

# ***Физические основы голографии.***



Ташкент 2005 г.

**Авторы:** Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры “Методика преподавания физики” ТГПУ имени Низами – Юсупов Р.А.  
Бакалавр физики, выпускник ТГПУ имени Низами – Юлдашева З.Р.

**Рецензенты:** Кандидат физико-математических наук, сотрудник Института Ядерной Физики – Хугаев А.В.  
Профессор физических наук – Насриддинов К.

Данное учебно–методическое пособие составлено на основе следующего плана:

1. Физические основы голографии.
2. Типы голограмм.
3. Голографическая интерферометрия.
4. Свойства голограмм.

Объектом выполненной работы являются учащиеся проф. колледжей и лицеев.

Целью данной работы – как можно более доходчиво донести до учащихся колледжей и лицеев основы голографии.

Чтобы выполнить данную работу я рассмотрела существующую литературу для бакалавров, специализированных колледжей и лицеев. Учебники для ВУЗов написаны сложно, а для колледжей и лицеев либо отсутствуют, либо написаны так коротко, что трудно понять их смысл. Основное внимание уделено раскрытию физического смысла голографии, видам и типам голографии и её применение в науке и технике.

*Данное учебно-методическое пособие предназначено для учащихся колледжей, лицеев и студентов.*

# *Содержание:*

|  |           |
|--|-----------|
| <b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....  | <b>5</b>  |
| <b>ГЛАВА 1. История голографии</b> .....   | <b>7</b>  |
| <b>ГЛАВА 2. Физические основы голографии</b> .....                                 | <b>9</b>  |
| <b>2.1. Основные понятия</b> .....   | <b>9</b>  |
| <b>2.2. Образование голографического изображения</b> .....                         | <b>10</b> |
| <b>2.2.1. Интерференция</b> .....  | <b>10</b> |
| <b>2.2.2. Дифракция</b> .....  | <b>11</b> |
| <b>2.2.3. Голограмма – дифракционная решетка</b> .....                             | <b>12</b> |
| <b>ГЛАВА 3. Типы голограмм</b> .....   | <b>15</b> |
| <b>3.1. Плоские пропускающие голограммы</b> .....                                  | <b>17</b> |
| <b>3.2. Объемные голограммы</b> .....  | <b>21</b> |
| <b>3.3. Фазовые голограммы</b> .....   | <b>22</b> |
| <b>ГЛАВА 4. Голографическая интерферометрия</b> .....                              | <b>24</b> |
| <b>4.1. Классическая интерферометрия</b> .....                                     | <b>24</b> |
| <b>4.1.1. Кое-что из истории</b> .....   | <b>24</b> |
| <b>4.1.2. Методы голографической интерферометрии</b> ...                           | <b>25</b> |
| <b>4.2. Интерферометрия фазовых объектов</b> .....                                 | <b>26</b> |
| <b>4.2.1. Виды настройки интерферометров</b> .....                                 | <b>26</b> |
| <b>4.2.2. Бесконечно широкая полоса</b> .....                                      | <b>26</b> |
| <b>4.2.3. Полосы конечной ширины</b> .....   | <b>27</b> |
| <b>4.3. Подготовка и обработка галогенидосеребряных эмульсий</b> .....             | <b>27</b> |
| <b>4.4. Оптические схемы голографических интерферометров</b> .....                 | <b>28</b> |
| <b>4.4.1. Голографический интерферометр с диффузным рабочим пучком</b> .....       | <b>28</b> |
| <b>4.4.2. Голографический интерферометр с коллимированным рабочим пучком</b> ..... | <b>29</b> |
| <b>4.4.3. Голографический интерферометр сфокусированного изображения</b> .....     | <b>31</b> |
| <b>ГЛАВА 5. Свойства голограмм</b> .....   | <b>34</b> |
| <b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....  | <b>37</b> |
| <b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....                                      | <b>39</b> |

## ВВЕДЕНИЕ

Большую часть информации об окружающем мире (порядка 90%) человек получает с помощью зрения. Сравнивая зрение с другими источниками информации, можно установить следующее. Посредством слуха человек воспринимает акустическую (звуковую) информацию, однако скорость, с которой могут восприниматься звуковые сигналы, на много порядков меньше скорости восприятия света. Совсем низкой по сравнению со зрением и слухом является скорость восприятия информации посредством органов осязания и обоняния. Поэтому наш человеческий мозг упорядочивает информацию о внешнем мире и в первую очередь при помощи зрительных представлений. Не случайно народная мудрость гласит: "лучше один раз увидеть, чем десять раз услышать".

За свою многовековую историю человек изобрел большое количество различных оптических приборов и систем, предназначенных для получения, передачи и хранения изображений, и все они обязательно включали линзу или систему линз (объектив). Трудно найти человека, не знакомого с фотографированием, методом получения изображений объектов на фотопленке с помощью объектива. Основное назначение объектива - собрать все попадающие в него лучи света, которые исходят из некоторой элементарной точки объекта, в соответствующую ей точку на фотопленке. После проявления фотопластинки изображение предмета можно увидеть, рассматривая фотопленку при обычном освещении на просвет или отражение, либо перенося это изображение на светочувствительную бумагу.

Однако полученный фотоснимок содержит не всю информацию о предмете. Рассматривая фотографическое изображение незнакомого предмета, ничего нельзя сказать о том, на каких расстояниях находятся отдельные точки предмета, т.е. о его объемных свойствах. Эта потеря информации происходит вследствие того, что фотопленка реагирует только на среднюю интенсивность света при экспонировании и не способна реагировать на фазу световой волны, которая зависит от расстояния между предметом и фотопленкой. Следовательно, фотография обладает ограниченными изобразительными возможностями: на ней отсутствует объемность предмета и ощущение глубины пространства. Изображение на сетчатке глаза тоже двухмерное, плоское, и тем не менее мы не лишены возможности видеть предметы объемными, обладающими не только высотой и шириной, но и глубиной. Объемность нашего восприятия обусловлена не только возможностью зрения двумя глазами, но также тем, что глаз, представляя собой оптическую систему с переменным фокусным расстоянием (способную фокусироваться на разноудаленные точки предмета), обладает определенной подвижностью. Это свойство глаза позволяет нам, изменяя направление наблюдения, видеть предметы в разных проекциях, создавая тем самым ощущение объемности. Способность глаза изменять фокусное расстояние получило название аккомодации.

Итак, фотография, на первый взгляд являющаяся объективным способом регистрации изображений, при детальном рассмотрении дает весьма субъективную информацию, рассчитанную на восприятие человеческим глазом. Недостатки фотографии в полной мере компенсируются принципиально новым методом регистрации изображений, получившим название голография.

Оптические и оптоэлектронные приборы строят на основе давно известных законов оптики, однако новый взгляд на существование этих законов, который дала голография, привел к важнейшим результатам: появлению оптических приборов, включающих в себя элементы лазерной техники, голографических методов обработки информации и ЭВМ; разработке голографических пространственно-частотных фильтров; фильтров, синтезированных на ЭВМ; различных голографических оптических элементов, заменяющих обычные оптические линзы, зеркала, дифракционные решетки, а также множества пространственно-временных модуляторов оптического сигнала.

С помощью голографических методов стало возможным получать оптические элементы, по всем свойствам аналогичные волоконно-оптическим устройствам. Такие элементы имеют все свойства оптического волокна, но отличаются от него простотой изготовления. Методы голографии позволяют выполнять оптические элементы и придавать им оптические свойства, которые невозможно получить при обычных методах изготовления. Голографические методы находят широкое применение при аттестации качества оптических элементов и узлов оптических приборов; успешно используются при решении задач выделения сигналов из шумов и распознавания образов. Голография позволяет увеличивать изображения во много раз больше, чем это можно сделать с помощью оптических линз, строить принципиально новые датчики положения и формы объектов и многое другое.

Однако на пути создания конкретных голографических оптических приборов и устройств еще встречается много серьезных технических трудностей. Поэтому разработчикам тех или иных голографических приборов часто приходится идти сложным и не всегда прямым путем, но возможности голографии настолько заманчивы, что внушают большой армии ученых и инженеров оптимизм и уверенность в их преодолении.

Общеизвестно, что на данный момент в профессиональных колледжах и академических лицеях в курсе физики тема голографии затронута поверхностно (Всего 4 часа: 2 лекция и 2 практика). В связи с этим целью данной работы является попытка создания методического учебного пособия по курсу голографии, предназначенного как для школ, академических лицеев, профессиональных колледжей, так и для институтов и университетов в которых преподавание физики не является профилирующим.

# ГЛАВА 1. ИСТОРИЯ ГОЛОГРАФИИ

Основоположником голографии является профессор государственного колледжа в Лондоне Деннис Габор, получивший в 1947 г. первую голограмму. Он родился в Будапеште, где после школы приступил к изучению электротехники. В 1927 году, закончив специальное образование в Берлине, Д. Габор получил диплом доктора – инженера. После захвата власти фашистами Габор покинул Берлин и переселился в Англию. Именно здесь в результате длительной работы он изобрел новый способ получения изображений.

В то время Габор считал важнейшей задачей усовершенствование электронного микроскопа. Электронный микроскоп отличается от обычного лишь тем, что в нем изображение образуется не световыми волнами, а электронами, попадающими на фотографическую эмульсию после того как они прошли через исследуемый объект. В том месте эмульсии, куда попал электрон, после проявления возникает почернение. Там, куда попало больше электронов, почернение оказывается более интенсивным.

Электронный микроскоп, как и оптический, формирует в плоскости, в которой расположена фотоэмульсия, резкое и четкое изображение только от малой части исследуемого объекта. Одновременно получить на эмульсии резкое изображение всей толщи объекта невозможно. Не сфокусированные части объекта дают на снимке фон, лишь ухудшающий качество изображения и не дающий никакой дополнительной информации об объекте.

Габор вновь и вновь возвращался к мысли о том, что поток электронов, прошедших сквозь объект, несет в себе полную информацию о всех взаимодействиях, испытанных электронами в толще объекта. И в нем крепко стремление найти путь к использованию такой информации. Он ясно понимал, что успех, достигнутый при решении этой специальной задачи, будет иметь гораздо более широкое значение. Ведь и свет, падающий на объектив фотоаппарата или на зрачок глаза, содержит обширную информацию о всех предметах, от которых исходит свет. Но ни глаз, ни фотоаппарат, ни электронный микроскоп не могут одновременно образовать резкого изображения всех деталей независимо от их местоположения. Такова природа образования изображения при помощи линз. Линзы отображают на плоскости только плоские объекты, расположенные в определенных «сопряженных» плоскостях. В результате фотоэмульсия фиксирует лишь ничтожную часть информации, переносимой светом или электронами.

