

Лабораторная работа № 8

Голографическая интерферометрия

Цель работы – освоение методик записи голограмм, восстановления и обработки голографических изображений при интерференционных измерениях; определение влияния длины и времени когерентности излучения лазера на качество голограммы.

Голографическая интерферометрия [2, 23] служит для измерения характеристик деформаций, вибраций, отклонений от эталона и других смещений, значения которых имеют порядок длины волны лазера. Голографические интерферометры, работающие в реальном времени, менее критичны к стабильности и качеству изготовления отдельных деталей, чем их неголографические аналоги. Уникальным свойством голографии является возможность записывать множество изображений на одну и ту же голограмму, причем при восстановлении они интерферируют как независимые волновые фронты. Эта способность записывать волновые фронты за различное время, а также тот факт, что теперь в интерферометрии можно использовать произвольные волновые фронты, сделали голографический подход гораздо более гибким, чем классический. К достоинствам голографической интерферометрии, как метода ОНК, относятся также бесконтактность, высокая чувствительность, возможность контроля объектов, имеющих относительно большие поверхности, в том числе и диффузно-отражающие, что невозможно в классической интерферометрии.

На рис. 8.1 изображены схемы записи (рис. 8.1а) и восстановления (рис. 8.1б) голограммы, т.е. записи светового поля, образовавшегося при интерференции двух когерентных полей: поля, рассеянного объектом контроля (ОК), и поля лазерного пучка. В отличие от обычной фотографии голограмма содержит информацию не только об амплитуде, но и о фазе световой волны.

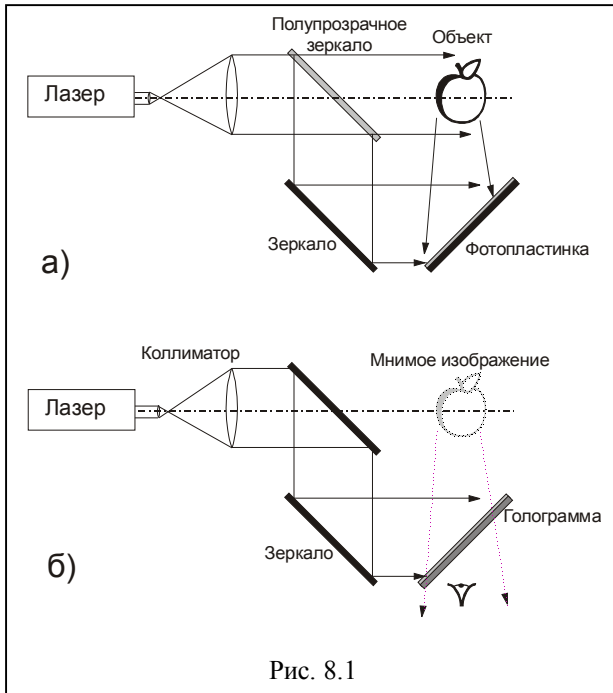


Рис. 8.1

Регистрация *голограммы* на фотопластинке производится за счет вариации показателя преломления или оптической толщины светочувствительного слоя, коэффициента пропускания или отражения этого слоя. При этом используются разнообразные светочувствительные материалы: галогенсеребряные фотопленки и фотопластинки, органические фотоэмульсии, халькогенидные стекла, диэлектри-

ческие и полупроводниковые кристаллы и другие.

В процессе записи и восстановления *голограмм* сильное влияние на их качество оказывает степень когерентность светового пучка источника излучения (лазера). Мерой временной когерентности являются *длина когерентности* $l_{ког}$, определяемая как длина цуга волн, испускаемых источником света без разрыва фазы, или *время когерентности* $\tau_{ког}$, связанное с $l_{ког}$ соотношением

$$l_{ког} = c \tau_{ког}, \quad (1)$$

где c – скорость света. Время когерентности, в свою очередь, связано с частотным интервалом $\Delta\nu$, в котором осуществляется генерация когерентного цуга излучения (шириной линии генерации)

$$\tau_{ког} \cong 1/\Delta\nu. \quad (2)$$

При записи и восстановлении голограммы разность хода опорного и предметного пучков не должна превышать $l_{ког}$, в противном случае вместо интерференционной картины на ней будет зафиксировано простое сложение интенсивностей этих пучков. Таким образом, если излучение лазера содержит некогерентную составляющую, то на голограмме возникает равномер-

ный фон, который ухудшает контраст интерференционной картины, т.е. качество голограммы.

