновых функций.
- Научно-технические разработки в области «защитной голографии» - технологии и аппаратура для получения и считывания голограмм со скрытым и кодированным изображением, предназначенных для защиты от подделок и фальсификации документов и товаров.
- Цифровая изобразительная голография - получение цветных объемных изображений сцен и объектов, синтезированных с помощью компьютерных программ, путем создания композиционных пиксельных голограмм с последующей регистрацией на материальном носителе [например, 14].

Технические средства развития цифровой голографии:

- Вычислительные методы
- Средства и методы ввода и вывода оптической информации при использовании вычислительной техники.
- Методы построения трехмерных моделей объектов, заданных своим математическим описанием (например, метод послойного лазерного спекания порошкообразных материалов) [8].
- Быстродействующие алгоритмы компьютерной обработки массива чисел (цифровых голограмм) в реальном времени для исследования динамических объектов.

Литература

1. Денисюк Ю.Н. Предисловие к кн.: Федоров Б.Ф., Эльман Р.И. Цифровая голография. - М.: Наука. 1976. с .3-6.
2. Применения голографии. Сборник статей под ред. Дж.Гудмена. М.: Мир. 1973.

3. Федоров Б.Ф., Эльман Р.И. Цифровая голография. – М.: Наука. 1976.
4. Сороко Л.М. Основы голографии и когерентной оптики. М.: Наука. 1971. С.417-434.
5. Ярославский Л.П. и др. Анализ и синтез волновых полей с помощью ЦВМ. В кн.: Современное состояние и перспективы развития голографии. Л.: Наука. 1974. с. 54-75.
6. Ярославский Л.П. Цифровая обработка сигналов в оптике и голографии: Введение в цифровую оптику. - М.: Радио и связь. 1987. С.243-286.
7. Гуров И.П., Балтийский и др. В кн.: Проблемы когерентной и нелинейной оптики. СПб.: СПбГУИТМО. 2004. С.91-117.
8. 3D лазерные информационные технологии / Отв.ред.Твердохлеб П.Е. – Новосибирск. 2003. с. 311-344.
9. Фотоника. Словарь терминов. Новосибирск. 2004.
10. Вест Ч. Голографическая интерферометрия. - М.: Мир. 1982.
11. Vishnyakov G.N. Tomographic approach to 3D confocal microscopy. Proc. SPIE. 1995. V.2412. P. 165-171.
12. Levin G.G., Zakarian C.S., Vishnyakov G.N. Interferometric computed microtomography of 3D phase objects. Proc. SPIE. 1997. V.2984. P. 64-71.
13. Levin G.G., Kozinets G.I., Novoderzhkina I.K., Streletskaya G.A., Vishnyakov G.N. Blood cells research using methods of microinterferometry. Proc. SPIE. 1997. V.2982. P. 490-495.
14. www.ultimate-holography.com

§13. Голографическая интерферометрия и голографический неразрушающий контроль.

Голографическая интерферометрия развивалась на базе оптической интерферометрии. Аналоги большинства методов классической оптической интерферометрии в настоящее время успешно применяются в голографической интерферометрии. Приборы, предназначенные для проведения исследований в оптической интерферометрии, носят название интерферометров. В основе интерферометра лежит пространственное разделение пучка излучения с помощью того или иного устройства с целью получения двух или более взаимно когерентных пучков, которые проходят различные оптические пути, а затем сводятся вместе и наблюдается результат их интерференции. Вид интерференционной картины зависит от способа разделения пучка излучения на взаимно когерентные пучки, от их числа, их относительной интенсивности, размеров источника, спектрального состава излучения.

Как правило, интерферометры классифицируют по числу интерферирующих пучков и способу разделения исходного пучка. По числу интерферирующих пучков интерферометры делятся на двухлучевые, трехлучевые и многолучевые. По способу разделения исходного пучка интерферометры делятся на приборы, в которых интерферирующие пучки формируются из разных участков исходного волнового фронта (деление по фронту волны) и приборы, в которых вся поверхность исходного волнового фронта участвует в формировании каждой из интерферирующих волн (деление по амплитуде).

В голографии голограмма представляет собой зарегистрированную интерференционную картину, образованную объектным и опорным (референтным) пучками. Таким образом, голографическую установку можно рассматривать как интерферометр, в котором производится формирование объектного и опорного пучков. При этом в голографическом эксперименте используют те же методы деления исходной волны по волновому фронту и по амплитуде (см. §10), как и в оптической интерферометрии.

Среди разнообразных применений двухлучевых интерферометров можно выделить три основные группы [1]:

- Исследование формы отражающей поверхности, а также распределения показателя преломления или толщины прозрачных объектов по форме интерференционных полос (исследования фазовых неоднородностей).
- Исследование перемещений объектов по перемещению интерференционных полос.
- Исследование спектрального состава излучения по распределению интенсивности в интерференционной картине.

Одним из основных применений многолучевых интерферометров является спектроскопия высокого разрешения. Другое, близкое к спектроскопическому, применение многолучевой интерференции – это разнообразные просветляющие и отражающие покрытия, а также интерференционные фильтры. Многолучевые интерференционные схемы применяются для исследования профилей поверхностей. Многолучевыми интерферометрами типа Фабри-Перо исследуют фазовые неоднородности, газовые потоки, плазму.

Метод голографической интерферометрии был предложен практически одновременно в ряде работ, выполненных в 1965 г.[1,2] Содержание метода – получение, наблюдение и интерпретация интерференционных картин, образованных волнами, из которых хотя бы одна записана и восстановлена голограммой. Основной принцип голографической интерферометрии легко понять из рассмотрения схемы записи голограмм, например, приведенной на рис. 13.1.