Итак, Габор первым противопоставил скудость фотоизображения богатству информации, содержащейся в световом или электронном потоке. Он же указал путь преодоления этого разрыва, который состоял из нескольких скачков:



Первый – отказ от применения линз, ибо, формируя изображение одной плоскости объекта, линзы приводят к потере информации об остальной, причем большей, его части.

Второй – фиксирование на фотоэмульсии не изображения объекта, а по возможности всей информации о нем, переносимой пучком электронов или лучами света.

Третий – использование записанной информации для того, чтобы впоследствии создавать пучки света, несущие в себе всю эту информацию.

И четвертый – формирование при помощи этих пучков света изображения того объекта, информация о котором была зафиксирована в первой стадии процесса.

Габор подчеркивал, что радикальное отличие нового метода от обычной фотографии, которая записывает на фотоэмульсии изображение предмета в один прием, состоит в том, что процесс получения изображения разбит на два этапа, происходящих в различные моменты и совершенно независимо. Сперва на фотоэмульсию записывается информация об объекте, содержащаяся в потоке света или электронов, взаимодействующих с объектом. После проявления записанная информация может храниться сколь угодно долго, и, когда нужно, можно приступить ко второму этапу – воссозданию изображения на основе этой информации. Габор назвал свой метод голографией, прибегнув, как обычно, к греческому языку. «Голограмма» означает «полная запись». Воссоздание изображения при помощи голограммы он назвал «реконструкцией».

Однако, как часто бывает в науке, до появления в 60-х годах первых лазеров голографию всерьез не принимали. Зато потом голография начала развиваться с огромной скоростью и, со временем, превратилась в мощный научный инструмент, обладающий недоступными ранее возможностями.

Взрывному интересу к голографии в немалой степени способствовал тот факт, что американские физики Э.Лейт и Ю.Упатниекс проявили себя не только умелыми экспериментаторами, но и незаурядными психологами, показав журналистам в качестве своей первой пропускающей голограммы голограмму металлического доллара, как бы висящего в воздухе. Прием сыграл на все 100%. Что такое голография журналисты тогда не знали, но что такое доллар - им было известно прекрасно. Восторженные, захлебывающиеся рассказы об увиденном «чуде», которое можно видеть, но нельзя потрогать, сыграли свою роль. Голографией заинтересовались не только ученые. Нашлись деньги на дальнейшие исследования. Процесс пошел и начал набирать обороты.

В это же самое время в Ленинграде советский физик Ю. Денисюк записал свою первую зонную пластинку (голограмму линзы). Этот, на первый взгляд незначительный, факт вывел голографию на совершенно новый уровень, поскольку примененный им способ съемки позволял использовать лазер только при записи голограммы, а восстанавливать их можно уже обычными источниками белого света. Именно по такой схеме сейчас и записываются все изобразительные голограммы.

## ГЛАВА 2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГОЛОГРАФИИ.

### 2.1. Основные понятия.

Процесс видения окружающих нас предметов осуществляется с помощью физического носителя, именуемого светом. По определению слово свет означает оптическое излучение, видимое человеческим глазом. Свет представляет собой психофизическое понятие. Физическая природа света та же, что и радиоволн - это распространяющиеся в пространстве электромагнитные колебания.

Изменение частоты световых колебаний воспринимается нашим глазом как изменение цвета. Свет распространяется в пространстве с наивысшей возможной скоростью  $c=3 \cdot 10^8$  м/с. Электромагнитная волна, колебания в которой происходят с одной строго постоянной частотой, называется монохроматической (одноцветной).

Световые волны возбуждают зрительные нервы нашего глаза, благодаря чему процесс видения оказывается возможным. Так что же физически представляет собой процесс видения? Для ответа на этот вопрос рассмотрим простейший случай - синусоидальную (монохроматическую) волну, распространяющуюся в одном направлении. Тогда в любой момент времени  $t$  картина волны будет иметь вид синусоиды с соответствующими данной волне параметрами  $\nu$  (частота излучения) и  $T$  (период колебаний). Если же возьмем какую-либо фиксированную точку на пути распространения волны и рассмотрим изменение амплитуды волны в этой точке со временем, то увидим, что эта амплитуда изменяется также по синусоидальному закону, с тем же периодом колебаний  $T$ . Для того чтобы описать волновой процесс одновременно во времени и пространстве, достаточно представить себе, что синусоидальная волна движется параллельно самой себе вдоль какой-либо оси. При этом достаточно рассматривать движение такой точки на кривой, которая будет характеризоваться двумя параметрами: амплитудой и фазой, их значения зависят от расстояния между выбранной точкой и источником излучения.

Предположим теперь, что в пространстве расположен точечный монохроматический источник, испускающий волны равномерно во всех направлениях. В этом случае в любом направлении от источника волновой процесс будет описываться одной и той же синусоидальной кривой. Чтобы охарактеризовать распространение этих волн в пространстве, необходимо рассмотреть движение уже не одной точки, а целого семейства точек, расположенных на одинаковом расстоянии от источника излучения, т. е. точек, в которых все волны имеют одну и ту же фазу. Поверхность, образуемая в пространстве этими точками, называется волновым фронтом. По форме волновых фронтов различают волны плоские (плоские волновые фронты), цилиндрические (цилиндрические волновые фронты) и сферические (сферические волновые фронты). Волновые фронты точечного источника, излучающего равномерно во все стороны, имеют форму концентрических сфер (в плоскости они будут выглядеть как концентрические окружности). Эти сферы распространяются от ис-

точника со скоростью света  $c$  и по мере удаления от источника их радиус увеличивается. Следовательно, определив в какой-либо точке пространства кривизну волнового фронта, мы в принципе можем определить расстояние до источника излучения.

Если на пути распространения световой волны оказывается какой-то предмет, волновой фронт искажается. Вследствие внесенного предметом рассеяния света волны, идущие от разных точек освещаемого предмета, будут иметь различные амплитуды и фазы. В этих амплитудных и фазовых искажениях волнового фронта и заключена информация о форме предмета, в том числе и его объемное изображение. Используя эти предпосылки, Д. Габор предложил вместо изображения предмета регистрировать пространственную структуру самой волны света, а именно несущий информацию о предмете волновой фронт, и затем по этой записи восстанавливать изображение предмета.

Такой двухступенчатый процесс записи и восстановления волнового фронта, несущего информацию о предмете, и называется голографией, а зафиксированная на какой-либо регистрирующей среде пространственная структура световой волны - голограммой.

Дело в том, что технические средства не в состоянии прямым путем измерить фазу столь высокочастотных колебаний, какими являются световые сигналы, поскольку реакция любого приемника света (фотоумножителя, фотодиода, фототранзистора и даже человеческого глаза) определяется значением средней интенсивности света. Однако решение этой задачи оказалось неожиданно очень простым: использовать для получения голограммы интерференцию двух когерентных пучков света, называемых обычно объектным и опорным, а для восстановления изображения с голограммы - явление дифракции света.

Отсюда более развернутым и полным представляется следующее определение голографии. Голография - направление в физике, в основе которого лежат специальные методы получения, восстановления и преобразования волн. Совокупность таких методов называется голографическим процессом.

## 2.2. Образование голографического изображения

Голография обязана своим возникновением основным законам волновой оптики - законам интерференции и дифракции.

### 2.2.1. Интерференция.

Физическая идея состоит в том, что при наложении двух световых пучков, при определенных условиях возникает интерференционная картина, то есть, в пространстве возникают максимумы и минимумы интенсивности света (это подобно тому, как две системы волн на воде при пересечении образуют чередующиеся максимумы и минимумы амплитуды волн).

Явление интерференции имеет место для всех видов волн, так что интерференционную картину можно получить от любых двух источников колебаний, но наиболее четко выраженные усиления и ослабления результирующих, колебаний наблюдаются в том случае, когда источники обладают своего рода определенной синхронностью излучения, называемой когерентностью. Когерентными считаются колебания одной частоты, разность фаз которых не меняется в течение рассматриваемого промежутка времени.



Если волны встречаются в фазе, то они складываются друг с другом и дают результирующую волну с амплитудой, равной сумме их амплитуд. Если же они встречаются в противофазе, то будут гасить одна другую. Между двумя этими крайними положениями наблюдаются различные ситуации сложения волн. Результирующая сложения двух когерентных волн будет всегда стоячей волной. То есть интерференционная картина будет устойчива во времени. Это явление лежит в основе получения и восстановления голограмм.

Обычные источники света не обладают достаточной степенью когерентности для использования в голографии. Поэтому решающее значение для ее развития имело изобретение в 1960 г. оптического квантового генератора или лазера - удивительного источника излучения, обладающего необходимой степенью когерентности и могущего излучать строго одну длину волны.

### 2.2.2. Дифракция.

Если на пути света оказывается какой-либо предмет, то он отбрасывает тень. Однако свет не распространяется строго по прямой линии, но, огибая предмет, частично заходит в область тени. В общем можно сказать, что этот эффект, называемый дифракцией, обусловлен волновой природой света, хотя его строгое объяснение достаточно сложно.

Когда волновой фронт падает на единичное большое препятствие, соответствующая часть его просто «выпадает». Когда же на пути волнового фронта находится множество мелких препятствий, он в результате дифракции изменяется таким образом, что свет, распространяющийся за препятствием, будет иметь качественно иной волновой фронт. Таким образом, дифракция дает нам в руки способ, позволяющий преобразовать один волновой фронт в другой, совершенно отличный от исходного. Иными словами, дифракция – это механизм, посредством которого мы можем создавать новый волновой фронт света.

