

## РАБОТА 5

### ОСНОВЫ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДИФФУЗНО ОТРАЖАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ.

**Цель работы:** ознакомление с основами метода лазерной интерферометрии, измерение профиля изгиба пластины, определение величины деформирующего усилия.

#### Введение

Зрение является одним из важнейших органов чувств, поскольку именно оно дает наибольшую информацию об окружающем мире. Зрительная информация воспринимается глазом человека и обрабатывается мозгом. Однако время необходимое для обработки может превышать возможное время наблюдения. Кроме того, часто возникает необходимость передачи этой информации другому человеку не получившему ее непосредственно из собственных наблюдений.

Зрительную информацию можно получить и сохранить с помощью фотографии. При фотографическом способе формирования изображения объекта световая волна, рассеянная на объекте, с помощью оптических элементов образует действительное изображение на светочувствительном материале. Плотность зачернения каждой точки изображения на негативе пропорциональна интенсивности свечения соответствующей точки объекта.

В свою очередь, интенсивность световой волны пропорциональна квадрату ее амплитуды ( $I \sim E^2$ ). Но световая волна характеризуется не только амплитудой, но и фазой, которую фотография не регистрирует. Таким образом, фотографическая информация об объекте не является полной.

В 1948 году Деннисом Габором был предложен новый принцип записи изображений, который позволяет фиксировать не только амплитудные, но и фазовые характеристики электромагнитных волн и получать, таким образом, более полную информацию об объекте – источнике этой волны. Этот метод получил название «голография».

#### *Принцип получения голографического изображения*

Рассмотрим принцип голографии на простейшем примере (рис. 5.1). Предметная волна 1 распространяется под углом  $\theta'$  к перпендикуляру, восстановленному к плоскости  $A$ . Опорная волна 2 распространяется перпендикулярно к этой поверхности. Волны 1 и 2 характеризуются одной и той же длиной волны  $\lambda$  и являются когерентными.

В результате интерференции этих волн на плоскости будет наблюдаться интерференционная картина в виде эквидистантных полос. Пространственный период этой картины определяется разностью хода между участками волнового фронта в волнах 1

и 2. Поверхность одинаковой фазы в волне 2 совпадает с плоскостью А. В точке плоскости А с координатой  $y$  (рис. 5.1,а) разность хода

$$\Delta = y \sin \theta' . \quad (5.1)$$

Максимум интенсивности интерференционной картины в плоскости А соответствует значениям  $\Delta = \pm n\lambda$ , где  $n = 0, 1, 2, \dots$ . Расстояние  $d$  между максимумами

$$d = y_n - y_{n-1} = \frac{\lambda}{\sin \theta'}. \quad (5.2)$$

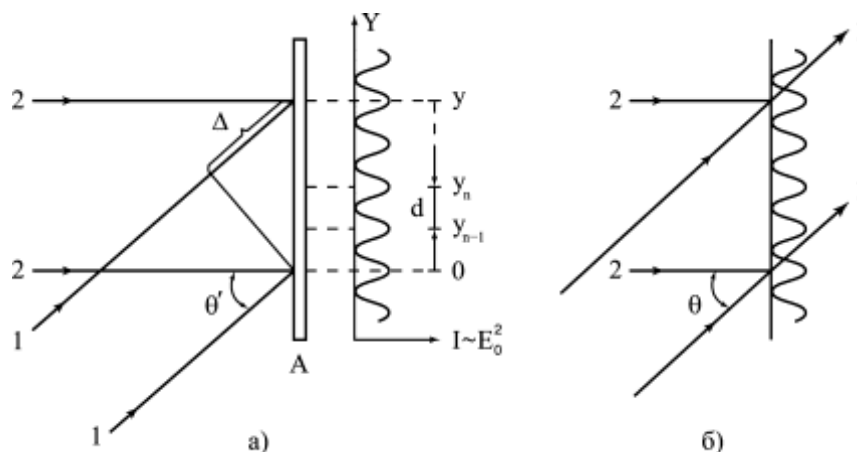


Рис. 5.1

Поместим в плоскости А фотопластинку и засветим ее. При правильном выборе экспозиции и режима обработки (проявление и закрепление) на пластине получится изображение интерференционных равностоящих полос. Полученный фотоснимок представляет собой дифракционную решетку с периодом  $d$ . При освещении решетки опорным излучением (волна 2) (рис. 5.1,б) в результате дифракции опорного пучка на решетке возникают несколько волн. Направление волны на максимум дифракции порядка  $m$  определяется условием  $d \sin \theta = \lambda m$ . Для  $m = 1$