Различают два *основных метода* голографической интерферометрии: метод двойной экспозиции, используемый при анализе статических деформаций ОК, и метод двух предметных полей, который пригоден для исследования динамических деформаций.

Метод двойной экспозиции заключается в том, что на одну и ту же пластинку двумя экспозициями, последовательно записываются голограммы от объекта, находящегося в исходном и деформированном состояниях. При этом суммарная экспозиция должна находиться в пределах линейного участка характеристической кривой фотоэмульсии. При освещении такой

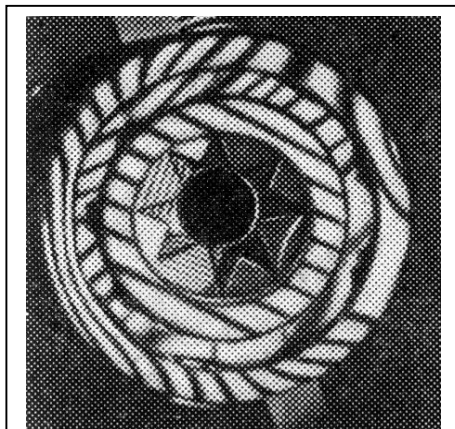


Рис. 8.2

сложной голограммы опорной волной возникают два световых поля, одно из которых отвечает недеформированному объекту (эталону), а другое – деформированному. В силу когерентности этих полей они интерферируют между собой, создавая на изображении эталона интерференционную картину, которая соответствует деформациям объекта. В качестве примера на рис. 8.2 [24] показана голографическая интерферограмма картины напряжений в нагруженном шарикоподшипнике.

В *методе двух предметных полей* голограмму недеформированного ОК помещают в то место, где она экспонировалась. Объект контроля и источник излучения также оставляют на прежних местах. При освещении ОК и голограммы опорным пучком в пространстве за голограммой совмещаются и интерферируют две предметных волны: та, что идет непосредственно от объекта и восстановленная голограммой. Если теперь каким-либо образом деформировать ОК, то фазовые искажения рассеянной им волны, отразятся на интерференционной картине. На объекте, рассматриваемом через голограмму, возникнут интерференционные полосы, которые позволяют судить о характере и значениях деформаций ОК в различные моменты времени. Сказанное иллюстрирует рис. 8.3 [24], на котором изображен прозрачный деформированный объект, покрытый сетью интерференционных полос. У идеального объекта интерференционные полосы проходили бы параллельно.

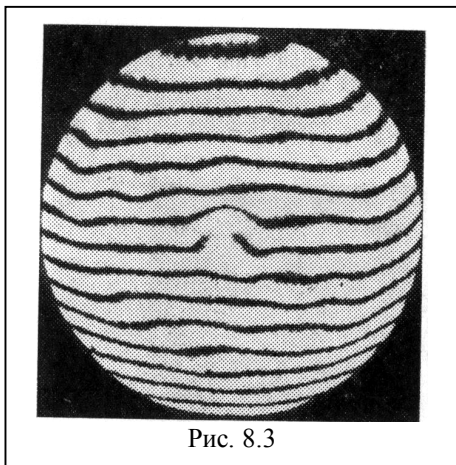


Рис. 8.3

Методика выполнения работы

В лабораторной работе реализована схема метода двойной экспозиции. В качестве модели объекта контроля выбрано плоское зеркало. При этом «деформации» ОК соответствует небольшой поворот зеркала в пространстве. Теперь предметная и опорная волны в схеме записи (рис. 8.1а) являются плоскими. Если эти волны сходятся под углом ψ , то голограмма представляет собой дифракционную решетку с периодом

$$d = \frac{\lambda_p}{2 \sin(\psi/2)}, \quad (3)$$

где λ_p - длина световой волны при регистрации голограммы.

