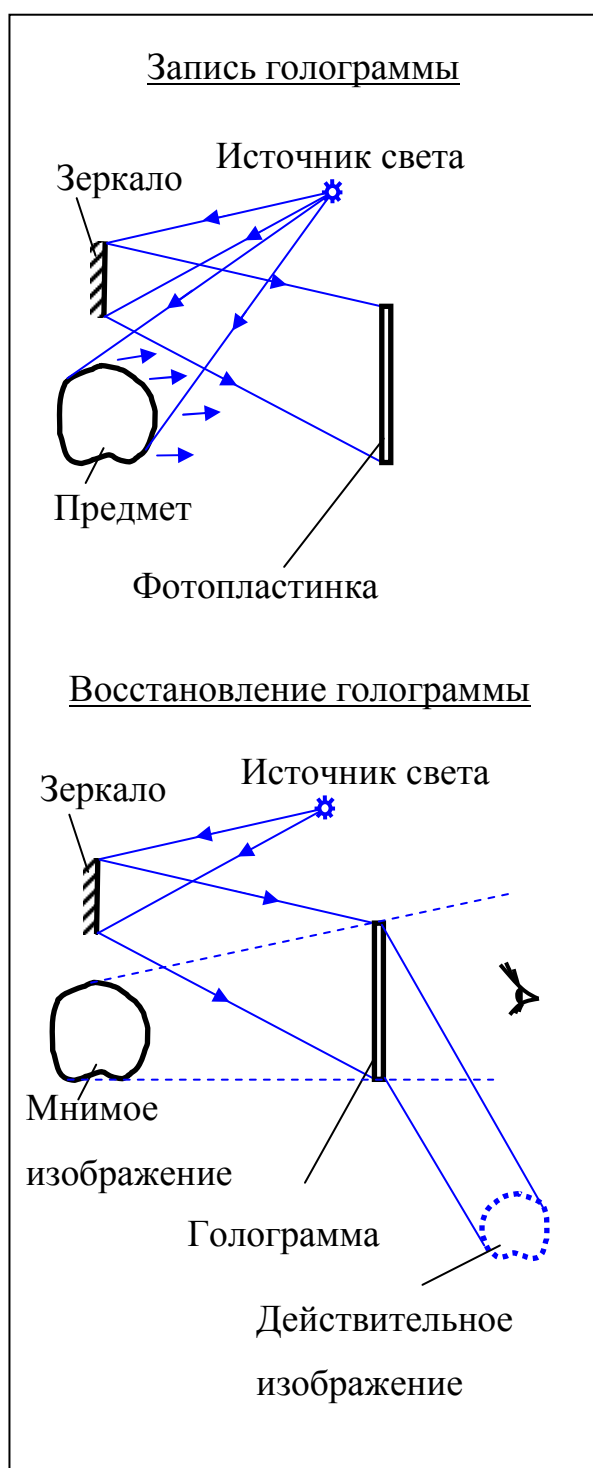


## Лекция 24. Голография.

*Опорная и предметная световые волны. Запись и воспроизведение голограмм. Применение голографии.*



*Голография* (от греч. *holos* - весь, полный и *grapho* - пишу), способ записи и восстановления волнового поля, основанный на регистрации интерференционной картины, которая образована волной, отражённой предметом, освещаемым источником света (*предметная волна*), и когерентной с ней волной, идущей непосредственно от источника света (*опорная волна*). Зарегистрированная интерференционная картина называется *голограммой*. Голограмма, освещённая опорной волной, создаёт такое же амплитудно-фазовое пространственное распределение волнового поля, которое создавала при записи предметная волна. Таким образом, в соответствии с принципом Гюйгенса - Френеля, голограмма преобразует опорную волну в копию предметной волны.

Основы голографии были заложены в 1948 физиком Денисом Габором (Великобритания). Однако отсутствие мощных источников когерентного света не позволило ему получить качественные голографические изображения. Второе рождение голо-

графия пережила в 1962 – 63 гг., когда американские физики Э. Лейт и Ю. Упатниекс применили в качестве источника света лазер и разработали схему с наклонным опорным пучком, а Ю. Н. Денисюк осуществил запись голограммы в трёх-

мерной среде, объединив, таким образом, идею Габора с цветной фотографией Липмана. К 1965 – 66 гг. были созданы теоретические и экспериментальные основы голографии. В последующие годы развитие голографии идёт главным образом по пути совершенствования её применений.