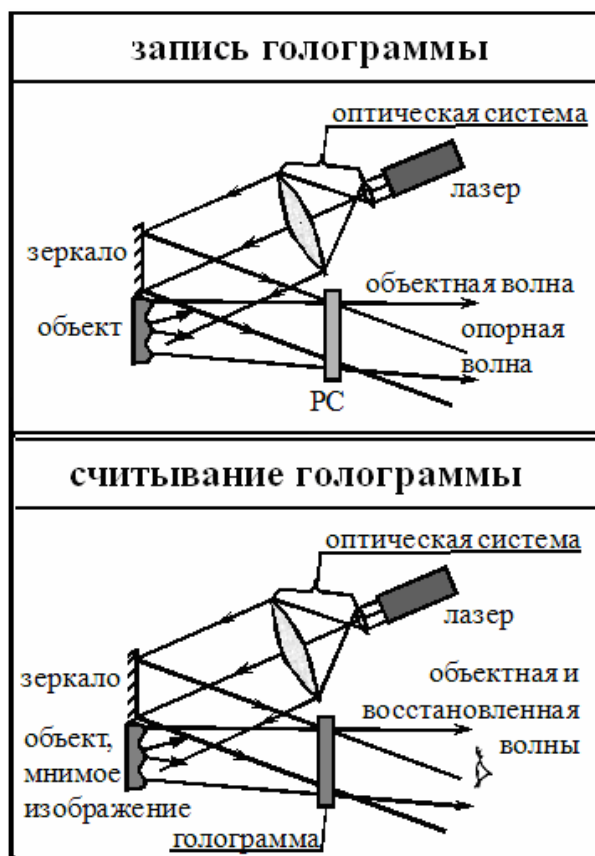


Рис.13.1. Принципиальная схема записи голограммы-интерферограммы (а) и наблюдения интерференции двух объектных волн (б).

Предположим, что после записи и постэкспозиционной обработки голограмма установлена в то же самое место, где она находилась во время регистрации. Если теперь, не убирая объекта, осветить голограмму опорной волной, то за нею будет одновременно распространяться две волны: одна, сформированная непосредственно объектом, и вторая, восстановленная голограммой, являющаяся копией той волны, которая формировалась объектом во время экспонирования голограммы. Эти волны когерентны и могут интерферировать. Наблюдаемое изображение объекта в этом случае будет промодулировано интерференционной структурой, образованной взаимодействием этих двух волн (например, как показано на рис.13.2).



Рис.13.2. Голографическая интерферограмма объекта.

Метод реального времени. Если с объектом происходят какие-либо изменения, ведущие к фазовым искажениям сформированной им волны (например, деформация или изменение коэффициента преломления), то это скажется на виде наблюдаемой картины: на изображении объекта появятся интерференционные полосы, форма которых определяется изменениями, происходящими с объектом. Поскольку интерференционную картину наблюдают одновременно с изменениями, происходящими с объектом, этот метод голографической интерферометрии называют методом реального времени.

Метод двух экспозиций. Если на одной регистрирующей среде (например, фотопластинке) последовательно регистрируют две голограммы, соответствующие двум состояниям одного и того же объекта, то в результате получают так называемую двухэкспозиционную

голограмму, состоящую из двух наложенных голограмм. При освещении двухэкспозиционной голограммы одновременно восстанавливаются две объектные волны, являющиеся голографическими (оптическими) копиями объектных волн, существовавших в разное время. Таким образом, в данном эксперименте формируется интерференционная картина, образованная объектными волнами, существовавшими в разное время.

Метод двух длин волн. Если на одной регистрирующей среде в течение одной экспозиции регистрируется интерференционная картина, образованная волнами разной частоты (использование источника излучения двух или более длин волн), то такая голограмма будет состоять из двух наложенных голограмм, соответствующих разным длинам волн. Такая голограмма называется двухдлинноволновой голограммой. При ее освещении монохроматическим излучением восстановленные волны образуют интерференционную картину, (соответствующую различию их фазового рельефа), обусловленную как различием длин волн, так и дисперсией исследуемого объекта. (Фактически, при освещении двухдлинноволновой голограммы наблюдается картина интерференции восстановленных волн одинаковой частоты, хотя они и являются копиями волн разных частот.) Двухдлинноволновые методы голографической интерферометрии используются для исследования дисперсии плазмы, а также для изучения рельефа поверхностей.

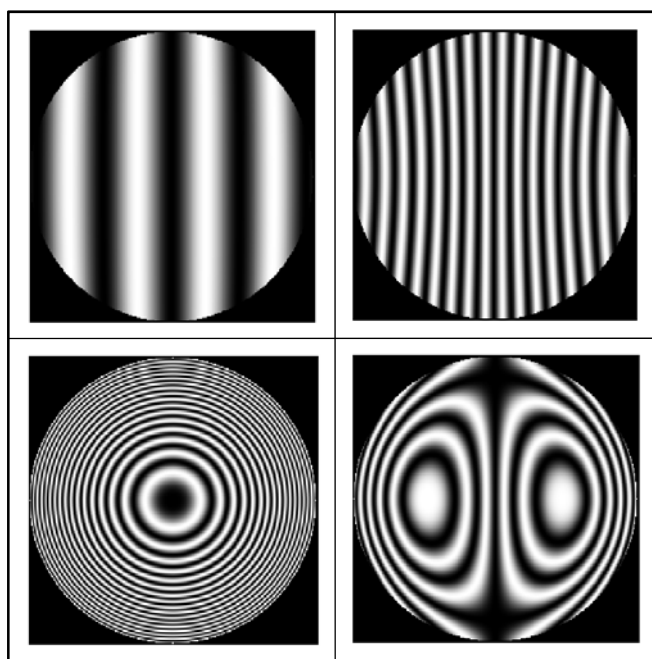


Рис.13.3.Виды голографических интерферограмм при контроле деталей эталонной (бездефектной) формы при точной юстировке интерферометра, голограммы и поверяемой поверхности [3].