Осветим эту голограмму плоской световой волной с длиной λ_b . Тогда на экране будет наблюдаться дифракционная картина (рис. 8.4), максимумы

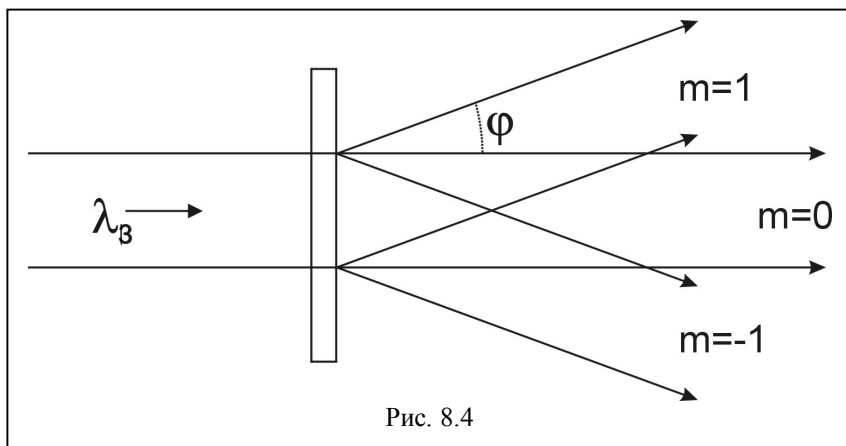


Рис. 8.4

интенсивности в которой находятся под углами дифракции φ , определяемыми соотношением $d \sin \varphi = m \lambda_b$, где $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ - порядки дифракции. По мере возрастания порядка дифракции интенсивность дифракционных максимумов резко ослабевает. Решетка, которая, как в нашем случае, имеет синусоидальное распределение, максимумов выше первого

порядка практически не создает. Поэтому для определения периода записанной на голограмме дифракционной решетки ограничимся измерением угла φ между направлениями распространения волн нулевого и первого порядка. Тогда для искомого периода получим формулу:

$$d = \frac{\lambda_{\text{в}}}{\sin \varphi}. \quad (4)$$

Небольшой поворот зеркала («деформация» ОК), т.е. изменение угла схождения предметной и опорной волн при записи дифракционной решетки, приведет к изменению ее периода. Следовательно, изменится и угловое расстояние между максимумами первого и нулевого порядка в картине восстановления голограммы.

Применение метода двойной экспозиции позволяет зарегистрировать на одной светочувствительной пластинке две дифракционные решетки, соответствующие двум углам схождения предметной и опорной волн. При освещении такой голограммы плоской волной в каждом дифракционном порядке восстанавливаются две волны, дифрагировавшие под разными углами. Небольшие изменения углов схождения $\Delta\psi$ и дифракции $\Delta\varphi$ связаны соотношением

$$\Delta\psi = \Delta\varphi \sqrt{1 + \frac{1 - (\lambda_{\text{п}}/\lambda_{\text{в}})^2}{1 + (\lambda_{\text{п}}/\lambda_{\text{в}})^2}}. \quad (5)$$

В данной работе голограмма записывается на тонком слое халькогенидного стеклообразного полупроводника (ХСП), нанесенного на стеклянную пластинку. Достоинствами ХСП как материала для записи голограмм являются высокое пространственное разрешение (до 5000 лин/мм), значительная чувствительность к коротковолновому излучению (с длиной волны 0,5 мкм), получение голограммы без предварительной химической обработки материала, а также возможность многократного повторения цикла запись-стирание.