Устройство, таким путем формирующее новый волновой фронт, называется дифракционной решеткой. В простейшем виде она представляет собой небольшую пластинку, на которую нанесены параллельные тонкие прямые линии (штрихи), отстоящие друг от друга примерно на сотую и даже тысячную долю миллиметра. Если поставить решетку, состоящую из слегка размытых ярких и темных полос, на пути

лазерного луча, то часть его будет проходить через решетку прямо, а часть – загигаться; в результате формируются два новых пучка, выходящих из решетки под некоторым углом к исходному лучу по обе стороны от него. Если первый лазерный пучок имеет, например, плоский волновой фронт, то и два новых пучка, образовавшиеся по бокам от него, также будут обладать плоскими волновыми фронтами. Следовательно, пропуская пучок лазерного излучения через дифракционную решетку, мы создаем два новых плоских волновых фронта. Таким образом, дифракционную решетку можно рассматривать как простейший пример голограммы.

### 2.2.3. Голограмма – дифракционная решетка

Рассмотрим два плоских волновых фронта, которые, взаимодействуя, создают интерференционную картину; последнюю регистрируют на фотографической пластинке, помещенной в то же место, где находился экран. В голографии эта (первая) стадия процесса называется регистрацией (или записью) голограммы. Одна из плоских волн (для определенности, скажем, волна *A*) называется *опорной волной* (или опорным волновым фронтом). Тогда волну *B* мы будем называть *предметной*, то есть волной (или волновым фронтом), отраженной от предмета, изображение которого регистрируется; в нашем случае она ничем не отличается от опорной волны, однако при получении голограммы реального трехмерного объекта возникает существенно более сложный волновой фронт отраженного от него света. Интерференционная картина, записанная на фотографической пленке (изображение дифракционной решетки), и есть голограмма. Если эту голограмму поместить на пути первичного опорного пучка (пучка лазерного света, имеющего плоский волновой фронт), то по обе стороны от него образуются два новых волновых фронта. Один из них будет точной копией предметного волнового фронта, иначе говоря, это будет плоский волновой фронт, распространяющийся в том же направлении, что и волна *B*. Эта вторая стадия голографического процесса называется *восстановлением* изображения.

Записанная на фотопластинке интерференционная картина, созданная двумя когерентными плоскими волнами, представляет собой некое устройство, которое – если его потом осветить одной из названных плоских волн – позволяет восстановить другую плоскую волну. Таким образом, голографический процесс включает в себя следующие стадии: регистрацию и «хранение» предметного волнового фронта в виде интерференционной картины (то есть голограммы) и – спустя любое время – восстановление его при прохождении через голограмму опорной волны. В действительности предметный волновой фронт может быть любым, в частности, это может быть волновой фронт, отраженный от реального предмета, если при этом он когерентен опорной волне. Интерференционная картина, сформированная любыми двумя когерентными волновыми фронтами, и есть именно то устройство, которое бла-

годаря дифракции позволяет преобразовать один из этих волновых фронтов в другой. Здесь-то и спрятан ключ к голографии.

Чтобы наблюдать изображение, создаваемое простейшей голограммой – дифракционной решеткой, ее следует поместить на расстоянии примерно 1 м от глаза и смотреть сквозь решетку в направлении, в котором из нее выходят восстановленные плоские волны. Поскольку в глаз наблюдателя попадают плоские волны, изображение также имеет вид плоскости и предстает перед нами как «глухая стена», равномерно освещенная светом того же цвета, что и у лазерного излучения. Поскольку такая «стена» лишена каких-либо специфических признаков, невозможно сказать, как далеко она находится. Создается впечатление, что вы смотрите на бесконечно протяженную стену, расположенную где-то в бесконечности, но видите при этом только часть ее, которую вам удастся рассмотреть через небольшое «окно» – дифракционную решетку. Таким образом, дифракционная решетка предстает равномерно светящейся поверхностью и мы не замечаем на ней ничего интересного и достойного внимания.

Голограмма – дифракционная решетка – позволяет наблюдать ряд простейших эффектов, которые можно продемонстрировать и с помощью голограмм другого типа. Пучок света, проходя через дифракционную решетку, расщепляется, образуя два новых пучка. Любую дифракционную решетку можно освещать пучками лазерного излучения, отличающимся цветом от того, что использовался при ее записи. В каждом случае угол, под которым изгибается пучок света, зависит от цвета этого пучка. Так, пучок красного цвета (наиболее длинноволнового) изгибается под большим углом, чем пучок синего цвета (имеющий меньшую длину волны). Если через дифракционную решетку пропустить белый свет, то есть смесь всех цветов, то каждая цветовая компонента его будет искривляться под «своим» углом, и тогда на выходе дифракционной решетки мы получим спектр цветов, аналогичный тому, что создает призма.

Чтобы искривление световых лучей было заметно, штрихи дифракционной решетки должны располагаться очень близко друг к другу. Например, для искривления луча красного цвета на  $20^\circ$  необходимо, чтобы расстояние между ними не превышало 0,002 мм; при более тесном размещении штрихов луч света будет изгибаться еще больше. Для «записи» такой решетки потребуются, конечно, фотопластинка, способная регистрировать столь тонкие детали. Необходимо также, чтобы в процессе экспозиции и при регистрации интерференционной картины пластинка оставалась абсолютно неподвижной. При малейшем движении картина может смазаться настолько, что окажется совершенно неразличимой, и тогда вместо интерференционной картины мы увидим просто стеклянную пластинку, однородно серую или черную по всей поверхности. Конечно, ни о каком воспроизведении специфических эффектов дифракции, создаваемых дифракционной решеткой, в таком случае не может быть и речи.

Рассмотренная дифракционная решетка называется *пропускающей*, так как она действует в проходящем через нее свете. Если же линии решетки нанести на поверхность зеркала, а не на прозрачную пластинку, то получится *отражательная* дифракционная решетка. Такая решетка отражает свет различных цветов под разными углами. Соответственно существуют два обширных класса голограмм – пропускающие и отражательные голограммы; первые из них наблюдаются в проходящем, а вторые – в отраженном свете.

## ГЛАВА 3. ТИПЫ ГОЛОГРАММ.

Структура голограммы зависит от способа формирования предметной и опорной волн и от способа записи интерференционной картины. Предмет освещается пучком когерентного света, рассеянная им световая волна, несущая информацию о предмете, падает на фотопластинку, освещаемую опорным пучком. В зависимости от взаимного расположения предмета и пластинки, а также от наличия оптических элементов между ними, связь между амплитудно-фазовыми распределениями предметной волны в плоскостях голограммы и предмета различна.

Если предмет лежит в плоскости голограммы или сфокусирован на нее, то амплитудно-фазовое распределение на голограмме будет тем же, что и в плоскости предмета (*голограмма сфокусированного изображения*).

Когда предмет находится достаточно далеко от пластинки, либо в фокусе линзы, то каждая точка предмета посылает на пластинку параллельный световой пучок, при этом связь между амплитудно-фазовыми распределениями предметной волны в плоскости голограммы и в плоскости предмета дается преобразованием Фурье (комплексная амплитуда предметной волны на пластинке – так называемый *фурье-образ* предмета). Голограмма в этом случае называется *голограммой Фраунгофера*. Если комплексные амплитуды предметной и опорной волн являются фурье-образами и предмета и опорного источника, то голограмму называют *голограммой Фурье*. При записи голограммы Фурье предмет и опорный источник обычно располагают в фокусе линзы. В случае безлинзовой фурье-голограммы опорный источник располагают в плоскости предмета. При этом фронт опорной волны и фронты элементарных волн, рассеянных отдельными точками объекта, имеют одинаковую кривизну. В результате структура и свойства голограмм практически такие же, как у фурье-голограммы. *Голограммы Френеля* образуются в том случае, когда каждая точка предмета посылает на пластинку сферическую волну. По мере увеличения расстояния между объектом и пластинкой голограммы Френеля переходят в голограммы Фраунгофера, а с уменьшением этого расстояния – в голограммы сфокусированных изображений.

Пространственная частота  $\nu$  интерференционной структуры (величина, обратная ее периоду) определяется углом  $\alpha$ , под которым сходятся в данной точке световые лучи, исходящие от опорного источника и предмета:

$$\nu = (2 \sin \alpha/2)/\lambda, \quad \text{где } \lambda \text{ – длина волны.}$$

В схеме Габора опорный источник и предмет расположены на оси голограммы, угол  $\alpha$  близок к нулю и  $\nu$  минимальна. Осевые голограммы называются также *однолучевыми*, так как используется один пучок света, часть которого рассеивается предметом и образует предметную волну, а другая часть, прошедшая через объект без искажения, – опорную волну.

В схеме Лейта и Упатниекса когерентный наклонный опорный пучок формируется отдельно (*двухлучевая голограмма*). Для двухлучевых голограмм  $\nu$

выше, чем для однолучевых (требуются фотоматериалы с более высоким пространственным разрешением). Если опорный и предметный пучок падают на светочувствительный слой с различных сторон ( $\alpha \sim 180^\circ$ ), то  $\nu$  максимальна и близка к  $2/\lambda$  (*голограммы во встречных пучках*). Интерференционные максимумы располагаются вдоль поверхности материала в его толще. Эта схема была впервые предложена Денисюком. Поскольку при освещении такой голограммы опорным пучком восстановленная предметная волна распространяется навстречу освещающему пучку, такие голограммы иногда называют *отражательными*. Если толщина светочувствительного слоя  $\delta$  много больше расстояния между соседними поверхностями интерференционных максимумов, то голограмму следует рассматривать как *объемную*. Если же запись интерференционной структуры происходит на поверхности слоя или если толщина слоя сравнима с расстоянием  $d$  между соседними элементами структуры, то голограммы называют *плоскими*. Критерий перехода от двухмерных голограмм к трехмерным:  $\delta \geq 1,6d^2/\lambda$ .

Интерференционная структура может быть зарегистрирована светочувствительным материалом одним из следующих способов: 1) в виде вариаций коэффициента пропускания света или его отражения. Такие голограммы при восстановлении волнового фронта модулируют амплитуду освещающей волны и называются *амплитудными*. 2) в виде вариаций коэффициента преломления или толщины (рельефа). Такие голограммы при восстановлении волнового фронта модулируют фазу освещающей волны и поэтому называются *фазовыми*. Часто одновременно осуществляется фазовая и амплитудная модуляции. Например, обычная фотопластинка регистрирует интерференционную структуру в виде вариаций почернения, показателя преломления и рельефа. После отбеливания голограммы остается только фазовая модуляция.