Основные преимущества голографической интерферометрии при сравнении с методами классической оптической 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 интерферометрия получила широкое применение при исследовании фазовых неоднородностей прозрачных объектов, при диагностике плазмы, в газодинамических исследованиях. Голографические методы исследования смещений и рельефа поверхности широко используются для неразрушающего контроля и диагностики состояния различных деталей и механизмов. Голографическое исследование вибраций – стробоголографический метод – впервые предложен в 1967 году и до настоящего времени не потерял своей актуальности.

Голографическая интерферометрия используется в тех случаях, когда традиционные методы оказываются малоэффективными, например, для получения информации о поведении и состоянии упругих элементов, которые широко используются в современном приборостроении [4]. В этом случае голографическая интерферометрия дает возможность проводить качественную, количественную, а также интегральную и дифференциальную оценку качества изготовления упругих элементов. В работе [4], которая демонстрирует широкие возможности голографической интерферометрии, рассмотрены три упругих элемента различного типа: торсион – чувствительный элемент динамически настраиваемого гироскопа; чувствительный элемент акселерометра;

мембранная коробка. В результате проведенных экспериментов получена ценная информация:

- По интерферограмме нагруженного торсиона оценена угловая жесткость (с точностью 2%) и отклонение физической оси кручения от геометрической, которое было обнаружено впервые и включено в перечень показателей качества торсионов.
- Интерферограмма мембранной коробки позволила обнаружить негерметичность и неперпендикулярность смещения жесткого центра коробки на ранних стадиях ее изготовления.
- Интерферограмма чувствительного элемента маятникового акселерометра дала возможность установить взаимосвязь между параметрами поведения элемента и технологическими операциями его изготовления и при необходимости целенаправленно провести корректировку технологического процесса.

Голографическая спекл-интерферометрия

В настоящее время во многих отраслях науки и техники широкое применение находят оптические методы исследования напряженно-деформированного состояния и пространственного положения твердого тела. Наиболее прогрессивным методом оценки качества чувствительных элементов является голографическая интерферометрия, причем для промышленного применения оказываются наиболее привлекательными методы голографической спекл-интерферометрии [5,6,7].

В основе данного метода, относящегося к голографической интерферометрии, лежит двухэкспозиционная регистрация сфокусированных изображений предметов (см. §4) в диффузно рассеянном когерентном излучении. Такая регистрация приводит к пространственной модуляции получаемых (наблюдаемых) изображений спекл-структурой, являющейся результатом взаимной интерференции пространственных составляющих диффузно рассеянного поля.

Изображения, модулированные спекл-структурами, способны воспроизводить пространственный спектр объекта в его исходном и смещенном состояниях, что и позволяет получать спекл-интерферограммы, отражающие величину и характер изменений, которые претерпел объект. Характерным приемом для спекл-интерферометрии является оптическое фурье-преобразование восстановленного поля, часто сопровождаемое операцией пространственной фильтрации в фурье-плоскости.

Спеклы (от англ. *Speckle* – пятнышко, крапинка) – пятнистая структура в распределении интенсивности когерентного света, отраженного от шероховатой поверхности, неровности которой соизмеримы с длиной волны света, или прошедшего через среду со случайными флуктуациями показателя преломления [8]. Спеклы возникают вследствие интерференции света, рассеиваемого отдельными шероховатостями объекта. Т.к. поверхность предмета освещается когерентным светом, то интерферируют все рассеянные лучи и интерференционная картина имеет не периодическую, а хаотическую структуру. На рис.1 представлена фотография спекл-структуры, возникающей при рассеянии лазерного пучка света, проходящего через матовое стекло.

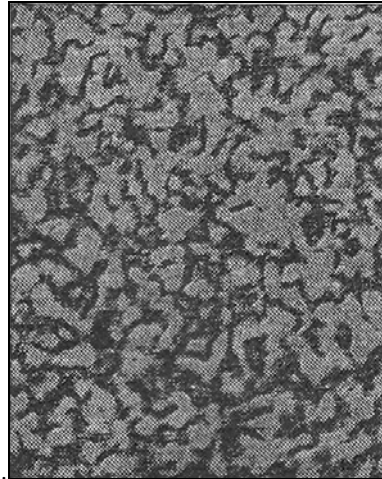


Рис.1. Фотография объективных спеклов.

Различают два случая образования спеклов – в пространстве предметов (объектов) и в пространстве изображений. В пространстве предметов возникают так называемые объективные спеклы.

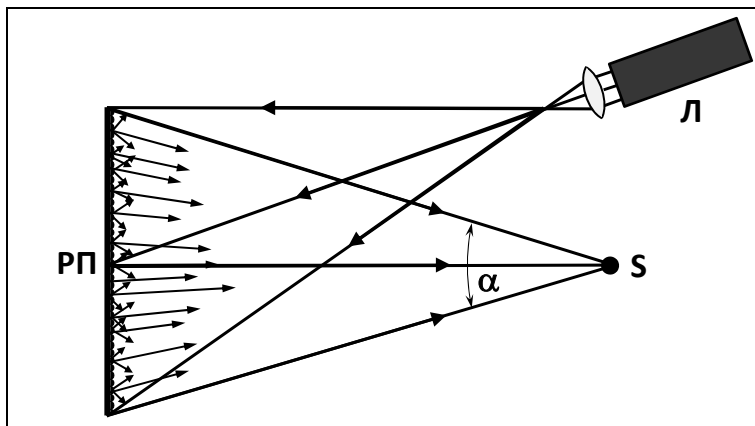


Рис.2. Схема образования объективной спекл-структуры: Л – лазер, РП – рассеивающая поверхность, S – точка наблюдения.