*Принцип голографии.* Обычно для получения изображения какого-либо объекта фотографическим методом пользуются фотоаппаратом, который фиксирует на фотопластинке излучение, рассеиваемое объектом. Каждая точка объекта в этом случае является центром рассеяния падающего света; она посылает в пространство расходящуюся сферическую световую волну, которая фокусируется с помощью объектива в небольшое пятнышко на светочувствительной поверхности фотопластинки. Так как отражательная способность объекта меняется от точки к точке, то интенсивность света, падающего на соответствующие участки фотопластинки, оказывается различной. Поэтому на фотопластинке возникает изображение объекта. Это изображение складывается из получающихся на каждом участке светочувствительной поверхности изображений соответствующих точек объекта. При этом трёхмерные объекты регистрируются в виде плоских двумерных изображений.

В процессе фотографирования на фотопластинке фиксируется лишь распределение интенсивности, то есть амплитуды электромагнитной волны, отражённой от объекта (интенсивность пропорциональна квадрату амплитуды). Однако световая волна при отражении от объекта изменяет не только амплитуду, но и фазу в соответствии со свойствами поверхности объекта в данной точке.

Голография позволяет получить более полную информацию об объекте, так как представляет собой процесс регистрации на фотопластинке не только амплитуд, но и фаз световых волн, рассеянных объектом. Для этого на фотопластинку одновременно с волной, рассеянной объектом (предметная волна), необходимо направить вспомогательную волну, идущую от того же источника света (лазера), с фиксированной амплитудой и фазой (опорная волна).

Интерференционная картина (чередование тёмных и светлых полос или пятен), возникающая в результате взаимодействия сигнальной и опорной волн, со-

держит полную информацию об амплитуде и фазе предметной волны, то есть об объекте. Зафиксированная на светочувствительной поверхности интерференционная картина после проявления называется *голограммой*. Если рассматривать голограмму в микроскоп, то в простейшем случае видна система чередующихся светлых и тёмных полос. Интерференционный узор реальных объектов весьма сложен.

Для того чтобы увидеть изображение предмета, голограмму необходимо просветить той же опорной волной, которая использовалась при её получении. В простейшем случае - интерференции двух плоских волн (двух параллельных пучков) - голограмма представляет собой обычную дифракционную решётку. Плоская волна, падая на такую голограмму, частично проходит сквозь неё, сохраняя прежнее направление, а частично вследствие дифракции преобразуется в две вторичные плоские волны, распространяющиеся под углом  $\theta$ , который связан с шагом решётки  $d$  и длиной световой волны  $\lambda$  формулой:  $d \sin \theta = \pm \lambda$

Одна из волн ничем не отличается от волны, идущей от объекта при непосредственном его наблюдении. Таким образом, при просвечивании голограммы восстанавливается та же самая волна, которая исходила от объекта. В результате этого наблюдатель, смотрящий сквозь голограмму, увидит мнимое изображение объекта в том месте, где объект находился при съёмке. Другая волна также содержит информацию об объекте и образует его действительное изображение.

В *схеме Габора* источник опорной волны и объект располагались на оси голограммы (осевая схема). При этом все три волны распространялись за голограммой в одном и том же направлении, создавая взаимные помехи. В *схеме Лейта и Упатниекса* такие помехи были устранены наклоном опорной волны (*неосевая схема*).

Голографическое изображение является объёмным, причём зрительное восприятие этого изображения ничем не отличается от восприятия исходного объекта. Фотографируя мнимое изображение, можно, в зависимости от места расположения фотоаппарата и его фокусировки, зафиксировать все особенности на сним-

ках. Экспериментально такие голограммы впервые получили американские физики Э. Лэйтс и Ю. Упатниекс в 1962.

Действительное изображение также трёхмерно и обладает всеми упомянутыми свойствами; оно как бы висит перед голограммой, но наблюдать его несколько труднее.

