

## Простая голографическая установка

### Введение

Оптическая голография — это способ регистрации и воспроизведения амплитуды и фазы волны, идущей от объекта, основанный на свойствах интерференционного поля, образованного этой объектной волной и вспомогательной опорной волной. Запись интерференционного поля обычно производят фотографическим способом и полученную фотографию называют голограммой. На самой голограмме изображение объекта отсутствует; она обычно выглядит как равномерно засвеченный негатив. Однако, под микроскопом можно увидеть периодическую структуру из чередующихся темных и светлых полос и пятен, соответствующих сфотографированной интерференционной картине.

При воспроизведении изображения объекта голограмму ставят на то место, где она находилась при съемке, объект убирают и голограмму освещают опорным пучком. Падающий пучок испытывает дифракцию на квазипериодической структуре голограммы и создает в пространстве, там, где находился объект при съемке, световое поле, точно воспроизводящее объект.

Принцип голографии проще всего можно понять на примере голограммы точки. Точка рассеивает падающий на нее параллельный световой пучок и создает сферическую волну, которая интерферирует с нерассеянной частью падающего пучка. Интерференционная картина в плоскости, перпендикулярной к оси падающего пучка, представляет собой систему концентрических светлых и темных колец. Такая картина, записанная на фотопластинке, представляет собой зонную решетку Френеля и является голограммой точки. Если эту голограмму осветить тем же параллельным световым пучком, то вследствие дифракции он соберется в точку, т.е. даст ее изображение. Голограмму любого сложного объекта можно представить как волновое наложение зонных интерференционных картин, создаваемых всеми его точками. Таким образом, полное восстановление объемного изображения с помощью голограммы связано с тем, что, в отличие от обычной фотографии, в голограмме записывается информация не только об интенсивности, но и о фазе предметной волны.

Очевидно, что для реализации голографического метода необходимы интенсивные когерентные световые пучки. Источниками таких пучков являются лазеры.

Для получения высококачественных голограмм требуется надежно регистрировать интерференционные поля, создаваемые рассеянным от объекта светом под большими углами к опорному пучку. Расстояние  $d$  между интерференционными максимумами (или минимумами) в плоскости, помещенной в волновое поле, может быть  $\sim \lambda_0/2$  при больших углах падения  $\varphi_1, \varphi_2$  интерферирующих лучей на эту плоскость даже при интерференции в воздухе, когда  $n^* = 1$ . Чтобы столь мелкая интерференционная картина могла быть сфотографирована и не размылась за время экспозиции, необходимо: применять фотографические материалы с предельно высокой разрешающей способностью (до  $5000 \text{ лин}\cdot\text{мм}^{-1}$ ); размер голограммы должен быть большим для регистрации

широкоугольной интерференции; голографическая установка должна обладать высокой виброустойчивостью. Поэтому, для получения высококачественных голограмм требуется довольно сложная и дорогостоящая техника.

Для экспериментального изучения голографии в учебном процессе можно использовать простейшие голографические установки [1, 2]. Эти установки позволяют легко получать голограммы в проходящем свете для небольших плоских предметов-транспарантов. Такие голограммы имеют небольшие размеры и позволяют предельно простыми средствами изучить все важнейшие особенности голографии.

### Описание голографической установки

Наш многолетний опыт показал, что очень надежной и эффективной для учебных целей является простая голографическая установка, предложенная Хендфордом [1], и мы даем подробное описание такой установки с учетом нашего опыта по ее использованию.

Схема установки показана на рис. 1. Мы используем одномодовый He-Ne лазер 1, излучающий на длине волны  $\lambda = 633$  нм непрерывный пучок с мощностью 5–10 мВт. Узкий лазерный пучок преобразуется с помощью микроскопического объектива 2 с увеличением  $20\times$  и после фокуса объектива в виде расходящегося пучка попадает на светоделительную стеклянную пластину 3. Часть пучка проходит через пластину, а другая, отраженная от передней поверхности пластины, идет на алюминиевое зеркало 4. Прямой пучок после светоделителя падает на рассеивающую стеклянную пластинку 5, освещает через нее, прижатый вплотную к пластинке предмет-транспарант 6, и идет дальше как предметный пучок. Свет, отраженный зеркалом 4, дает опорный пучок, который направляется зеркалом на пересечение с предметным пучком. В области пересечения пучков локализована интерференционная картина. Эту интерференционную картину можно увидеть с помощью микроскопа 7 при расположении его объектива в области пересечения пучков. Для наблюдений достаточно увеличение микроскопа  $100\times$ – $200\times$ . В этом же месте располагается затем фотопленка 8, на которую снимается голограмма.