Свет от лазера (рис.2) освещает шероховатую, диффузно рассеивающую поверхность; полная амплитуда световой волны в точке наблюдения является суммой векторов амплитуд волн, рассеянных всеми точками освещенной поверхности. Эти волны имеют случайные фазы, и в результате их сложения получается результирующая амплитуда. При изменении

координат точки наблюдения полная амплитуда (и интенсивность) принимает различные, также случайные значения, что и обуславливает появление спеклов. Поперечное смещение точки наблюдения (без изменения расстояния до рассеивающей поверхности) ведет к быстрому изменению разности хода между интерферирующими волнами и, соответственно, к мелкомасштабным изменениям интенсивности. Продольное смещение точки наблюдения ведет к относительно медленным изменениям разности хода и, соответственно, к относительно крупномасштабным флуктуациям интенсивности. Другими словами, отдельные спеклы имеют вытянутую вдоль направления наблюдения сигарообразную форму.

Средний поперечный диаметр спекла

$$d = 1,22\lambda/\alpha \quad (1),$$

где α – угловой диаметр освещенной когерентным светом шероховатой поверхности. Средний продольный размер спекла

$$l = 4\lambda/\alpha^2 \quad (2).$$

В пространстве изображений образуются так называемые субъективные спеклы. При наблюдении субъективных спеклов изображение предмета оказывается промодулированным спекл-структурой. В этом случае средние размеры спеклов также описываются формулами (1) и (2), где α – угловые размеры линзы, образующей изображение (см. рис.3).

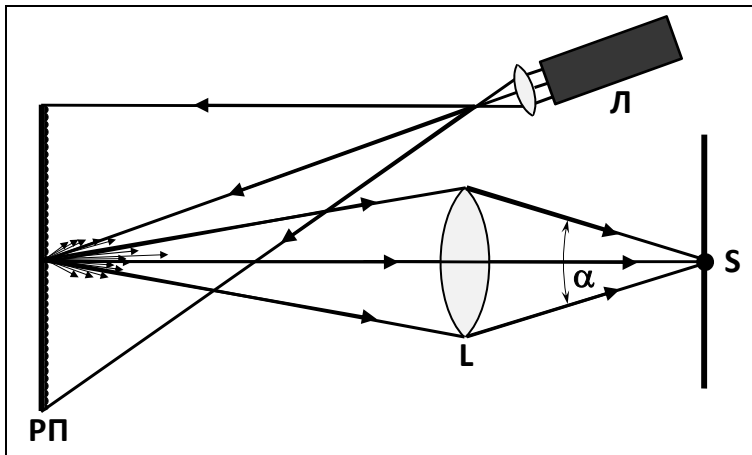


Рис.3.Схема образования субъективной спекл-структуры (структуры изображения): Л – лазер, РП – рассеивающая поверхность, L – линза, S – точка изображения.

Методы спекл-интерферометрии нашли широкое применение при решении различных метрологических задач.

Практические достоинства методов голографии сфокусированных изображений, к которым относится и спекл-интерферометрия с регистрацией спеклограмм (голограмм) в плоскости изображения, заключаются в значительном снижении требований к источникам излучения, регистрирующим средам и условиям регистрации голограмм, что дает значительный энергетический и экономический выигрыш.

- Для источника излучения, используемого при регистрации, допускается генерация произвольного набора поперечных мод, когда различные участки волнового фронта пространственно некогерентны, а также допускается незначительная длина когерентности (порядка см); очень важно для практики, что процесс регистрации интерферограмм-голограмм оказывается нечувствительным к изменению режима генерации источника излучения.
- Для регистрирующего материала допускается относительно низкая разрешающая способность, что обусловлено отсутствием внеосевого опорного пучка при регистрации спеклограмм, и произвольный режим экспонирования и постэкспозиционной обработки, не требующий соответствия линейному режиму записи. В результате обеспечивается выигрыш в чувствительности и значительное сокращение времени экспозиции.
- Для условий регистрации допускается проведение экспонирования в условиях действия вибраций и смещений на 2-3 порядка больших, чем при регистрации традиционных голограмм; использование в качестве источника опорной волны произвольного объекта или произвольной части исследуемого объекта без необходимости компенсации их протяженности; регистрация голограмм и спеклограмм с увеличением или уменьшением, в том числе удаленных, крупногабаритных, сильно рассеивающих и слабоотражающих объектов. В результате значительно облегчается голографическая установка (допустимым становится применение обычных лабораторных стендов); расширяется класс доступных исследованию объектов; достигается возможность управления чувствительностью и разрешением в голографической и спекл-интерферометрии.

Т.о. при считывании спекл-голограммы (при наблюдении изображений) для источника излучения допускаются произвольный спектральный состав (т.е. практически полное отсутствие когерентности) и произвольные размеры и форма излучающей поверхности источника излучения. В результате во многих случаях имеется возможность отказаться от лазера на этапе считывания интерферограммы и обеспечить биологическую безопасность наблюдателя (оператора), а также существенный экономический выигрыш.

Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия имеют ряд преимуществ, часть из которых перечислена выше, перед другими голографическими методами. Однако, целый ряд ограничений,

свойственных данной группе методов, делают их недостаточно конкурентоспособными в ряде приложений, связанных с необходимостью воспроизведения изображений с большой глубиной и параллаксом, с необходимостью обеспечения существенной избыточности при записи информации и обеспечения неискаженного изображения объектов с большим диапазоном градаций яркости.

Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия находят применение при решении научно-технических задач, связанных с применением когерентной оптики и голографии, для которых в первую очередь желательны минимальные требования к условиям регистрации и считывания оптической информации, а также возможность оперативного получения и анализа этой информации.

С точки зрения практического использования перспективными для голографии изображений представляются системы хранения и обработки оптической информации, микроскопия, в том числе интерференционная, измерение смещений и деформаций на основе голографической и спекл-интерферометрии, а также реализация голографического кинофильма [6].

В настоящее время плодотворно развиваются методы, объединяющие возможности цифровой голографии с возможностями голографической интерферометрии, например, метод цифровой стробоскопической голографической интерферометрии сфокусированных изображений [9]. Исследования в этом направлении показывают, что цифровая голографическая интерферометрия сфокусированных изображений в настоящее время теоретически обеспечивает возможность решения задачи измерения сверхмалых перемещений, т.е. измерения малых разностей фаз, не приводящих к появлению интерференционных полос, и соотнесения результатов измерений с соответствующими точками поверхности объекта [10].

Голографическая интерференционная дефектоскопия

Существует широкий класс прикладных задач, для оперативного решения которых нет необходимости прибегать к процедуре детальной математической расшифровки интерференционных картин. В таких задачах необходимая для принятия решения информация содержится в форме и местоположении интерференционных полос по объекту, в «интерференционном портрете».

Особенности расположения интерференционных полос на объекте позволяют получить сведения, указывающие на различные дефекты внутреннего строения промышленных образцов разного назначения:

- Области пониженной прочности в оболочках пневматических и гидравлических устройств и приборов (мембранных датчиков

давления, резиновых и пластиковых камер, шаров, спасательных плотов и т.п.).

- Дефекты соединения слоев в многослойных конструкциях (печатных платах, автомобильных и самолетных покрышках, многокомпонентных устройствах типа электромеханических преобразователей, в которых качество соединения пьезокерамика-металл, металл-резина и т.п. определяет их свойства).
- Дефекты структуры в ответственных деталях различных двигателей (трещины и усталостные зоны в турбинных лопатках, сосудах высокого давления и т.п.).
- Качество изготовления отдельных элементов электромеханических устройств, предназначенных для работы в колебательном режиме (громкоговорители, акустические приемники, пьезотрансформаторы, электромеханические линии задержки и т.п.).

При решении каждой конкретной задачи необходимо прежде всего выбрать оптимальный способ нагружения объекта, позволяющий наиболее эффективно выявить ожидаемые дефекты. При этом сравнение «интерференционных портретов» дефектного и эталонного образцов должно быть по возможности облегчено созданием таких условий нагружения, когда сами картины имеют максимально простой вид (например, параллельные или концентрические полосы).

Возможные способы нагружения объектов, наиболее часто применяемые в практике голографической интерференционной дефектоскопии:

- Термический (нагрев или охлаждение отдельных участков или всего объекта).
- Механический (путем сжатия, изгиба, кручения или их комбинаций).
- Вибрационный.

Голографическая интерферометрия позволяет выявлять и измерять изменение формы поверхности деталей относительно исходной с высокой чувствительностью к поверхностным деформациям под действием небольших нагрузок – имеется возможность наблюдать малые (0,1...100 мкм) аномальные перемещения отдельных участков поверхности, обусловленные дефектами. Визуализированные картины форм колебаний позволяют проводить вибрационную диагностику деталей машин, работающих в условиях высоких температур, статических и динамических нагрузок. Для диагностики и неразрушающего контроля рабочих лопаток компрессора авиационного газотурбинного двигателя в работе [11] определялся спектр форм колебаний консольно закрепленных прямоугольных пластин – прототипов лопаток. На рис.13.4 приведены резонансные формы колебаний первых десяти гармоник в порядке их

появления для пластин с разным соотношением длины к ширине. Полученные «интерференционные портреты» наглядно позволяют