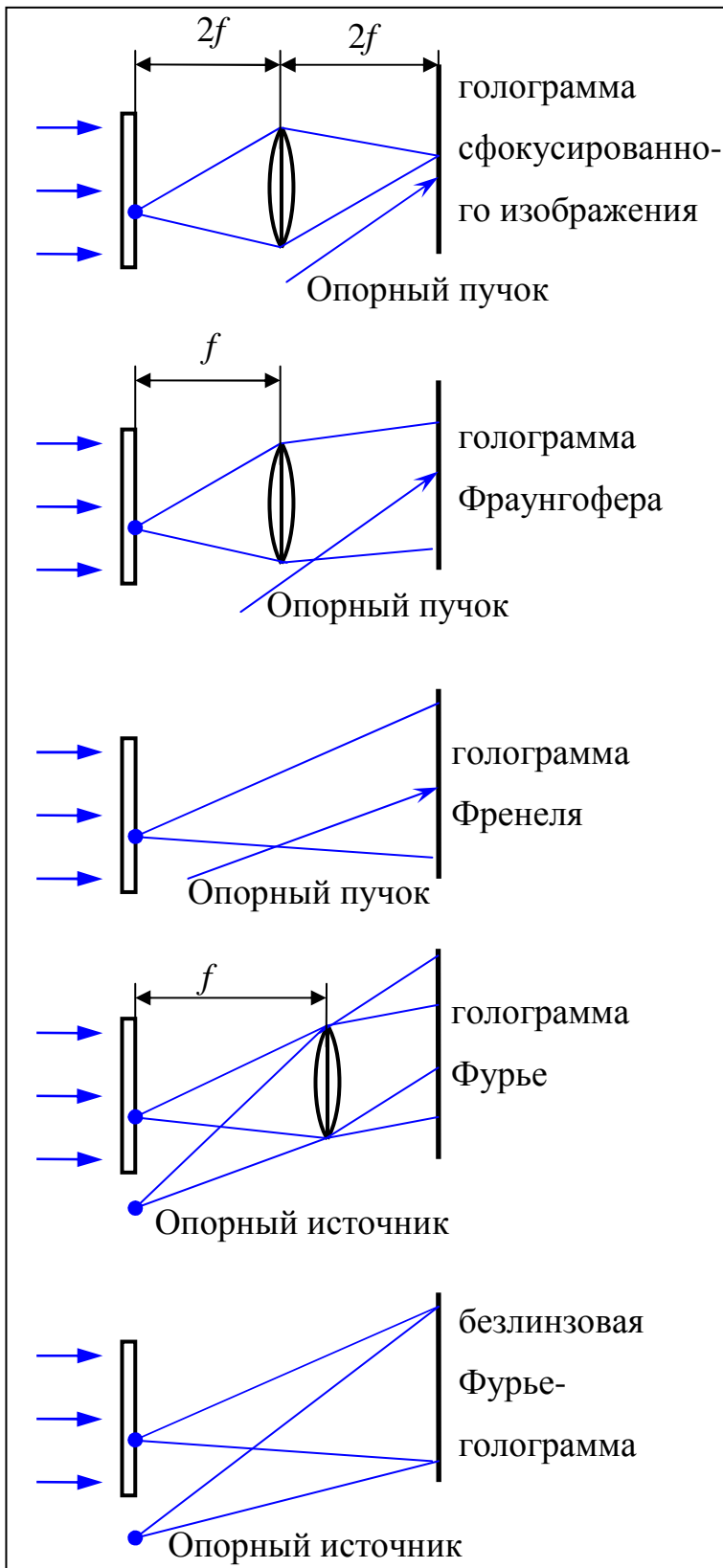
Интерференционная структура может быть зарегистрирована светочувствительным материалом одним из следующих способов:

в виде вариаций коэффициента пропускания света или его отражения. Такие голограммы при восстановлении волнового фронта модулируют амплитуду освещающей волны и называются *амплитудными*.

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 остаётся только фазовая модуляция.

#### 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 неё, то амплитудно-фазовое распределение на голограмме будет тем же, что и в плоскости предмета (голограмма сфокусированного изображения,  $f$  – фокусное расстояние линзы).



Когда предмет находится достаточно далеко от пластинки, либо в фокусе линзы, то каждая точка предмета посылает на пластинку параллельный световой пучок. Голограмма в этом случае называется *голограммой Фраунгофера*. 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 голограммы 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 пла-

стинкой голограммы Френеля переходят в голограммы Фраунгофера, а с уменьшением этого расстояния - в голограммы сфокусированного изображения.

При встрече опорной и предметной волн в пространстве образуется система стоячих волн, максимумы которых соответствуют зонам, в которых интерфери-

рующие волны находятся в одной фазе, а минимумы - в противофазе. В схеме Габора опорный источник и предмет расположены на оси голограммы. Осевые голограммы называют также *однолучевыми*, т. к. 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 (*двулучевая голограмма*). Для двулучевых голограмм требуются фотоматериалы с более высоким пространственным разрешением. Интерференционные максимумы располагаются вдоль поверхности материала в его толщине. 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 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 между соседними элементами структуры, то голограммы называют *плоскими*.