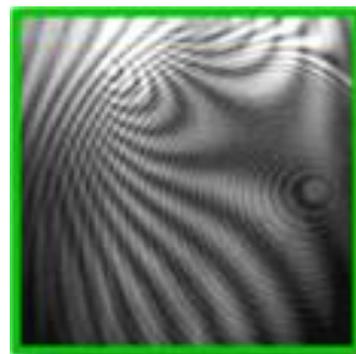
Зарегистрированная на фотопластинке интерференционная структура обычно сохраняется долго, то есть процесс записи отделен во времени от процесса восстановления (стационарные голограммы). Однако существуют светочувствительные среды (некоторые красители, кристаллы, пары металлов), которые почти мгновенно реагируют фазовыми или амплитудными характеристиками на освещенность. В этом случае голограмма существует только во время воздействия на среду предметной и опорной волн, а восстановление волнового фронта производится одновременно с записью, в результате взаимодействия опорной и предметной волн с образованной им же интерференционной структурой (*динамические голограммы*). На принципах динамических голограмм могут быть созданы системы постоянной и оперативной памяти, корректоры излучения лазеров, усилители изображений, устройства управления лазерным излучением, обращения волнового фронта.

### 3.1. Плоские пропускающие голограммы.

Опишем, как получают голограмму какого-либо предмета, а точнее волнового фронта света, отраженного от предмета (или группы предметов). Предмет, освещенный лазерным лучом, отражает волновой фронт, который обладает важнейшим свойством когерентности. Благодаря этому такой волновой фронт, взаимодействуя с другим когерентным волновым фронтом (обычно простейшей формы, например, плоским), выполняющим роль опорного пучка, создает специфическую единственную в своем роде интерференционную картину.

Предмет устанавливают вблизи фотопластинки и освещают пучком лазерного света. Часть волнового фронта, который отражается от предмета во всех направлениях, падает на фотопластинку. Одновременно на нее под некоторым углом к предметной волне проецируют опорный волновой фронт (или опорный пучок).

Необходимая когерентность двух волновых фронтов – опорного и предметного – достигается путем деления луча лазера на две части; это осуществляется так называемыми *расщепителями пучка*. Каждый из полученных таким образом пучков расширяется с помощью специального приспособления и направляется зеркалами в нужную сторону: один – на фотопластинку, другой – на предмет.



Пропускающая голограмма

Продолжительность экспозиции фотопластинки определяется требуемой яркостью получаемого изображения, то есть зависит от мощности лазера. При сравнительно малой мощности лазера время экспозиции составляет несколько секунд. С облучением фотографической пластинки процесс регистрации заканчивается. Записанное на ее поверхности изображение и есть голограмма. Она представляет собой чрезвычайно сложную картину, состоящую из множества тонких причудливых линий, в которых невозможно усмотреть никакого сходства с реальным предметом. Если рассматривать голограмму в дневном свете, держа ее на расстоянии вытянутой руки, она покажется однородно-серой, и мы не обнаружим ни малейшего намека на изображение, закодированное в ее структуре. Более пристальное изучение голограммы под лупой откроет запутанную картину изогнутых темных линий, завитков и «мишеней». В действительности это всего лишь поверхностные дефекты голограммы, обусловленные дифракцией света на частичках пыли и несовершенством оптической системы. Собственно голографические полосы можно наблюдать только в мощный микроскоп.



При восстановлении изображения используется та же схема, что и при регистрации голограммы, с той лишь разницей, что предмет и освещающий его пучок убирают. Голограмму устанавливают так, чтобы опорный пучок падал на нее примерно под тем же углом, что и на стадии регистрации. Часть пучка проходит через голограмму, «не реагируя» на ее присутствие, но часть его отклоняется, формируя по обе стороны пластинки два новых волновых фронта, один из которых представляет собой точную копию первичного волнового фронта, отраженного от предмета.

Голографическое изображение, полученное таким образом, оказывается в точности подобным реальному предмету. Оно объемно, и мы можем заглянуть за «предметы», расположенные на переднем плане, просто слегка двигая головой в сторону (явления параллакса).

Голограмму можно разбить на две части, и тогда получаются две голограммы предмета. Однако, поскольку каждая из них меньше первоначальной, по отдельности они дадут только части того первоначального «окна», через которое мы видим изображение. Это в свою очередь ограничит интервал углов, под которыми мы можем наблюдать изображение, причем неизбежно эти две голограммы воспроизводят изображения предмета, рассматриваемого под несколько отличающимися углами зрения.

Стеклянные фотопластинки, используемые для получения голограмм такого размера, которые обычно демонстрируются на различных выставках, имеют площадь порядка  $1 \text{ м}^2$ . Помимо стеклянных фотопластинок для голограмм применяют также гибкие фотографические пленки. Их можно делать размером до  $6 \text{ м}^2$ , что позволяет получать очень большие голограммы.

Свернув такую пленку в виде цилиндра и поместив внутрь его нужный нам предмет, мы можем изготовить цилиндрическую голограмму. (В этом случае опорный пучок должен освещать всю поверхность цилиндра, и простая плоская волна здесь не годится). Такую голограмму можно обходить вокруг и рассматривать с любой стороны. При восстановлении изображения создается впечатление, что предмет заключен внутри цилиндра.

Голографическое изображение характеризуется рядом особенностей, связанных с тем, что для его получения используется высококогерентный свет лазера. Если предмет первоначально освещается монохроматическим светом – чаще всего это красный свет гелий-неонового лазера, - то и последующее восстановление изображения осуществляется с помощью луча того же света. В результате голографическое изображение также оказывается одноцветным, например, красным. Для получения голограммы, воспроизводящей естественный цвет предметов, требуются значительно более сложные методы. Другой особенностью голографического изображения является его своеобразная зернистая структура; она обусловлена тем, что при голографировании предмет освещается когерентным светом. Предпринимались неоднократные попытки «очистить» голограммы от этой досадной зернистости, однако успехи здесь пока невелики.

Голограмма способна воспроизводить свыше миллиона оттенков яркости, тогда как для фотографии этот показатель не превышает сотни. Таким образом, голограммы чрезвычайно полезны для качественного воспроизведения освещенности разных частей предмета.

Иногда, чтобы подчеркнуть реалистичность голографического изображения, в голографическую сцену (то есть вблизи предмета) помещают кусочки битого стекла. Рассматривая затем восстановленное изображение с разных сторон, мы видим игру света, отраженного от граней стекла, - благодаря этому сходство с оригиналом усиливается. Применяется и другой способ. Перед мелкими голографируемыми предметами устанавливают линзу. Наблюдая затем воспроизведенное изображение под разными углами, мы увидим увеличенными разные предметы, словно то один, то другой попадает под увеличительное стекло.

Посредством двойной экспозиции на одной и той же фотопластинке можно запечатлеть два различных голографических изображения. При воспроизведении эти изображения будут накладываться друг на друга. Таким путем изготавливают весьма интересные голограммы. Сначала обычным способом делают голограмму какого-либо предмета (или предметов). Затем голографируемый предмет слегка сдвигают или заменяют другим, и на той же пластинке записывают вторую голограмму. Когда такую «двойную» голограмму освещают, восстанавливаются оба изображения, как бы наложенные одно на другое. Размещая голографируемые предметы надлежащим образом, можно создать иллюзию, что два предмета частично перекрывают друг друга или что один из них находится внутри другого.

В процессе восстановления голограмма создает два новых волновых фронта, один из которых является точной копией волнового фронта, отраженного от реального объекта. Изображение, формируемое этим волновым фронтом, называется *мнимым* (или *точным*) *изображением*. Второй новый волновой фронт, выходящий из голограммы, также создает изображение – так называемое *действительное* (или *сопряженное*) *изображение*, которое обладает рядом интересных свойств.

Особенность этого изображения состоит в том, что оно воспринимается наблюдателем как обратное изображение реального объекта (или объектов), и эффекты параллакса также оказываются обратными – явление, называемое *псевдоскопией* (соответственно такое изображение мы будем называть *псевдоскопическим*). Псевдоскопичность изображения можно обнаружить, покачивая головой из стороны в сторону: тогда кажется, что предметы, находящиеся в задней части сцены, сдвигаются больше тех, что расположены впереди. Когда наблюдаешь этот эффект впервые, он производит неожиданное и ошеломляющее впечатление, поскольку противоположен тем привычным эффектам параллакса, с которыми мы сталкиваемся повседневно и которые называются *ортоскопией*. Совершенно невозможно правильно и точно описать псевдоскопическое изображение, создаваемое голограммой, - его надо видеть. Специалисты по голографии, немало поработавшие с такими изображениями и уже привыкшие к ним, приобретают способность мысленно «выворачи-

вать» их таким образом, чтобы видеть обычные ортоскопические изображения. Говорят, что однажды подобному испытанию подвергли группу людей, которые в течение какого-то времени постоянно носили очки, переворачивающие мир «вверх ногами». После первой недели растерянности испытуемые сообщили, что теперь они вновь видят мир правильно – их мозг приспособился нужным образом «трансформировать» изображение, возникающее на сетчатке глаза. Когда же испытание закончилось, им опять пришлось пройти период адаптации, пока не вернулось нормальное видение мира.

Отметим, что существует специальный метод, позволяющий преобразовывать голографическое изображение из псевдоскопического в ортоскопическое.

Другая интересная особенность сопряженного изображения состоит в том, что на экране, установленном в месте его локализации, воспроизводится плоское, напоминающее фотографию изображение предмета, который был голографирован. Если же на место экрана поместить фотопластинку, то мы и в самом деле можем получить фотографию данного предмета, хотя, конечно, ее гораздо проще сделать с помощью обычного фотоаппарата.

Описанные здесь голограммы относятся к типу пропускающих, поскольку в этом случае предметный волновой фронт восстанавливается при прохождении света через голограмму. Схема, используемая для их получения, называется *внеосевой* (или *схемой с наклонным опорным пучком*) и несколько отличается от той, которую использовал Деннис Габор, получивший в 1948 г. первую голограмму. Основные принципы голографирования в обоих случаях одинаковы, однако внеосевая схема – ее предложили в начале 60-х годов американские ученые Иммет Лейт и Юрис Упатниекс, работавшие в Мичиганском университете, - обладает рядом преимуществ по сравнению со схемой Габора.

Широта возможностей голографического процесса ограничивается рядом факторов, прежде всего мощностью и качеством лазера, используемого в каждой конкретной установке, а также условиями, которые необходимо соблюдать при регистрации голограммы. Эти ограничения распространяются, вообще говоря, на процесс получения не только пропускающих голограмм, но и голограмм многих других типов.