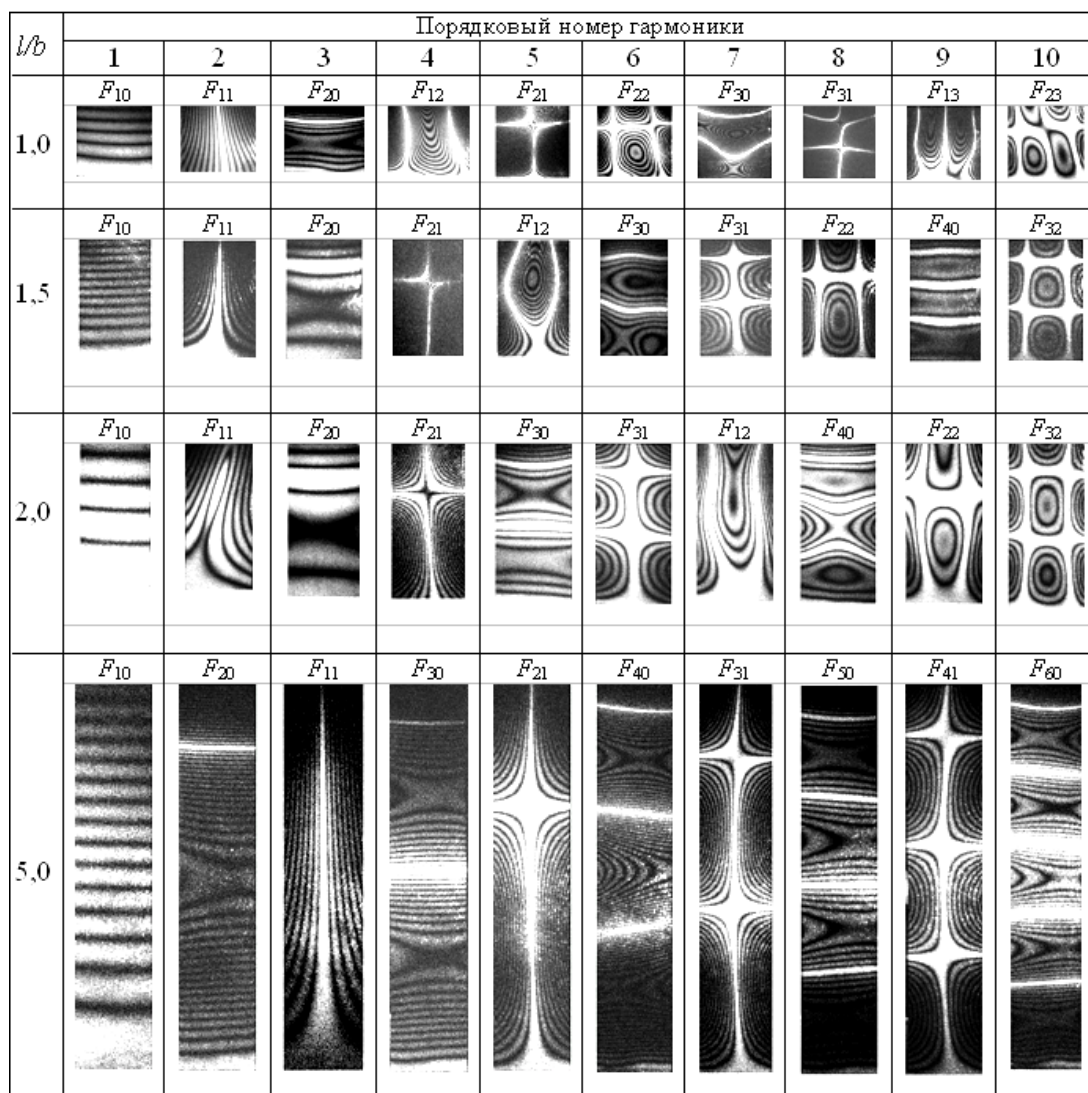


Рис.13.4. Вибрационное исследование турбинных лопаток: голографические интерферограммы первых 10 форм колебаний пластин с соотношением длины (l) и ширины (b) равным 1; 1,5; 2; 5 при ширине $b = 40$ мм и толщине 1 мм [11].

определить порядок появления резонансных форм колебаний в зависимости от соотношения сторон. Проведенные голографические исследования показали, что сколы в реальных лопатках происходят вдоль узловых линий по форме колебаний F_{32} , в результате проведенного исследования изменением размеров сечения лопаток удалось перевести

узловые линии на менее опасные участки и устранить причину разрушения [11]. В данной работе с помощью голографической интерферометрии была также определена область структурных изменений материала турбинных лопаток: при частотах колебаний более 25 КГц по интерферограммам форм колебаний были установлены структурные изменения материала, связанные с перегретым состоянием.

Литература

1. Островский Ю.И., Бутусов М.М., Островская Г.В. Голографическая интерферометрия. - М.: Наука. 1977. - 339 с.
2. Вест Ч. Голографическая интерферометрия. - М.: Мир. 1982.
3. Полещук А.Г. Методы и системы для интерферометрического контроля асферической оптики с помощью синтезированных голограмм. В кн.: Сборник трудов конференции «Голография экспо-2008». – СПб. 2008. с. 21-25.
4. Шанин В.И., Шанин О.В. Применение голографической интерферометрии для оценки качества упругих элементов приборостроения. В кн.: Сборник трудов конференции «Голография экспо-2007». – М. 2007. с. 118-119.
5. Оптическая голография / Под ред. Колфилда Г. - М.: Мир. 1982. - т.1.
6. Клименко И.С. Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия. - М.: Наука. 1985. - 222 с.
7. Шанин О.В. Применение спекл-интерферометрии для контроля тонкостенных цилиндрических резонаторов. В кн.:Сборник трудов конференции «Голография экспо-2007». – М. 2007. с. 119-120.
8. Островский Ю.И. Спеклы. В кн.: Физическая энциклопедия. М.: БРЭ. 1994. т.4. с. 604-605.
9. Алексеенко И.В., Гусев М.Е. Измерение вибраций металлического диска методом цифровой стробоскопической голографической интерферометрии сфокусированных изображений // Автометрия. 2008. Т.44. №1.
10. Гуревич В.С. и др. Применение цифровой голографической интерферометрии для измерений полей перемещений нанометрового диапазона. В кн.:Сборник трудов конференции «Голография экспо-2008». – СПб. 2008. с. 100-105.
11. Макаева Р.Х. Диагностика разрушения, технического состояния и неразрушающий контроль деталей турбомашин методом голографической интерферометрии. В кн.:Сборник трудов конференции «Голография экспо-2008». – СПб. 2008. с. 105-108.

Заключение

60 лет развития голографии 1948 – 2008

Голография за 60 лет своего развития заняла устойчивое положение в научно-технической деятельности мирового сообщества.

Основоположниками голографии являются Д. Габор – изобретатель голографии, который впервые сформулировал данное понятие и ввел термин «голография» (1948 г.), и Ю.Н. Денисюк – первооткрыватель и основатель голографии в трехмерных средах, чье открытие «трехмерная голограмма» (1962 г.) перевело голографический метод из области инструментальной оптики в область фундаментальной физики.

Начало широкому практическому применению голографии положили Э. Лейт и Ю. Упатниекс, применившие для регистрации голограмм лазер и внеосевую схему расположения интерферирующих пучков (1964 г.).

Дальнейшими этапами в первые десятилетия развития голографии явились исследования, которые заложили основы ряда современных направлений.