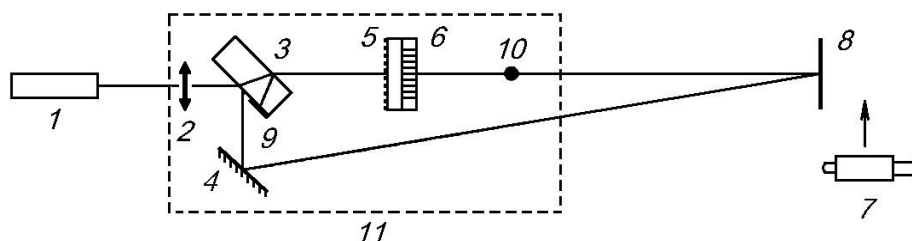


Рис. 1. Схема голографической установки [1].

Элементы схемы 2–10 устанавливаются и жестко закрепляются на небольшом прочном столике 11 с размерами 25х6х2 см. Светоделительная пластинка 3 расположена на расстоянии 5 см от входной линзы объектива 2. Расстояние между пластиной 3 и зеркалом 4 равно 2 см. Узлы крепления пластины и зеркала предусматривают возможность их поворотов и небольших наклонов для юстировки. Сложенные вместе рассеивающее стекло 5 и предмет-транспарант 6 установлены на расстоянии 15 см от пластины 3. После

транспаранта на расстоянии примерно 3–4 см расположен тонкий вертикальный штырек 10, выполняющий роль дополнительного предмета.

Лазер и столик с элементами схемы закрепляются на оптической скамье, установленной на прочном лабораторном столе. Расстояние от выходного окна лазера до входной линзы объектива 2 равно примерно 10 см. Длина оптической скамьи должна быть такой, чтобы после голографического столика на расстоянии примерно 50 см можно было размещать поочередно белый экран, горизонтальный микроскоп, камеру с фотопленкой.

Светоделительная пластина должна быть изготовлена из стекла с толщиной примерно 5–6 мм. Большая толщина необходима для разведения пучков, отраженных от передней и задней поверхности. Пучок, отраженный от задней поверхности, задерживается непрозрачным экраном 9. Этот экран проще всего изготавливается из черной бумаги, которая приклеивается к передней грани. Указанный пучок перекрывается для того, чтобы он не примешивался к опорному и не создавал интерференционного шума на голограмме. Площадь светоделительной пластины составляет примерно 3,5x1,5 см. Зеркало 4 изготавливается путем вакуумного напыления непрозрачной пленки Al на плоскопараллельную стеклянную подложку с размерами 4x2x0,15 см.

Светорассеиватель 5 представляет собой стеклянную пластинку с одной шероховатой поверхностью. Степень шероховатости должна быть такой, чтобы на голограмме отсутствовало теневое изображение транспаранта. При этом свет от всех точек транспаранта будет освещать всю поверхность голограммы и интерференционная картина на любом участке будет создаваться сложением волн от всех точек с опорным пучком. В то же время, интенсивность пучка после транспаранта должна быть достаточно большой, сравнимой с интенсивностью опорного пучка, так что рассеяние света не должно быть слишком сильным. Соотношение интенсивностей предметного и опорного пучков определяет контрастность интерференционной картины. Поэтому, если лазерный пучок линейно поляризован, то направление поляризации желательно ориентировать параллельно плоскости падения пучка на светоделительную пластину 3. Тогда в направлении предмета пройдет пучок с большей интенсивностью, чем к зеркалу 4. При этом частично компенсируются потери интенсивности, связанные с рассеянием света, падающего на транспарант.

Транспарант должен иметь размер, не превышающий эффективный диаметр расходящегося гауссового пучка в месте расположения транспаранта. Мы использовали черно-белую фотографию рисунка, полученную на фотопленке и имеющую размеры 1,5x1,5 см. Такой транспарант прижимался с помощью стеклянной пластинки к гладкой поверхности светорассеивателя 5. При использовании транспаранта теряется важнейшее свойство голограммы — способность воспроизводить объем предметов. Чтобы устранить этот недостаток, кроме транспаранта в предметный пучок помещается тонкий штырек 10, который выполняет роль второго предмета. Штырек был изготовлен из проволоки диаметром примерно 0,5 мм и длиной 2–2,5 см. Штырек вместе с транспарантом образует объемную сцену из двух предметов. Пространственное разделение этих

предметов затем воспроизводится голограммой.