### Голограмма Денисюка

В пятидесятых годах двадцатого века советский физик Ю.Н. Денисюк разработал метод регистрации голографических изображений во встречных пучках. В основе метода лежит то обстоятельство, что интерференционное поле в области перекрытия опорной и предметной волн распределено во всем пространстве пересечения. Используя подходящие светочувствительные материалы, трехмерную интерференционную картину возможно зарегистрировать. Для этого используют стеклянные фотопластины, политые слоем желатины, в котором распределены микрокристаллы галогенидов серебра. Эти фотопластинки должны обладать полной прозрачностью до проявления. Толщина желатинового слоя порядка 10 мкм достаточна, чтобы регистрировать объемную интерференционную картину, поскольку эта величина много больше, чем длина волны света, порядка 0.5 мкм.

Фотопластинку располагают в оптической схеме таким образом, что с одной стороны ее освещает равномерное поле лазерного света, которое играет роль опорной волны, а с другой свет от того же лазера, отраженный от объекта, голограмму которого необходимо получить. Так как желатин прозрачен для света, в толщине его слоя происходит интерференция этих световых полей, в результате которой происходит формирование интерференционной картины. Интерференционное поле представляет собой сложную структуру, проявляющуюся в виде чередования светлых и темных полос. После проявления и закрепления фотопластины, внутри желатинового слоя оказываются микрообласти с различными показателями преломления и поглощения. При просвечивании голограммы в отраженном свете восстанавливается изображение объекта. Важное для практического применения свойство голограмм Денисюка заключается в возможности восстановления голограммы с помощью расходящегося пучка белого света. Это объясняется тем, что при освещении голограммы условия дифракции выполняются только для тех длин волн и тех направлений распространения света, которые удовлетворяют условиям дифракции. Весь остальной свет проходит сквозь голограмму, не взаимодействуя с ней. Поэтому голограмма видна в том цвете, в котором она была записана. Возможно также получение цветных голографических изображений. Для этого в фотопластинке нужно зарегистрировать три элементарных голограммы при длинах волн синего, зеленого и красного света. При восстановлении голограммы белым светом каждая из элементарных голограмм формирует свое изображение в соответствующем цвете. Эти три изображения образуют полноцветную картину, подобно тому, как это происходит на экране цветного телевизора.

Зарегистрированная на фотопластинке интерференционная структура обычно сохраняется долго, т. е. процесс записи отделён 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 осве-

щённость. 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 ими 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 волн фронта.

### Свойства голограмм.

Основное свойство голограммы, отличающее её от фотографического снимка, состоит в том, что на снимке регистрируется лишь распределение амплитуды падающей на неё предметной световой волны, в то время как на голограмме, кроме того, регистрируется и распределение фазы предметной волны относительно фазы опорной волны. Информация об амплитуде предметной волны записана на голограмме в виде контраста интерференционного рельефа, а информация о фазе - в виде формы и частоты интерференционных полос. В результате голограмма при освещении опорной волной восстанавливает копию предметной волны.

В тех случаях, когда при записи голограммы свет от каждой точки объекта попадает на всю поверхность голограммы, каждый малый участок последней способен восстановить всё изображение объекта. Однако меньший участок голограммы восстановит меньший участок волнового фронта, несущего информацию об объекте. Если этот участок будет очень мал, то качество восстановленного изображения ухудшается. В случае голограмм сфокусированного изображения каждая точка объекта посылает свет на соответствующий ей малый участок голограммы. Поэтому фрагмент такой голограммы восстанавливает лишь соответствующий ему участок объекта.

Полный интервал яркостей, передаваемый фотографической пластинкой, как правило, не превышает одного-двух порядков, между тем реальные объекты часто имеют гораздо большие перепады яркостей. В голограмме, обладающей фо-



кусирующими свойствами, используется для построения наиболее ярких участков изображения весь свет, падающий на всю её поверхность, и она способна передать градации яркости до пяти-шести порядков.

Если при восстановлении волнового фронта освещать голограмму опорным источником, расположенным относительно голограммы так же, как и при её экспонировании, то восстановленное мнимое изображение совпадает по форме и положению с самим предметом. При изменении положения восстанавливающего источника, при изменении его длины волны  $\lambda$  или ориентации голограммы и её размера соответствие нарушается. Как правило, такие изменения сопровождаются абберациями восстановленного изображения.

Яркость восстановленного изображения определяется дифракционной эффективностью, равной отношению светового потока в восстановленной волне к световому потоку, падающему на голограмму при восстановлении. Она определяется типом голограммы, условиями её записи, а также свойствами регистрирующего материала.

Источники света в голографии должны создавать когерентное излучение достаточно большой яркости. Временная когерентность определяет максимальную разность хода  $\Delta L$  между предметным и опорным пучками, допустимую без уменьшения контраста интерференционной структуры. Эта величина определяется шириной спектральной линии  $\Delta\lambda$  излучения (степенью монохроматичности)  $\frac{\lambda}{\Delta\lambda}$ . Пространственная когерентность излучения определяет способность создавать контрастную интерференционную картину световыми волнами, испущенными источником в разных направлениях. Для теплового источника она зависит от его размеров.