- Цифровая голография: предложено синтезировать голограммы с помощью численных методов (1968 г. – А. Ломан); создана первая компьютерная голограмма.
- Динамическая голография: перспективное направление, объединяющее голографию и нелинейную оптику (Х. Герритсен – 1967 г., Е.И. Ивакин, А.С. Рубанов, Б.И. Степанов – 1970 г.).
- Поляризационная голография: доказательство возможности записи и воспроизведения состояния поляризации излучения путем регистрации голограмм в средах с фотоиндуцированной анизотропией (Ш.Д. Какичашвили - 1972-1978 г.г.).
- Теоретическое исследование объемных высокоэффективных голограмм сложных волновых полей: сформулирована модовая теория (1976 г. – В.Г. Сидорович); спекл-модовая теория и теория спеклона (1984-1986 г.г. – Б.Я. Зельдович, В.В. Шкунов).
- Спектральная голография: обоснование возможности голографической регистрации изменений параметров волнового поля во времени с использованием резонансных сред, сред с выжиганием провалов, а также методов спектрального разложения волновых полей (Е.И. Штырков, В.В. Самарцев – 1975 г.; Ю.Т. Мазуренко – 1984 г.; П.М. Саари, А.К. Ребане, Р.К. Каарли – 1986 г.).

Защитные голограммы

МОСОБЛЗНАК, предприятие созданное для обеспечения экономической безопасности в московской области, использует до шести степеней голографической защиты:



Министерство промышленности,
науки и технологий



Орловская область

- **Высокая четкость** рисунка переднего плана
- **Микро надписи**, не передаваемые при оптическом копировании
- **Дополнительные элементы**, повышающие устойчивость против квалифицированной подделки.
- **Специальные элементы**, делающие невозможными полную подделку даже при наличии высшей квалификации и оснащённости.
- **Скрытое изображение**, видимое при специальной подсветке.
- **Скрытое и кодированное изображение.**

За первые 20 лет существования, к концу 60-х годов XX-го века, были заложены теоретические и экспериментальные основы голографии, обусловившие ее дальнейшее развитие, которое шло в основном по пути совершенствования приложений.

Следующие десятилетия развития голографии – это время инженеров и технологов.

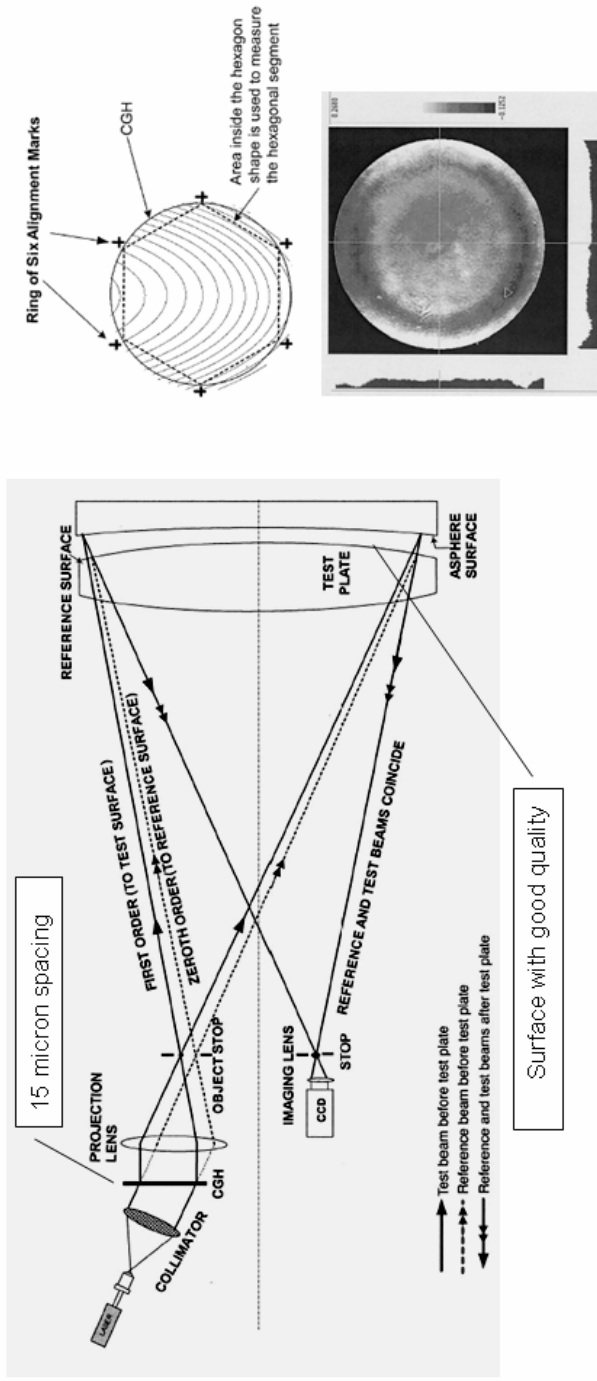
Развивается направление, связанное с разработкой и созданием регистрирующих сред для голографии. Успехи и достижения первых двух десятилетий голографии основывались на использовании традиционных светочувствительных материалов, их совершенствовании и совершенствовании методов их обработки. В конце 60-х и начале 70-х годов в США, СССР, Германии и других странах создаются высокоразрешающие галогенидосеребряные светочувствительные материалы для голографии и налаживается их промышленное производство. Успехи СССР в этой области деятельности демонстрируют выставки изобразительных голограмм, которые вызывают неизменный интерес и восхищение зрителей.