### Выполнение экспериментов

Схема настраивается так, чтобы предметный и опорный пучки пересекались на расстоянии примерно 30–50 см от места расположения транспаранта. Эта операция выполняется без светорассеивателя 5 и предметов 6, 10 путем совмещения прямого лучка и пучка, отраженного зеркалом 4, при их наблюдении на плоском экране, изготовленном из тонкой белой бумаги. Довольно точному совмещению пучков способствуют наблюдаемые глазом одинаковые для обоих пучков картины полос, колец и пятен на экране (рис. 2а). Эти картины определяются главным образом дифракцией и интерференцией исходного пучка на торцах газоразрядной трубки и зеркалах лазера. В то же время, на экране получается и интерференционная картина от этих двух расходящихся пучков. На отдельных малых участках экрана она создается узкими, почти параллельными, пучками лучей. На таких участках картина имеет вид практически регулярных светлых и темных линий (рис. 2б), перпендикулярных к плоскости падения на экран осевых лучей двух узких пучков. Другими словами, она подобна картине интерференции двух параллельных пучков. В соответствии с геометрией и размерами схемы период  $d$  картины примерно равен 0,01 мм и она не видна невооруженным глазом. Для ее наблюдения за экраном устанавливают микроскоп, фокусируют его объектив на поверхность экрана, экран убирают и наблюдают интерференционные линии. Однако, поскольку интерференция имеет место во всей области пересечения пучков, то отчетливые интерференционные линии можно наблюдать и в других плоскостях без фокусировки объектива микроскопа.

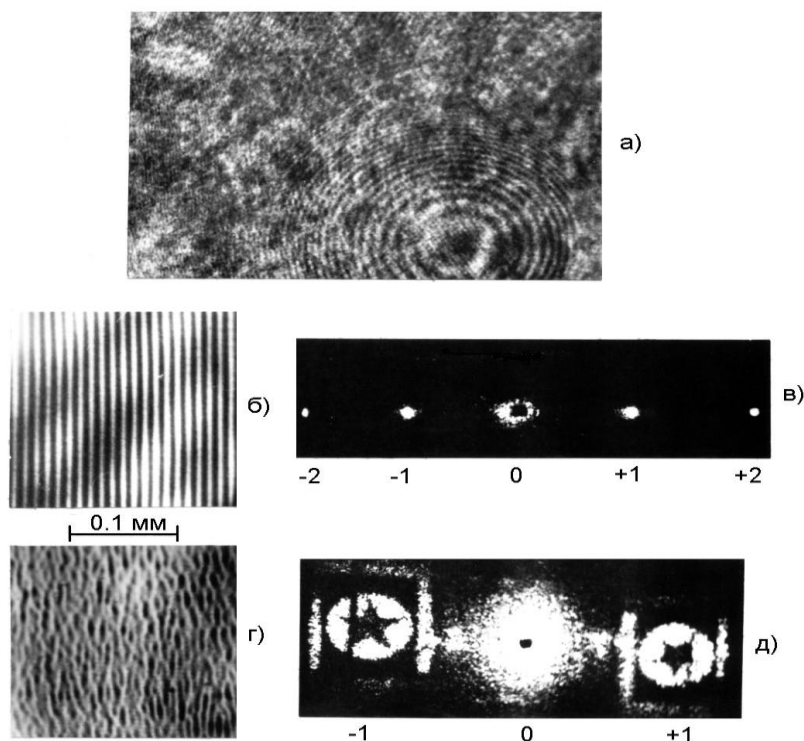


Рис. 2. Иллюстрации к изучению голографического процесса. (а) — внешний вид голограммы; (б) — голографическая решетка, наблюдаемая в микроскоп; (д)

— структура голограммы объекта, наблюдаемая в микроскоп; (e) — голографические изображения объекта.