## 3.2. Объемные голограммы.

Если голограмму записать в некоторой объемной среде, то полученная модель стоячей волны однозначно воспроизводит не только амплитуду и фазу, но и спектральный состав записанного на ней излучения. Это обстоятельство было положено в основу создания *трехмерных* (объемных) голограмм.

В основу работы объемных голограмм положен дифракционный эффект Брэгга: в результате интерференции волн, распространяющихся в толстослойной эмульсии, образуются плоскости, засвеченные светом большей интенсивности. После проявления голограммы на засвеченных плоскостях образуются слои почернения. В результате этого создаются так называемые *брэгговские плоскости*, которые обладают свойством частично отражать свет. Т.е. в эмульсии создается трехмерная интерференционная картина.

Чтобы процесс восстановления изображения *объемной пропускающей голограммы* был эффективным, опорный пучок следует направить на нее точно под тем же углом, под каким он падал на фотопластинку при регистрации голограммы; в противном случае мы не получим никакого изображения. Кроме того, для восстановления должно использоваться излучение того же цвета, что и для записи голограммы. При соблюдении названных условий, меняя угол падения опорного пучка, на одной фотопластинке удастся зарегистрировать до ста различных изображений. И каждое из них можно затем отдельно рассматривать, направляя на пластинку опорный пучок под соответствующим углом.

Схема регистрации объемных пропускающих голограмм подобна той, что применяется для записи плоских голограмм; разница лишь в том, что здесь требуются пластинки с более толстым слоем эмульсии.

*Объемные отражательные голограммы* получают совершенно иным способом. При их регистрации опорный пучок и фронт волны, отраженный от объекта, должны падать на фотопластинку с противоположных направлений. Такую отражательную голограмму можно рассматривать как состоящую из двух наборов интерференционных полос, выполняющих различные функции. По всей глубине голограммы интерференционные полосы действуют как светофильтры для излучения, которое отражается от голограммы. Подобный светофильтр называется интерференционным. При таком способе регистрации голограммы интерференци-



онные полосы располагаются в плоскостях, отстоящих друг от друга на  $\frac{1}{2}$  длины волны лазерного излучения, и каждая из плоскостей, подобно зеркалу, частично отражает свет, причем усиливающая интерференция возникает только для определенного цвета, а именно такого, половина длины волны которого точно равна расстоянию между этими «зеркалами». Разумеется, интерференционные полосы на такой голограмме выполняют и свои обычные «функции» по отношению к свету, отраженному от «фильтров-зеркал», поэтому восстановление предметного волнового фронта происходит только в лучах соответствующего цвета. Цвет отраженного «фильтрами» излучения зависит от расстояния между плоскостями, в которых лежат интерференционные полосы, а оно в свою очередь определяется цветом лазерного луча, использованного для регистрации данной голограммы.

Теоретически, если голограмма записывалась, например, в красном свете, то интерференционные полосы являются красными фильтрами, и когда на голограмму падает свет, они поглощают все его составляющие, за исключением красной, которую отражают. В действительности же часто случается, что голограмма, записанная в красном свете лазера, дает зеленое изображение. Это обусловлено небольшим уменьшением толщины эмульсионного слоя (усадкой эмульсии) в процессе обработки голограммы, вследствие чего расстояние между плоскостями интерференционных полос изменяется. Обычно названный эффект не вызывает особого беспокойства, поскольку изображение монохроматично (вряд ли имеет значение, какого оно цвета – красного или зеленого). Это становится проблемой только при изготовлении «цветных» отражательных голограмм. С отражательными голограммами связан еще один эффект: когда мы смотрим на голограмму под различными углами, цвет изображения меняется от зеленого до синего.

Таким образом, объемная отражательная голограмма дает трехмерное голографическое изображение даже в том случае, когда ее освещают белым светом, лучше всего солнечным светом или ярким лучом фонаря. Отражательные голограммы, позволяющие восстанавливать изображение в белом свете, часто называют голограммами Денисюка – в честь советского ученого, предложившего в 1962 году этот способ голографирования.

### **3.3. Фазовые голограммы.**

Голограммы можно записывать не только на фотографических пластинках, но и в других средах. Существует множество разнообразных материалов, обладающих необходимыми для этого чувствительностью и разрешающей способностью. Но они реагируют на свет совершенно иначе, чем фотопластинка. Например, вместо того, чтобы темнеть в том месте, куда падает свет, они изменяют свою толщину, и в соответствии с толщиной материала в точке отражения изменяется фаза отраженной световой волны. Таким образом, при восстановлении изображения фаза опорного волнового фронта изменяется от точки к точке на поверхности голограммы. В результа-

те на выходе голограммы формируется волновой фронт, который, как это и требуется, точно воспроизводит волновой фронт, отраженный от предмета.

Такие фазовые голограммы могут работать как на пропускание, так и на отражение. Они создают более яркие изображения, чем голограммы, записанные на фотопластинке, поскольку в этом случае для формирования восстановленного волнового фронта используется большая доля падающего на голограмму света. При рассмотрении в обычном дневном свете фазовые пропускающие голограммы выглядят прозрачными, как стекло.

В качестве материалов для регистрации фазовых голограмм используют, например, термопластичную прозрачную пластмассу, твердые листы которой устанавливают вместо фотопластинки. При записи голограмм на термопласте обычно требуется лазер высокой мощности или длительная экспозиция, поскольку регистрация голограммы в этом случае осуществляется благодаря тому, что в соответствующих участках интерференционной картины материал слегка нагревается и его толщина изменяется. Часто для этих целей применяют и другой материал – бихромированную желатину.

Одним из преимуществ термопласта как материала для регистрации фазовых голограмм следует считать то, что позволяет наладить массовое производство голограмм. Листы термопласта можно штамповать при помощи металлической матрицы.

Вообще говоря, обычные голограммы, записанные на фотопластинке, можно превратить в фазовые, если отбелить темные интерференционные полосы соответствующим отбеливающим средством. В результате изменение степени потемнения во всем объеме пластинки превращается в изменение ее оптической плотности, которое соответствующим образом влияет на фазу опорного волнового фронта. Таким образом, удобство получения фотографических голограмм (использование мало-мощных лазеров) удастся сочетать с яркостью изображения, создаваемого фазовыми голограммами.

# ГЛАВА 4. ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНТЕРФЕРО- МЕТРИЯ

Голография уже перестает быть экзотикой. Однако некоторые стороны процесса внедрения голографии в современную жизнь все еще остаются за кадром. Это проблема распознавания образов, интерферометрические измерения, создание голограммных оптических элементов, вопросы обработки изображений и многое другое.

Именно им, а точнее, одной из обладающей уникальными возможностями, сторон голографии (голографической интерферометрии) и посвящены эти заметки.

Естественно, голографическая интерферометрия появилась не на пустом месте. У ее истоков стоит то, что принято теперь называть классической интерферометрией. Поэтому с нее и начнем.

## 4.1. Классическая интерферометрия

Классическая интерферометрия всегда имела и имеет дело только с прозрачными или зеркально отражающими объектами. Казалось, что это навсегда. И удел интерферометрии - изучение газов и жидкостей, зеркал и линз. Работы, конечно, хватало и там. Были и масштабные практические результаты.

Например, контроль при производстве оптических изделий, а измерение толщины очень тонких покрытий и сверхточный контроль (с точностью в половину длины волны и меньше) расстояний или перемещений, а экспресс-оценка качества обработки поверхностей с помощью специальной стеклянной пластинки...

Разумеется, было, есть и еще будет очень много и других примеров использования интерферометрии и сделанных с ее помощью открытий. Но речь всегда шла только о прозрачных или зеркальных, слабо искажающих зондирующее излучение объектах. Существует даже понятие - "интерферометрическая точность". Это значит, что поверхности оптических элементов в интерферометрах должны обрабатываться так, чтобы высота неровностей не превышала  $0,1$  длины волны света.

После появления голографии открылась абсолютно новая возможность проведения интерферометрических измерений не только прозрачных, но и диффузно отражающих объектов. Именно по способу взаимодействия с зондирующим излучением и появилось деление объектов на фазовые (прозрачные) и диффузные (то есть отражающие, но не зеркальные).

### 4.1.1. Кое-что из истории.

Первые голографические интерферограммы появились из-за ошибки или случайного стечения обстоятельств. Мало того, на это не обратили внимания. Далеко не все экспериментаторы в первые годы появления голографии прекрасно разбирались в ее теоретических основах. На первых шагах все усилия были направлены на получение собственно голограммы. Из интерферометрии было, конечно, известно, что сдвиг пучков во время экспозиции уже на половину длины волны делает невозмож-

ным запись микроинтерференционной картины, которая и представляет собой голограмму. Поэтому принимались всевозможные меры для обеспечения механической стабильности оптической схемы. В ход шли массивные гранитные и мраморные плиты, не менее массивные держатели оптических элементов. Словом все, до чего мог додуматься изощренный ум экспериментатора. Но первые лазеры имели очень малую мощность, а фотопластинки - аналогичную чувствительность. Словом, стабильность в половину длины волны в течение всего процесса записи голограммы обеспечить было очень и очень трудно. В результате восстановленное изображение иногда покрывалось полосами, которые портили общую картину. Эти голограммы списывали в брак и экспериментаторы с новыми усилиями бросались на обеспечение виброзащиты. Само собой разумеется, что такая ситуация не могла продолжаться долго. Критическая масса нарастала. Кто-то должен был задуматься. И такие нашлись. Причем, это был не гений-одиночка, а сразу несколько независимо работающих групп экспериментаторов. Интересно, что первое сообщение (в 1965 году) касалось голографической интерферометрии с усреднением по времени. Методы двух экспозиций и реального времени моложе первого сообщения примерно на пару-тройку месяцев. Именно так в середине 60-х годов появилась и начала бурно развиваться голографическая интерферометрия.

#### 4.1.2. Методы голографической интерферометрии

На одну пластинку можно записать несколько **волновых фронтов**, то есть несколько голограмм. Если эти волны **когерентны** (а чаще всего так и бывает), то при совместном восстановлении они интерферируют, а в результирующей интерферограмме останется только то, что в этих волнах было разным. Этот метод голографической интерферометрии получил название **метод двух экспозиций**.