Появляются новые светочувствительные материалы, созданные специально для целей голографии: фоторезисты, фотополимеры, фототермопластики и т.п. Среди фотополимеров следует отметить широко известные марки – «Du-Pont» (1975 г.) и «OmniDex» (1988 г.). Существенный прорыв в области разработки принципов конструирования объемных светочувствительных сред для голографии и создания действующих лабораторных образцов в начале 80-х годов совершен силами ведущих научных школ СССР Государственного Оптического Института им. С.И. Вавилова академика Ю.Н. Денисюка и академика А.Н. Теренина: полимерный материал «Реоксан», безусадочные среды на основе пористых стекол, полимерный материал с диффузионным усилением.

Метод получения радужных голограмм, предложенный С. Бентоном (1968 г.), позволяющий получать «тисненные» голограммы, копирование которых можно осуществлять механическим способом, положил начало защитной голографии. Это направление к концу XX-го века сформировалось в мощную индустрию, имеющую в настоящее время устойчивый и стабильный рынок. Начало технической деятельности в той области голографии, которую называли «защита от подделок», положено в 1980-1983 г.г.: в 1983 г. выпущена первая кредитная карта с голографической защитой. В 1988 г. появилась технология DotMatrix для печати защитных голограмм, обеспеченная комплексом промышленно выпускаемого оборудования.

Контроль Внеосевого сегмента Гигантского зеркала

Paraboloidal F/1 30-m Giant Segmented Mirror Telescope. 618 segments (1.34m) should be tested



3.9-nm rms surface accuracy is demonstrated in laboratory¹.

1. F. Y. Pan, Jim Burge, D. Anderson, and A. Poleshchuk "Efficient testing of segmented aspherical mirrors by use of a reference plate and computer-generated holograms". APPLIED OPTICS Vol. 43, No. 28 pp. 5319-5322, (2004).

Международная Конференция
«ГОЛОЭКСПО – 2008»



Голографическая интерферометрия и голографический неразрушающий контроль внедряются в практику промышленных предприятий различных направлений деятельности.

Голографические методы в настоящее время используются в различных областях науки и техники.

- Адаптивная оптика – применяются голографические схемы с обращением волнового фронта для компенсации искажений.
- Оптическое приборостроение – создается база голограммных оптических элементов: дифракционные оптические элементы, брэгговские решетки, голограммные дифракционные решетки, ночь-фильтры, корреляторы, голограммы-имитаторы и т.п.
- Устройства и системы для распознавания образов и пространственной фильтрации.
- Изобразительная голография – осуществляется синтез технических и изобразительных средств для создания трехмерных изображений сцен и объектов.
- Защитная голография использует арсенал технических средств, обеспечивающий до двух десятков степеней защиты документов, изделий и различной продукции от подделок.

В заключение хочется привести, безусловно, достаточно условный список направлений использования голографии конца XX-го и начала XXI-го века, которые опираются на мощный фундамент научно-технических и технологических разработок предшественников.

Новые и перспективные направления развития голографии:

- Голографическая память.
- Голографические дисплеи.
- Цифровая голография.
- Синтез цифровых и физических методов при создании изображений.
- Сенсорные голографические устройства.
- Голограммы-имитаторы в оптике для контроля поверхностей сложной формы и больших размеров.
- Приборы и системы с голографическими дифракционными решетками для прецизионного станкостроения и приборостроения.

Устойчивые и стабильные направления развития голографии:

- Объемные голограммы и оптические элементы на их основе.
- Голограммы в демонстрационной технике.
- Синтез цифровых и физических методов получения голограмм различного назначения.

- Голографическая интерферометрия.
- Голографические методы защиты продукции и кодирования информации.

Автор желает читателям плодотворно и эффективно участвовать в научно-технических разработках и использовать в своей деятельности возможности и достижения голографии, которая за 60 лет своего развития завоевала устойчивое положение в мире как современное научно-техническое направление с установившимся рынком, большим объемом научно-технической продукции (до 20 млрд долларов в год) и значительным потенциалом для дальнейшего развития, направления которого связаны с прогрессом в других областях и могут быть самыми неожиданными.



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.

КАФЕДРА ФОТОНИКИ И ОПТОИНФОРМАТИКИ

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

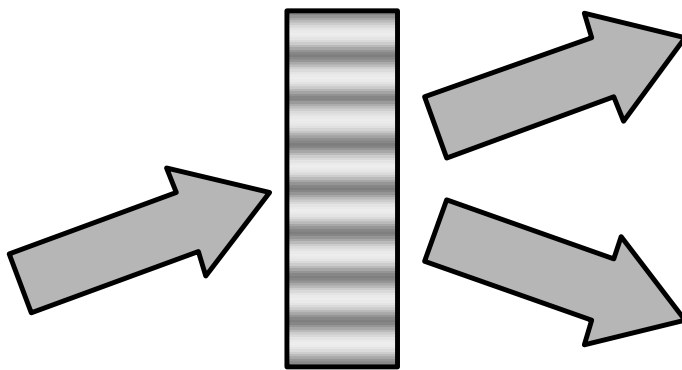
На кафедре сформирована признанная научно-педагогическая школа по фемтосекундной оптике и фемтотехнологиям – руководители: д.ф.-м.н., проф. С.А.Козлов и д.ф.-м.н., проф. В.Г. Беспалов.

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.

О.В. Андреева

ПРИКЛАДНАЯ ГОЛОГРАФИЯ



Санкт-Петербург

2008

Учебное пособие
ПРИКЛАДНАЯ ГОЛОГРАФИЯ.

Автор: Ольга Владимировна Андреева

В авторской редакции
Компьютерная верстка
Дизайн
Зав. РИО

А.А. Кулешов
А.С. Златов
Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати
Отпечатано на ризографе

20.12.2008
Заказ № . Тираж 100

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