Периодическая интерференционная картина имеет пространственную частоту  $N = d^{-1} \approx 100 \text{ лин}\cdot\text{мм}^{-1}$ . После наблюдения в микроскоп ее фотографируют на фотопленку с разрешающей способностью  $> 100 \text{ лин}\cdot\text{мм}^{-1}$ . Мы применяем 36 мм фотопленку типа МИКРАТ-300 или МИКРАТ-900. Для размещения фотопленки используется камера от фотоаппарата без объектива с размером кадра 36x24 мм. Камера с пленкой закрепляется на оптической скамье так, чтобы фотопленка примерно совмещалась с плоскостью ранее использованного экрана. Фотографирование нужно проводить в условиях отсутствия механических вибраций в схеме, которые приводят к размытию интерференционной картины во время экспозиции. Такое размытие можно видеть при наблюдении картины в микроскоп при легких ударах рукой по тем или иным элементам схемы. По этой причине нельзя использовать для экспозиции механический затвор камеры фотоаппарата, при срабатывании которого возникнут недопустимые вибрации камеры и фотопленки. С другой стороны, применяемые фотопленки имеют сравнительно низкую светочувствительность и в условиях описываемого эксперимента время экспозиции составляет величину порядка 1 с. Такое время экспозиции нетрудно реализовать с помощью темного экрана, удерживаемого в руке. Поэтому фотографирование производят так: берут в руку экран из плотной черной бумаги подходящего размера и закрывают входное отверстие камеры; с помощью гибкого тросика открывают затвор камеры; делают подходящую экспозицию, открывая и закрывая падающий свет путем ручного перемещения черного экрана, и после этого закрывают затвор камеры.

Полученная фотография близка по своим свойствам к голографическим дифракционным решеткам, которые получают при записи интерференции параллельных пучков. Она является голограммой того участка зеркала 4, который отражает свет. Эту голограмму помещают в то место, где она находилась при фотографировании. Опорный пучок, идущий от зеркала 4, закрывают и освещают голограмму прямым пучком, прошедшим светоделитель. Глазом наблюдают через голограмму результат дифракции падающего пучка. Среди дифрагированных пучков будет присутствовать и опорный пучок, т.е. изображение участка зеркала 4, который ранее создавал этот пучок. Фотография голографической решетки, показанная на рис. 2b, сделана с помощью микроскопа, сфокусированного на поверхность голограммы.

После получения и наблюдения действия голографической решетки в схему вновь устанавливают микроскоп. На голографический столик помещают светорассеиватель с транспарантом и штырек. В результате интерференционная картина, наблюдаемая в микроскоп, резко изменяется из-за изменений фаз и амплитуд в предметном пучке.

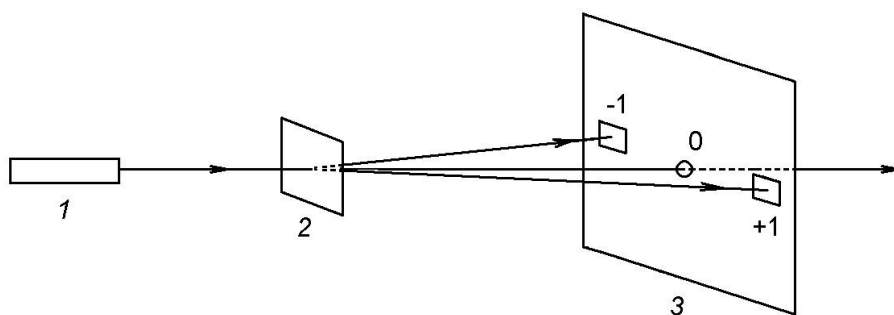
Эта картина имеет вид, показанный на рис. 2d. Теперь на малых участках она создается узкой частью опорного пучка и лучами, приходящими на этот участок практически от всех точек предметов. В этой структуре, несмотря на ее сложный вид, существует периодичность, которая определяется длиной волны света и

углами падения интерферирующих лучей. Поэтому такая структура будет давать регулярную дифракцию света, которая и создает образ предмета. При полной хаотичности структуры наблюдалось бы обычное рассеяние света.

После наблюдения в микроскоп производят фотографирование картины таким же способом, как и в предыдущем случае. Внешний вид полученной голограммы показан на рис. 2а. Видно, что кроме шумовой структуры полос и пятен на голограмме нет каких либо признаков фотографического изображения предметов. Примерно такой же вид имеет и ранее полученная голограмма зеркала. Фотография голографической структуры (рис. 2д), содержащей информацию о предметах, получена с помощью микроскопа при его фокусировке на поверхность голограммы. Для наблюдения изображения предметов они убираются из схемы и голограмма освещается опорным пучком. Изображение наблюдают глазом через голограмму в том месте, где были расположены предметы. При дифракции падающего пучка на голографической структуре (рис. 2д) возникает два изображения, одно из которых расположено там, где находились предметы. Другое изображение сдвинуто в пространстве относительно первого, имеет несколько иной масштаб и является обращенным. Первое изображение при соответствующей аккомодации глаза выглядит отчетливо и имеет правильный масштаб. При изменении направления наблюдения возникает параллакс-транспарант и штырек движутся друг относительно друга. Параллакс выявляет различие в пространственном положении этих предметов, т.е. объем наблюдаемой сцены.