Длина когерентности лазера $l_{\text{ког}}$ измеряется в работе путем наблюдения за ухудшением контраста интерференционной картины при увеличении разности длин плеч интерферометра Майкельсона вплоть до полного исчезновения полос. Удвоенную (за счет двойного прохода лучом плеча интерферометра) разность хода, при которой полосы исчезают, можно считать приближенно равной $l_{\text{ког}}$.

Основой лабораторной установки является измерительная голографическая установка УИГ-22К, состоящая из голографического стола и лазеров: аргонового ЛГН-503 и гелий-неонового ЛГН-111. Первый из них используется для записи голограмм благодаря относительно высокой выходной мощности (1 Вт в непрерывном режиме) и длине волны, лежащей в



Рис. 8.5

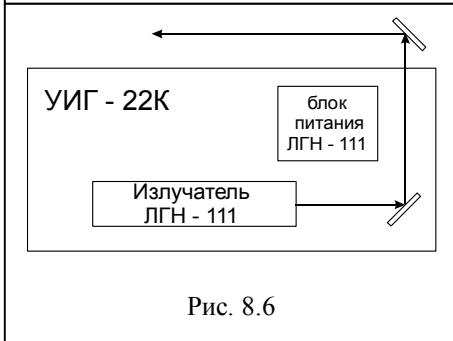


Рис. 8.6

сине-зеленой области спектра ($\lambda_p = 0,488$ мкм). Его недостаток – высокая потребляемая мощность (около 10 кВт), что требует двухконтурной системы водяного охлаждения. Расходимость излучения лазера ЛГН-503 – порядка десятых долей миллирадиана, накачка осуществляется путем возбуждения ионов аргона столкновениями в плазме дугового разряда. Лазер ЛГН-111 применяется для восстановления голограмм ($\lambda_b = 0,6328$ мкм).

Структурная схема установки показана на рис. 8.5 (вид сверху) и рис. 8.6 (вид сбоку). Подвижная плита голографического стола расположена на пневматических подушках, защищающих

установку от воздействия внешних вибраций. На плите собираются измерительные схемы при помощи комплекта оптических элементов и сменных держателей. Лазер ЛГН-111 расположен на подвижной полке голографического стола, лазер ЛГН-503 - на стойке рядом с установкой УИГ-22К. Лучи лазеров выводятся на голографический стол с помощью зеркал, укрепленных в поворотных головках.

Порядок выполнения работы

1. Изучить принцип работы и устройство лазеров ЛГН-503 и ЛГН-111 по их техническим описаниям.
2. Контроль влияния внешних условий на работу установки
- 2.1. Собрать на голографическом столе интерферометр Майкельсона, оптическая схема которого показана на рис. 8.7. В состав интерферометра входят: 1 – призма-куб, 2 – зеркала, 3 – линза, 4 – экран.