Лазерное излучение обладает высокой пространственной и временной когерентностью при огромной мощности излучения. Для голограмм стационарных объектов обычно используются лазеры непрерывного излучения, генерирующие в одной поперечной моде, в частности гелий-неоновый лазер ( $\lambda=632,8$  нм) и аргон-

новый ( $\lambda=488,0$  нм, 514,5 нм). Для получения голограмм быстропротекающих процессов обычно применяют импульсные рубиновые лазеры ( $\lambda=694,3$  нм).

### Применения.

Записанные на голограмме световые волны при их восстановлении создают полную иллюзию существования объекта, неотличимого от оригинала. В пределах телесного угла, охватываемого голограммой, изображение объекта можно осматривать с разных направлений, т. е. оно является трёхмерным. Эти свойства голограмм используются в лекционных демонстрациях, при создании объёмных копий произведений искусства, голографических портретов (изобразительная голограмма). Трёхмерные свойства голографических изображений используются для исследования движущихся частиц, капель дождя или тумана, треков ядерных частиц в пузырьковых камерах и искровых камерах. При этом голограмму создают с помощью импульсного лазера, а изображения восстанавливают в непрерывном излучении.

Объёмность изображения делает перспективным создание голографического кино и телевидения. Главная трудность - создание огромных голограмм, через которые как через окно одновременно могло бы наблюдать изображение большое число зрителей. Эти голограммы должны быть динамическими, т. е. меняться во времени в соответствии с изменениями, происходящими с объектом. Голографическое телевидение также встретилось с трудностями создания динамических сред в передающей и приёмной частях телевизионной системы. Другая трудность состоит в недостаточно большой полосе пропускания телевизионного канала, которую необходимо увеличить на несколько порядков для передачи трёхмерных движущихся сцен. С помощью голограммы решается проблема визуализации акустических полей и электромагнитных полей в радиодиапазоне. Если поместить голограмму на то место, где она экспонировалась, и осветить опорным пучком, то восстановится волна, рассеивавшаяся объектом во время экспозиции. Если же объект не убирать, то можно одновременно наблюдать две волны: непосредственно идущую от объекта и восстановленную голограммой. Эти волны когерентны и

могут интерферировать. Если с объектом происходят какие-либо изменения, ведущие к фазовым искажениям рассеянной им волны (например, деформация или изменение коэффициента преломления), то это скажется на виде наблюдаемой картины. Появятся интерференционные полосы, форма которых однозначно связана с изменениями. На этом основана голографическая интерферометрия, где, как и в обычной интерферометрии, происходит сравнение нескольких волн. Наблюдаемая интерференционная картина указывает на различие форм сравниваемых волн, однако в обычной интерферометрии они формируются одновременно или с очень небольшой временной задержкой, максимальная величина которой определяется временем когерентности ( $10^{-4}$  -  $10^{-5}$  с). Голограмма же позволяет зафиксировать световую волну и восстановить её копию в любой момент времени. Поэтому голографическая интерферометрия не связана с требованием одновременности формирования волн. Эта же особенность снизила требования к качеству оптических деталей, т. к. обе интерферирующие волны, проходя по одному и тому же каналу, одинаково искажаются погрешностями оптики.

С помощью голограммы можно восстановить интерференционные картины световых волн, рассеянных объектом в разных направлениях. Это позволяет изучать пространственные неоднородности показателя преломления.

Одним из первых применений голографической интерферометрии было исследование механических деформаций. На одной и той же фотопластинке в различные моменты времени записываются две голограммы исследуемого объекта. При восстановлении обе волны, несущие информацию об объекте, накладываются друг на друга. Если за время между экспозициями с объектом произошли какие-либо изменения, то на восстановленном изображении появляется система интерференционных полос. Расшифровывая полученную интерференционную картину, можно определить происшедшие изменения. Этот метод позволяет измерять очень небольшие (порядка долей мкм) деформации объектов со сложной формой поверхности, обусловленные вибрацией, нагреванием и т. п. Его можно использовать также для неразрушающего контроля изделий, для исследования взрывов,

ударных волн, для изучения потоков газа в сверхзвуковом сопле, для исследования плазмы и т. д.

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 её большую надёжность. Обработка записанного на голограмме массива информации световым пучком происходит одновременно по всей голограмме (с огромной скоростью).

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

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