Важной особенностью голограммы является то, что даже малые ее участки дают полное изображение. Для такого наблюдения изготавливают экран из черной бумаги с небольшим (2–3 мм) отверстием. Экран накладывают на голограмму и наблюдают изображение через отверстие при его различных положениях на голограмме.

Полученная голограмма позволяет наблюдать изображение и другим способом [2]: на малый участок голограммы направляют непреобразованный линзой узкий лазерный пучок и наблюдают изображение в проходящем свете на белом экране (рис. 3).



*Рис. 3. Схема наблюдения голографических изображений, воспроизводимых на экране при прохождении непреобразованного лазерного пучка через малый*

*участок голограммы.*

Такая схема убедительно показывает, что изображение получается за счет дифракции падающего пучка на периодической голографической структуре (рис. 2b,d). На рис. 3 обозначены: 1 — лазер, 2 — голограмма, 3 — экран. На экране показаны: 0 — нулевой пучок, проходящий в отверстие в экране,  $\pm 1$  — дифрагированные пучки первого порядка дифракции, которые создают изображения. Расстояние от выходного окна лазера до голограммы примерно равно 30–50 см. Диаметр освещаемого участка голограммы равен эффективному диаметру (1,5–2 мм) падающего гауссова пучка. Четкое изображение на экране получается при расстоянии не менее 30 см от голограммы. Размер изображения увеличивается при дальнейшем росте расстояния. Максимально возможная отдаленность экрана ограничивается только яркостью изображения. При достаточной интенсивности лазерного пучка голографическое изображение на экране можно демонстрировать в большой аудитории [2]. Такую демонстрацию полезно дополнить показом на экране с помощью проектора внешнего вида голограммы (рис. 2a) и ее микроструктуры (рис. 2d).

На рис. 2с,е показаны наблюдаемые на экране картины дифракции соответственно для голограммы зеркала (b) и голограммы предметов (d). Дифракционные пятна разных порядков  $\pm m$  обозначены под фотографиями цифрами. При нормальном падении лазерного пучка на голограмму выбор знаков для правых и левых пучков является произвольным. Голограмма зеркала дает пятна  $m = \pm 1, \pm 2$ . Появление пучков дифракции 2-го порядка связано с отклонением периодического распределения почернения в структуре (b) голограммы от синусоидального. Указанный под фотографией (b) в увеличенном в 10 раз масштабе период  $d$  структуры был найден из измерений углов дифракции  $\varphi$  ( $d = m\lambda (\sin\varphi)^{-1}$ ).

Мы использовали транспарант в виде черного прямоугольника с белым кругом и черной звездочкой. Видно, что при наблюдении по схеме рис. 3 изображения (e) транспаранта и штырька, создаваемые голограммой (d), получаются в пучках дифракции 1-го порядка. Правильное отчетливое изображение наблюдается в пучке  $-1$  порядка. Изображение в пучке  $+1$  порядка является полностью обращенным в соответствии с симметрией дифрагированных пучков разных знаков. При освещении узким пучком разных участков голограммы наблюдается движение изображений как целого и взаимное движение предметов относительно друг друга. Качество изображения является более низким, чем в случае наблюдения в голографической схеме при освещении голограммы широким пучком. Ухудшение изображения связано с использованием малого участка голограммы.

Используя принцип схемы рис. 3, можно наблюдать изображение и с помощью точечного источника белого света. Для этого достаточно приблизить голограмму к глазу и посмотреть через нее на удаленную на несколько метров лампу накаливания. При этом по обе стороны от белой нити лампы наблюдаются довольно яркие взаимно обращенные изображения, окрашенные в спектральные цвета. Используя светофильтры разного цвета можно избавиться от такого спек-

трального размытия изображений, а также наблюдать уменьшение масштаба изображений при замене красного светофильтра на синий.

### **Заключение**

Представленный здесь эксперимент прост, надежен и позволяет изучать основные принципы голографического процесса. Его методическая новизна заключается в следующем: наблюдения интерференционных картин с помощью микроскопа; сравнение голограмм зеркала и предметов; разнообразие способов наблюдения голографических образов, включая наблюдения в белом свете; возможность демонстрации голограмм и изображений на экране в большой аудитории.



## **Литература**

1. Handford P.J. Holography using fine grain film // Phys. Educ. –1973. –8, №6. – P.380–382.
2. Шустин О.А. Лекционная демонстрация по голографии // УФН. –1971. – 105, №2. –С.361–362.