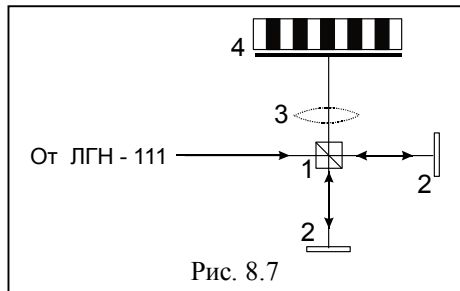


Рис. 8.7

- 2.2. Установить тумблер «Сеть» блока питания ЛГН-111 в положение «Вкл.». При этом должна загореться сигнальная лампочка, а через 1 – 3 с – появиться лазерное излучение.
- 2.3. Регулируя поворотными винтами юстировочных головок положение зеркал в плечах интерферометра, добиться появления на экране интерференционной картины, состоящей из 4 – 6 полос и визуально оценить ее устойчивость. Окружающие условия считаются пригодными для работы установки, если смещение интерференционных полос не превышает одной восьмой периода полос. В противном случае следует устранить причину вибраций (выключить вентиляцию или другое оборудование, создающее вибрации).
- 2.4. Выключить тумблер «Сеть» блока питания ЛГН-111.
3. Определение длины когерентности лазера ЛГН-111
 - 3.1. Модернизировать схему интерферометра Майкельсона (рис. 8.7) таким образом, чтобы одно из его зеркал имело возможность перемещения с сохранением интерференционной картины (т.е. наложения на экране отраженных обоими зеркалами пучков) в диапазоне разности длин плеч интерферометра от 0 до 10-15 см. Для этого направляющая, по которой перемещается зеркало, должна быть установлена параллельно лазерному лучу, а тот, в свою очередь, должен быть параллелен поверхности стола УИГ.
 - 3.2. Повторить операции п. 2.2.
 - 3.3. Добиться максимального контраста интерференционной картины небольшими перемещениями подвижного зеркала относительно точки, для которой плечи интерферометра одинаковы. Отметить это положение по линейке на столе УИГ как l_1 . Медленно перемещая зеркало от делительного кубика, наблюдать ухудшение контраста интерференционной картины вплоть до полного ее исчезновения. Отметить это положение по линейке на столе как l_2 . Вычислить разность $l_2 - l_1 = l_{\text{ког}}$.
 - 3.4. Повторить п.3.3 несколько раз, определить среднее значение длины когерентности $l_{\text{ког}}$ и погрешность ее измерения.
 - 3.5. Используя формулы (1) – (2), вычислить время когерентности, ширину линии излучения лазера и оценить погрешности их измерения.
4. Запись голограммы
 - 4.1. Собрать на голографическом столе оптическую схему записи голограммы (рис. 8.8). В ее состав входят: 1 – коллиматор, 2 – светоделительная призма, 3 – зеркало управления предметным лучом, 4 – зеркало управления опорным лучом, 5 – экран, 6 – непрозрачный экран, 7 – вспомогательное зеркало, 8 – вспомогательный экран.

Луч лазера ЛГН-503 направляется вдоль оптической оси коллиматора, увеличивающего диаметр луча, и делится призмой на два луча. Один из

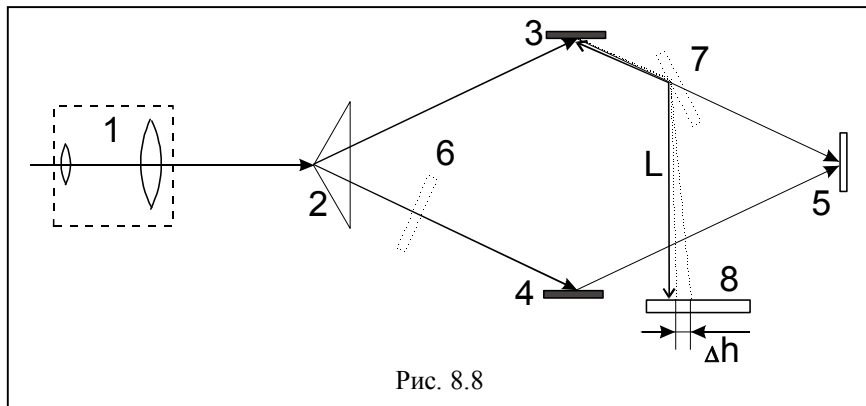


Рис. 8.8

них играет роль опорного, другой – предметного пучка.

4.2. Включить лазер ЛГН-503, соблюдая следующую последовательность операций.

- 4.2.1. Подать воду из водопроводной магистрали в систему охлаждения; установить ручку потенциометра «Ток разряда» на передней панели блока питания в крайнее левое положение.
- 4.2.2. Установить выключатель сети в положение «Вкл», при этом должны загореться сигнальные лампочки «А», «В», «С».
- 4.2.3. Нажать кнопку «Охлаждение», должен заработать двигатель насоса и загореться сигнальная лампочка «Охлаждение вкл».
- 4.2.4. Нажать кнопку «Накал», должна загореться сигнальная лампочка «Накал».
- 4.2.5. Через 3 мин нажать кнопку «Анод», вольтметр на передней панели блока питания должен показать напряжение холостого хода не менее 500 В, а показания амперметра «Ток соленоида» должны быть в пределах 2,5 - 5 А.
- 4.2.6. Через 30 с нажать кнопку «Поджиг» и удерживать ее до появления излучения лазера, при этом должна загореться сигнальная лампочка «Поджиг есть».
- 4.2.7. Регулируя поворотными винтами юстировочных головок положение зеркал 3 и 4, совместить на экране отметки предметного и опорного лучей. Перекрыть затвором луч лазера ЛГН-503. Убрать экран и на его место установить светочувствительную пластинку.