Можно сделать и по другому. Отснятую голограмму объекта после обработки устанавливают с высокой точностью на прежнее место - чаще пластинки обрабатывают прямо на месте съемки. При последующем экспонировании голограммы в схеме, использованной при ее же записи, объектная волна, восстановленная с голограммы опорным пучком, будет интерферировать с новой волной, идущей от объекта. В результате можно в реальном режиме времени отслеживать динамику процессов, происходящих в объекте исследования. Такой метод голографической интерферометрии так и называется - **метод реального времени**.

Для более полной ясности можно подчеркнуть, что

- В классической интерферометрии интерферируют волны, которые в один момент времени прошли по разному пути.
- В голографической интерферометрии интерферируют волны, которые в разные моменты времени прошли по одному и тому же пути.

В частности, этот факт позволяет использовать в экспериментах оптические элементы обычного качества без ухудшения вида получаемой интерференционной картины - все неоднородности оптического тракта, неизменные в обеих экспозициях, будут скомпенсированы. Уникальная особенность голографической интерферометрии позволяет изучать процессы, происходящие как внутри оптически неоднородных сред, так и с диффузно отражающими объектами.

Такое было абсолютно недоступно в классической интерферометрии! Классическая интерферометрия имела дело только с процессами и объектами, изменяющимися в реальном режиме времени. В голографической интерферометрии информацию можно записать, а затем сравнить ее с той, которая пришла в другой момент времени. То есть появился еще один фактор - время. Это совершенно невозможная в классической оптике ситуация. Примером могут служить исследования вибрирующих объектов.

## **4.2. Интерферометрия фазовых объектов**

Реальные объекты, с которыми приходится иметь дело в экспериментах, изменяют и фазу, и амплитуду, и направление распространения зондирующего излучения. Это приводит к тому, что основным критерием применимости каждого конкретного метода становится величина ошибки, вносимой им в конечный результат. Принято считать, что для прозрачных объектов применение интерферометрических методов диагностики допустимо, если максимальная рефракция на объекте не превышает 0,1 мрад, а влиянием поглощения можно пренебречь. Именно такие прозрачные объекты и получили название фазовых, то есть изменяющих только фазу зондирующего излучения. Всегда следует помнить, что и классическая и голографическая интерферометрия дают правильные результаты только для чисто фазовых объектов.

### **4.2.1. Виды настройки интерферометров**

Внешний вид и способы расшифровки интерференционной картины, полученной любым способом интерферограммы (голографической или классической), зависят от настройки интерферометра.

### **4.2.2. Бесконечно широкая полоса**

Если после регистрации первой опорной голограммы ни рабочий ни опорный пучок не трогали, то все изменения в результирующей интерференционной картине будут обусловлены только набегом фазы в каждой точке волнового фронта, вызванным процессами, произошедшими в объекте между экспозициями (в методе двух экспозиций) или в течение съемки (в методе реального времени). В этом случае говорят, что интерферометр настроен на бесконечно широкую полосу. Этот термин появился из-за того, что при интерференции тождественных волновых фронтов, распространяющихся по одному и тому же направлению и имеющих неизменный во всех точках набег фазы, результирующая интерференционная картина представляет собой одну единственную полосу - темную или светлую, в зависимости от соотношения фаз интерферирующих волн. При таком способе настройки изменения в объекте между экспозициями проявятся в появлении замкнутых интерференционных полос, как оконтуривающих неоднородность, так и находящихся внутри нее. Однако расшифровать такую интерференционную картину можно только априори зная знак изменения набег фазы при переходе от одной полосы к другой. В получаемой картине эта информация отсутствует.

### 4.2.3. Полосы конечной ширины

Если в интервале между экспозициями или рабочий или опорный пучок или сама пластинка были повернуты на какой-то угол, то результирующая интерференционная картина будет наблюдаться на фоне регулярной системы равноотстоящих друг от друга параллельных полос. Шаг этих полос определяется величиной угла поворота, а ориентация полос зависит от способа их создания. Такая настройка интерферометра называется настройкой на полосы конечной ширины. В этом случае неоднородности в объекте проявляются в виде искривления опорной системы полос. Для расшифровки такой интерференционной картины априорная информация не нужна. Знак изменения набега фазы, то есть направление счета полос, задается направлением сдвига оптических элементов схемы при создании системы этих полос.

## 4.3. Подготовка и обработка галогенидосеребряных эмульсий

Чаще всего для регистрации голограмм применяются галогенидосеребряные светочувствительные эмульсии. Поэтому имеет смысл рассмотреть подробнее именно их. Записать и восстановить голографическую интерферограмму - это еще полдела. Дальше требуется полученную картину расшифровать. А вот чтобы расшифровка принесла ожидаемые результаты, необходимо учесть ряд особенностей, которые сильно влияют на степень достоверности получаемой с голографической интерферограммы информации. Технология получения информации с помощью голографических интерферограмм очень чувствительна к малейшим проявлениям усадки эмульсии, приводящей к искажению записанной интерференционной картины и получению неверных результатов при ее расшифровке. Поэтому приходится принимать специальные меры если не к полному устранению усадки, то хотя бы для сведения ее к минимуму. Для этого сначала стоит хотя бы качественно рассмотреть причины, приводящие к искажениям формы волновых фронтов, восстанавливаемых с голограммы.

- Изготовленные в заводских условиях голографические фотопластинки очень часто имеют не полностью снятые остаточные напряжения внутри эмульсионного слоя, что может исказить результирующую интерференционную картину. Для снятия этих напряжений имеет смысл пластинки каждой партии сначала без нарушения заводской упаковки на несколько (3-5) суток поместить в атмосферу повышенной влажности (85-90%) при комнатной температуре. Затем перенести их в условия нормальной влажности и не трогать до удаления лишней влаги из упаковки.

- Неплохие результаты дает термическая гиперсенсбилизация эмульсий. Так, например, если пластинки ЛОИ-2 выдержать в течение 40 часов при температуре 70°. С последующим естественным остыванием в выключенном термошкафе, то не только на порядок поднимается чувствительность эмульсионного слоя, но и дополнительно происходит его задубливание. Эти свойства эмульсий сохранялись до 6-х

недель при хранении в нормальных условиях. В результате снижается возможность усадки эмульсии и уменьшается вероятность появления неконтролируемых искажений на интерферограммах.

- При химической обработке галогенидосеребряных фотоэмульсий на этапе фиксирования происходит вымывание непрореагировавшего серебра из эмульсионного слоя. Результатом этого опять же является усадка эмульсии. Поэтому операцию фиксирования из процедуры обработки имеет смысл удалить. Для большей сохранности отснятых интерферограмм процесс проявления в этом случае следует останавливать с помощью стоп-ванны.

- Для увеличения дифракционной эффективности голограммы (то есть отношения интенсивности восстановленного изображения к интенсивности восстанавливающего пучка) и повышения контраста интерференционных полос можно реализовать нелинейный режим обработки голограмм. С этой целью режимы съемки и проявления нужно подбирать таким образом, чтобы для достижения заданной плотности не отбеленных голограмм пластинки переэкспонировались и недопроявлялись.

Процедура химической обработки зависит от типа используемых эмульсий. Поэтому конкретные рекомендации дать трудно. Единственное, на что следует обратить особое внимание, это на тщательное соблюдение всех этапов процесса обработки фотопластинок и на использование только одноразовых растворов. Повторное применение отработанных растворов может резко снизить качество голограммы и сделать практически невозможной пересъемку полученной интерферограммы.

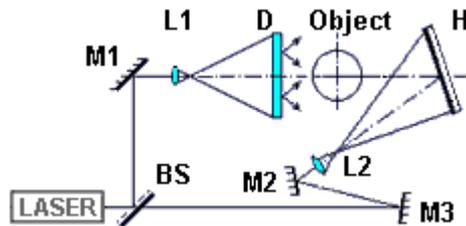
## **4.4. Оптические схемы голографических интерферометров**

Классические интерферометры изготавливались для решения конкретной задачи и почти не подлежали переналадке. В отличие от них голографические интерферометры почти универсальны - одна и та же схема может использоваться для работы с абсолютно разными объектами. Тем не менее, некоторая классификация существует и здесь.

При большом разнообразии вариантов оптических схем голографических интерферометров (ГИ) для фазовых объектов все они сводятся к двум основным: с диффузным и с коллимированным рабочим пучком. Каждая из этих схем имеет свои особенности и применяется в зависимости от поставленной задачи.

### **4.4.1. Голографический интерферометр с диффузным рабочим пучком**

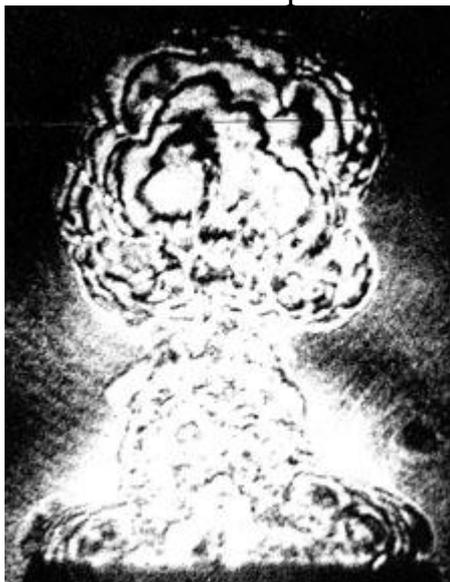
Диффузный рабочий пучок (рис.1а) позволяет наблюдать интерференционную картину на объекте не вооруженным глазом на освещенном фоне. В этом случае в пределах апертуры голограммы можно выделить как бы несколько направлений просвечивания и увидеть соответствующие изменения в интерференционной картине. При этом каждая часть голограммы будет нести информацию о каждой точке объекта и небольшой кусочек пластинки будет восстанавливать весь объект целиком.