- 4.3. Открыть затвор лазера ЛГН-503 и экспонировать голограмму в течение времени, указанного преподавателем. Перекрыть излучение лазера ЛГН-503 затвором.
- 4.4. В канале опорного луча установить непрозрачный экран 6, а в канале предметного луча - вспомогательное зеркало 7. Открыть затвор лазера ЛГН-503. Регулируя винтами положение зеркала 7, направить предметный луч на экран 8. Отметить на экране положение центра пучка.
- 4.5. Регулировкой положения зеркала 3 добиться смещения центра предметного пучка на экране на величину $\Delta h = 3 \dots 5$ мм. Закрыть затвор лазера. Измерить расстояние L между зеркалом 3 и экраном вдоль луча лазера. Убрать зеркало 7.
- 4.6. Открыть затвор лазера ЛГН-503 и провести второе экспонирование голограммы в течение времени, указанного преподавателем. Закрыть затвор лазера.
- 4.7. Выключить лазер ЛГН-503, для этого проделать следующее
 - 4.7.1. Нажать последовательно кнопки «Анод» и «Стоп», через 3 мин отключить систему охлаждения нажатием кнопки «Охлаждение».
 - 4.7.2. Установить выключатель напряжения сети в нижнее положение, перекрыть подачу воды в систему охлаждения.
5. Восстановление и обработка голографического изображения
 - 5.1. Собрать на голографическом столе оптическую схему восстановления изображения (рис. 8.9), в состав которой входят: 1 – голограмма, закрепленная в универсальном держателе, 2 – экран.
 - 5.2. Включить лазер ЛГН-111 и регулировкой положения голограммы добиться появления на экране дифракционных максимумов нулевого и высших порядков.
 - 5.3. Измерить расстояние R между голограммой и экраном и расстояния r_1

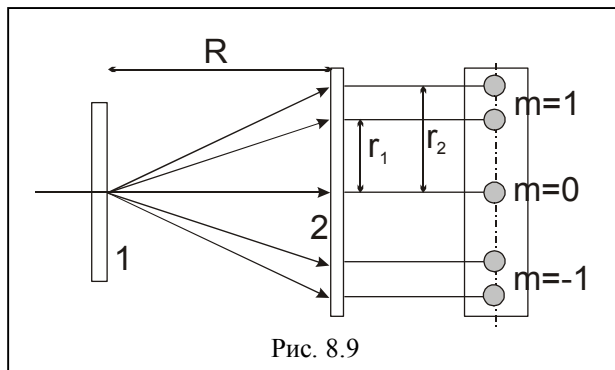


Рис. 8.9

и r_2 между дифракционными максимумами нулевого и первого порядка, соответствующими двум экспозициям голограммы.

5.4. Выключить лазер ЛГН-111.

5.5. Рассчитать угол дифракции и угловое смещение дифракционного максимума первого порядка с помощью соотношений

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{r_1}{R}, \quad \Delta\varphi = \frac{r_2 - r_1}{R} \quad (6)$$

5.6. С помощью соотношений (4) – (6) рассчитать период дифракционной решетки и изменение угла схождения опорной и предметной волн $\Delta\psi$. Сравнить рассчитанный угол с его экспериментальным значением, которое определяется из соотношения

$$\Delta\psi = \Delta h/L.$$

Оценить погрешность измерений.