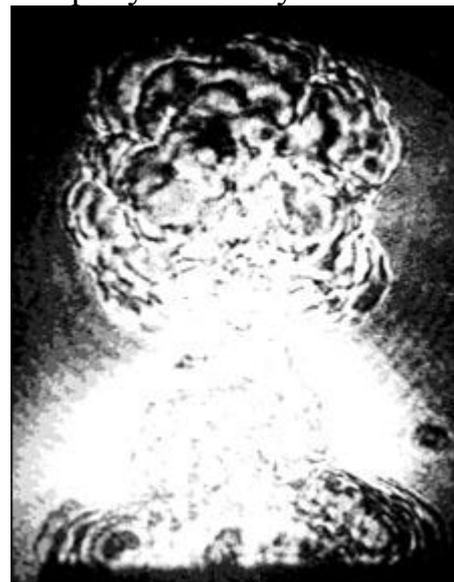
**Рис. 1а.** Голографический интерферометр для фазовых объектов с диффузным рабочим пучком. Здесь BS - светоделитель, M1-M3 - глухие зеркала, L1 и L2 - короткофокусные линзы, D - прозрачный рассеиватель, H - голограмма.

Такая схема одинакова хороша и для симметричных и для не симметричных объектов, поскольку позволяет при пересъемке выделить несколько направлений просвечивания под разными углами. Из-за использования рассеивателя в этом случае на восстановленное изображение накладывается спекл-шум, параметры которого обусловлены не только свойствами лазерного излучения, но и характеристиками рассеивателя, и регулировке не поддается. Кроме того, использование рассеивателя заставляет направлять в рабочий пучок значительно большую, чем в опорный, часть энергии лазерного пучка.

На рис.1b и рис.1с показаны два снимка, сделанных с одной голограммы под разными углами. ГИ был настроен на бесконечно широкую полосу.



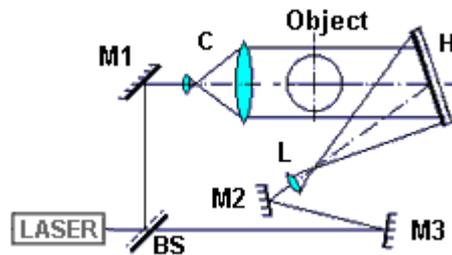
**Рис. 1b.**



**Рис. 1с.**

#### **4.4.2. Голографический интерферометр с коллимированным рабочим пучком**

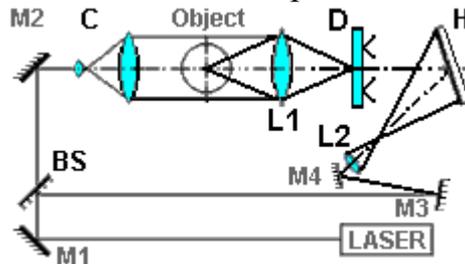
Коллимированный рабочий пучок (рис.2) выделяет четко фиксированное направление, которое изменить уже нельзя. В этом случае не вооруженным глазом изображение наблюдается на фоне яркой светящейся точки. Нормальное изображение можно увидеть только через объектив, например, фотоаппарата.



**Рис. 2.** Голографический интерферометр для фазовых объектов с плоским рабочим пучком. Здесь BS - светоделитель, M1-M3 - глухие зеркала, L - короткофокусная линза, C - коллиматор, H - голограмма.

Размывающий интерференционные полосы спекл-шум при такой схеме съемки значительно меньше, чем при работе с диффузным рабочим пучком. Этот способ съемки удобен для осесимметричных, плоских или однородных по направлению просвечивания объектов. Энергии в рабочем пучке он требует также меньше, чем схема с рис.1а.

Если объединить схемы с рис.1а и рис.2, то можно получить и заданное заранее направление зондирования и удобство наблюдения картины не вооруженным глазом на фоне освещенного рассеивателя. Эта схема приведена на Рис.3а.

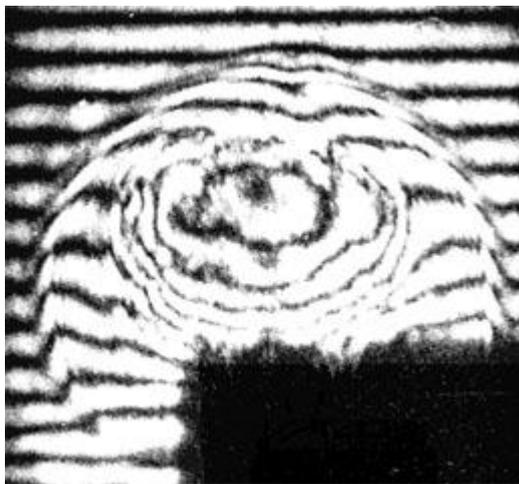


**Рис. 3а.** Голографический интерферометр для фазовых объектов с плоским рабочим пучком и объектом, спроецированным на прозрачный рассеиватель. Здесь BS - светоделитель, M1- M4 - глухие зеркала, D - прозрачный рассеиватель, C - коллиматор, L1 - объектив, L2 - короткофокусная линза, H - голограмма.

Подобная схема регистрации голографических интерферограмм позволяет спроецировать нужное сечение объекта на плоскость рассеивателя. Это улучшает привязку интерференционных полос к объекту и делает более удобной дальнейшую расшифровку полученной картины.

Объектив в схеме с рис.3а можно не использовать, но тогда объект должен располагаться вплотную к рассеивателю.

На рис.3b и рис.3с показаны две интерферограммы однотипных объектов, полученные при разных настройках интерферометра.



**Рис. 3б.** Настройка на бесконечно широкую полосу



**Рис. 3с** Настройка на полосы конечной ширины

Существуют и другие варианты оптических схем для голографической интерферометрии фазовых объектов. Все их модификации определяются спецификой конкретного объекта исследования.

Примечание.

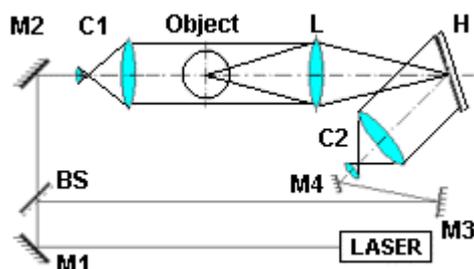
В случае работы с полосами конечной ширины все схемы могут содержать дополнительные оптические элементы, регулирующие настройку системы опорных полос.

#### **4.4.3. Голографический интерферометр сфокусированного изображения**

Несколько в стороне от описанных схем стоят ГИ, построенные по схеме голограмм сфокусированного изображения (ГСИ). Они также могут применяться и с рассеивателями и без оных. Но применение рассеивателя в данном случае не целесообразно.

Дело в том, что интерферограммы, снятые по схеме ГСИ (Рис.4а) удобно восстанавливать в белом свете. Спекл-структура, зависящая только от свойств лазерного излучения и объектива, усредняется. В результате отдельных спеклов не видно и контраст интерференционных полос несколько повышается. Если же использовать рассеиватель, то на уже имеющееся спекл-поле накладывается дополнительное по-

ле, сгенерированное рассеивателем. Ситуация ухудшается, особенно при малых размерах неоднородности.



**Рис. 4а.** Голографический интерферометр для фазовых объектов по схеме голограмм сфокусированного изображения. Здесь BS - светоделитель, M1- M4 - глухие зеркала, C1, C2 - коллиматоры, L - объектив, H - голограмма.

Какой пучок (расходящийся или плоский) использовать в качестве опорного - зависит от требований эксперимента и имеющихся оптических элементов. ГИ по схеме ГСИ позволяют исследовать тонкую структуру интерференционных полос, включая пересъемку через микроскоп. Для примера на рис.4b показана интерферограмма, а на рис.4с - ее увеличенный фрагмент.



**Рис. 4b.**

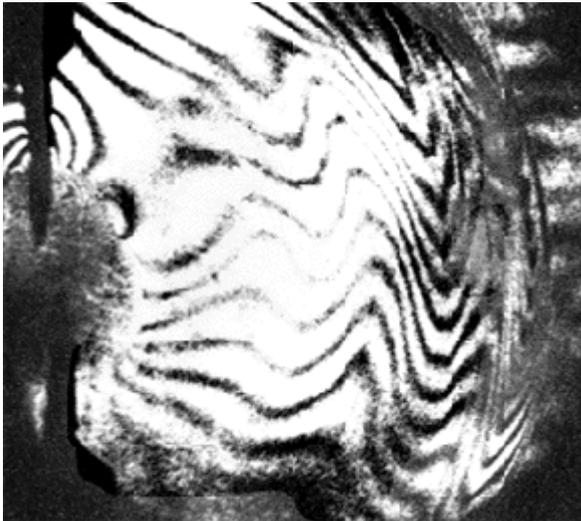


**Рис. 4с.**

Об уникальных свойствах и возможностях голографической интерферометрии уже упоминалось неоднократно. Голографические интерферограммы с рис.4b и рис.5а, 5b наглядно это демонстрируют. Все три интерферограммы, полученные по разным оптическим схемам, зафиксировали возмущения, инициированные электрическим разрядом внутри твердого диэлектрика.



**Рис. 5а.**



**Рис. 5б.**

Классическая интерферометрия в таких случаях абсолютно бессильна.

## ГЛАВА 5. СВОЙСТВА ГОЛОГРАММ.

Через некоторое время после возникновения новой технологии записи изображений, после периода эйфории, вызванного освоением новых возможностей, возникает потребность спокойно осмыслить роль этой технологии в ряду иных изобразительных технологий, ее специфические особенности и недостатки и, наконец, возможность на основе этой технологии нового вида изобразительного искусства.

Вспомним, как трудно приживался цвет в художественной фотографии, или как Микеланджело, несмотря на то, что были изобретены более технологичные масляные краски и почти все художники того времени работали по этой технологии, упорно выполнял свои фрески клеевыми красками, причем лично готовил их. Это иллюстрирует то, что, казалось бы, незначительные, второстепенные свойства изобразительной технологии, иногда становятся определяющими для развития того или иного вида жанра. Примечательный пример - возникновение стиля монохромной живописи в Китае, в качестве протеста против цвета, мешавшего создавать живопись идей, которые в контексте философии Чань-буддизма, тесно связаны с понятием тени (тени вещей). Голограмма в этом контексте лежит как раз на противоположном полюсе, это точная копия светового облика предмета.

Так как объективно голография ближе всего к фотографии, рассмотрим более подробно отличия голографического и фотографического изображений.

### **Первые три отличия с положительным знаком:**

1. Голограмма формирует реальное объемное изображение, в отличие от фотографии и даже от таких подделок под объемность, как стереограммы. Реальность состоит в том, что голограмму можно наблюдать с разных точек, наблюдая части объекта или сцены, которые были скрыты при наблюдении с другой точки зрения. В этом смысле голографическое изображение ведет себя полностью как реальный объект. Особенно хорошо это иллюстрируют голографические изображения прозрачных объектов, например, голограмма линзы полностью сохраняет все свойства реальной линзы, и поэтому через изображение линзы можно просматривать увеличенное изображение расположенных за ней объектов.

2. Динамический диапазон яркостей на голограмме на несколько порядков выше, чем на фотографии. На фотографии (как кстати и в живописи) максимальная яркость - это просто яркость незакрашенного листа бумаги (или яркость белил цинковых). На голографическом изображении такого ограничения нет, так как яркие места формируются за счет света, приходящего со всей поверхности голограммы. Если на бумажном изображении яркость формируется вычитанием из максимальной яркости, то на голограмме - перенаправлением света из темных участков на светлые. Именно этим объясняется удивительная реальность передачи прозрачных предме-

тов, стекла, водяных капель, то есть тех объектов, которые в действительности имеют очень большой динамический диапазон яркости. То, что художникам и фотографам дается с большим трудом, за счет специальных приемов, голограмма отображает автоматически предельно точно.

3. Высокая реальность отображения фактуры поверхности объекта. При любом фотографическом или полиграфическом исполнении изображения невозможно полностью исключить влияние фактуры самого материала или красящего слоя. Даже при качественной офсетной печати присутствует структура поверхности, определяемая технологией, кроме того, из-за наличия зеркального отражения на изображении могут формироваться блики или она окрашивается цветом ближайших предметов. Голографическое изображение в принципе не имеет материального носителя, так как формируется в свободном пространстве. Это определяет до удивления точную передачу фактуры поверхности любого материала.

### **Следующие отличия отрицательные:**

4. Невозможна съемка пейзажей, архитектурных ансамблей. Не отображаются на голограмме самосветящиеся объекты (свеча). Это следует из самой технологии голографии - все снимаемые объекты должны быть освещены светом когерентного источника, и только этот свет источника фиксируется на голограмме.

5. Серьезные ограничения по масштабированию изображений. Снимать большой объект на голограмму небольшого формата бессмысленно - это все равно, что рассматривать комнату через замочную скважину. Обычно размеры голограммы должны превышать размеры объекта.

6. Сложность процесса съемки, высокая стоимость аппаратуры и самой голограммы.

7. Ограничения на условия наблюдения. В отличие от фотографий и картин, для наблюдения голограмм необходим точечный источник света, и кроме того, ограничен диапазон углов зрения, под которыми голограмма наблюдается с хорошим качеством. При существенном изменении угла от оптимального падает яркость и возникает размытие изображения.

Все эти пункты почти окончательно ограничивают перечень жанров голографии следующим списком: портрет, натюрморт, съемка мелких животных, голограммы художественных изделий, цветы, травы, минералы. Конечно, изобразительные особенности голограмм могут привести к возникновению новых, специфических именно для голографии художественных направлений. Для обсуждения этих новых возможностей перечислим дополнительно ряд отличий, которые нельзя отнести к достоинствам или недостаткам.

### **Возможности голографии:**

1. На одну голограмму может быть записано несколько изображений, которые разнесены по углу наблюдения и, следовательно, будут появляться при пере-

мещении относительно голограммы по очереди. Это уже используется при съемке групповых портретов (вся семья на одной голограмме).

2. На голограмму, как впрочем, и на фотографию, может быть наложено несколько изображений, но если на фотографии все они сливаются в одной плоскости, то в голограмме они могут быть отделены в пространстве. Эта технология уже использовалась в опытах по художественной голографии, когда перед объектом размещали завесу из водяных брызг.

3. Так как средствами оптических трансформаций можно выполнять конформные преобразования изображений объектов, то можно предположить, что возникнут возможности записи объектов с такими трансформациями. Это можно делать и в обычной фотографии, но при переносе в трехмерную среду возможности приобретут качественно иной уровень.

## Заключение

Голография - одно из замечательных достижений современной науки и техники. Голограммы обладают уникальным свойством - восстанавливать полноценное объемное изображение реальных предметов. Название происходит от греческих слов *holos* - полный и *grapho* - пишу, что означает полную запись изображения.

В настоящее время голографическая интерферометрия уже стала неотъемлемым и надежным инструментом не только в научных исследованиях. Уникальные возможности этого метода используются для контроля качества изделий в турбиностроении, при производстве автомобильных шин, при проектировании плотин и несущих конструкций мостов и зданий, для корректировки процесса роста кристаллов и во многих других случаях. Благодаря уникальным возможностям метода стал доступен для оптических измерений и широкий класс диффузно отражающих объектов. Область применения голографической интерферометрии постоянно расширяется. На основе заложенных в ней принципов получил развитие новый измерительный метод - спекл-интерферометрия. Появляются новые регистрирующие среды, мощные и в то же время миниатюрные лазеры. Для голографической интерферометрии находятся новые сферы применения. Прогресс продолжается, и последнее слово в этой области еще не сказано. Все еще впереди.

Голография, представляющая собой фотографический процесс в широком смысле этого слова, принципиально отличается от обычной фотографии тем, что в светочувствительном материале происходит регистрация не только интенсивности, но и фазы световых волн, рассеянных объектом и несущих полную информацию о его трехмерной структуре. Как средство отображения реальной действительности, голограмма обладает уникальным свойством: в отличие от фотографии, создающей плоское изображение, голографическое изображение может воспроизводить точную трехмерную копию оригинального объекта. Такое изображение со множеством ракурсов, изменяющихся с изменением точки наблюдения, обладает удивительной реалистичностью и зачастую неотличимо от реального объекта.

Современные голограммы наблюдаются при освещении обычными источниками света, и полноценная объемность в комбинации с высокой точностью передачи фактуры поверхностей обеспечивает полный эффект присутствия.

Голография применяется для хранения и обработки информации. Информация об объекте, записанная в виде интерференционной структуры, однородно распределена на большой площади. Это обуславливает высокую плотность записи информации и ее большую надежность. Обработка записанного на голограмме массива информации световым пучком происходит одновременно по всей голограмме (с огромной скоростью).

С помощью голографических устройств осуществляются различные волновые преобразования, в том числе обращение волнового фронта с целью исключения аберраций.

Записывая голограммы в средах со специфическими свойствами, можно воспроизводить состояние поляризации предметной волны и даже ее изменение во времени.

Голограмма может быть изготовлена не только оптическим методом, но и рассчитана на ЭВМ (цифровая голограмма). Машинные голограммы используются для получения объемных изображений не существующих еще объектов. Машинные голограммы сложных оптических поверхностей служат эталонами для интерференционного контроля поверхностей изделий.

Голограммы незаменимы при изготовлении высококачественных репродукций произведений скульптуры, музейных экспонатов и т.д. В то же время, возможность создания объемных изображений открывает новые направления в искусстве - изобразительную голографию и оптический дизайн. Голограммы широко используются в сувенирной продукции и в качестве украшений, а также в рекламе.

## Список использованной литературы:

1. М.Уиньон. Знакомство с голографией. / Под редакцией доктора физ.мат. наук А.И.Лоркина, М., «Мир», 1980.
2. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л.. Оптическая голография, перевод с англ. / Под редакцией Ю.И.Островского, М., «Мир», 1973.
3. Островский Ю.И. Голография и ее применение, Л.,1973.
4. Уинстон Е. Хок. Лазеры и голография. / Под редакцией Я.А.Смородинского, М., «Мир», 1973.
5. Струок Дж. Введение в когерентную оптику и голографию, перевод с англ., М., «Мир», 1967.
6. Демидов В.Е. Пойманное пространство, М., «Знание», 1982.
7. Физическая энциклопедия. М.: Сов. энциклопедия, 1990. Т. 1.
8. Фролов В.С. Волшебное зеркало. М.: Знание, 1979.
9. Тимофеев Ю.П., Фридман С.А., Фок Н.В. Преобразование света. М.: Наука, 1985. 173 с.
10. Тарасов Л.В. Знакомьтесь - лазеры.М.: Радио и связь, 1988. 192 с. (Науч.-попул. б-ка школьника).
11. Беспалов В.И., Пасманик Г.А. Нелинейная оптика: адаптивные лазерные системы. М.: Наука, 1980. 130 с.
12. Тарасов Л.В. Лазеры: Действительность и надежды. М.: Наука, 1985. (Б-чка "Квант"; Вып. 42).
13. Карпов С.В., Попов А.К., Слабко В.В., Шевнина Г.Б. Динамика фотохромных реакций фрактальных кластеров серебра // Коллоид. журн. 1965. Т. 57, N 2.
14. [www.holography.ru/holoflash.htm](http://www.holography.ru/holoflash.htm)
15. [www.holography.ru/artrus.htm](http://www.holography.ru/artrus.htm)
16. [www.holography.ru/holorus.htm](http://www.holography.ru/holorus.htm)
17. [www.holography.ru/files/holmich.htm](http://www.holography.ru/files/holmich.htm)
18. [www.holography.ru/files/holpt.htm](http://www.holography.ru/files/holpt.htm)
19. [www.holography.ru/physrus.htm](http://www.holography.ru/physrus.htm)
20. [www.holography.ru/phys2rus.htm](http://www.holography.ru/phys2rus.htm)
21. [www.holography.ru/phys3rus.htm](http://www.holography.ru/phys3rus.htm)
22. [www.holography.ru/phys4rus.htm](http://www.holography.ru/phys4rus.htm)
23. <http://phys.web.ru/db/msg/1157037/page3.html>
24. <http://phys.web.ru/db/msg/1181671/liter.html>
25. [www.phys.web.ru/db/msg/1171445/page1.html](http://www.phys.web.ru/db/msg/1171445/page1.html)
26. [www.phys.web.ru/db/msg/1171445/page2.html](http://www.phys.web.ru/db/msg/1171445/page2.html)
27. [www.phys.web.ru/db/msg/1171445/page3.html](http://www.phys.web.ru/db/msg/1171445/page3.html)
28. [www.phys.web.ru/db/msg/1171445/page4.html](http://www.phys.web.ru/db/msg/1171445/page4.html)
29. [http://optics.phys.spbu.ru/~Arkhipov/test/exp1\\_biprism/theory/theory1.htm](http://optics.phys.spbu.ru/~Arkhipov/test/exp1_biprism/theory/theory1.htm)