$$d \sin \theta = \lambda . \quad (5.3)$$

Сравнение (5.3) с (5.2) для периода дифракционной решетки дает  $\theta' = \theta$ , т.е. свет на решетке дифрагирует под углом  $\theta'$ , что аналогично восстановлению предметной волны. Таким образом, фотографическая запись интерференционной картины двух плоских волн при последующем освещении изображения опорной волной позволяет восстановить другую волну - предметную.

Пусть теперь перед фотопластинкой Ф находится точечный источник S монохроматического и когерентного излучения (рис. 5.2). Одновременно пластинка освещается параллельным пучком лучей I, также монохроматических и когерентных. Условие когерентности этих двух световых потоков приводит к тому, что на

фотопластинке образуется система интерференционных полос, представляющая собой совокупность концентрических колец.

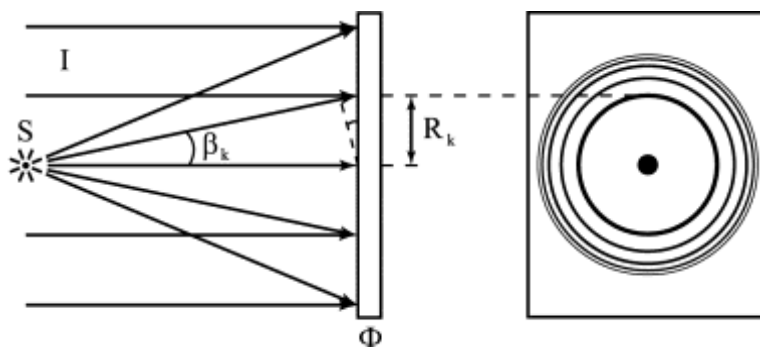


Рис. 5.2

Расстояние между соседними полосами вдоль радиуса будет зависеть от угла, под которым падают на фотопластинку лучи точечного источника и фонового пучка в данную точку пластинки. Условие максимума интенсивности, т.е. образование черного кольца на негативе, определяется соотношением

$$R_k \sin \beta_k = k\lambda.$$

Тогда расстояние между соседними темными полосами

$$\Delta R = \frac{\lambda}{\sin \beta_k}, \quad (5.4)$$

при этом считаем, что углы для соседних колец примерно равны.

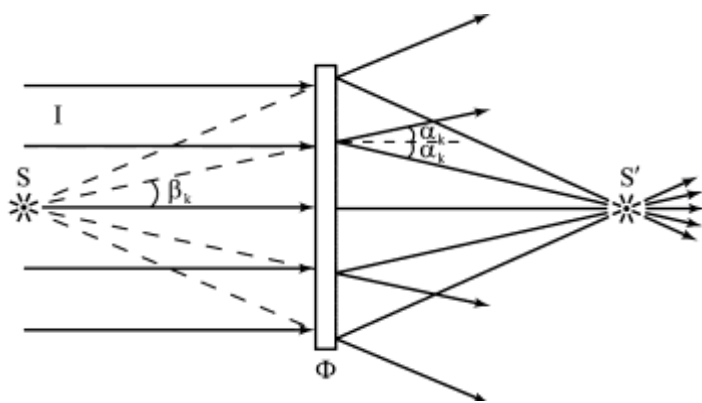


Рис. 5.3

Экспонированная и обработанная фотопластинка фактически представляет собой дифракционную решетку, у которой штрихи – это темные кольца, а промежутки между ними – светлые прозрачные кольца. Если эту пластинку осветить пучком параллельных

когерентных лучей (тем же пучком, который служил фоном при экспонировании) то лучи, проходящие через прозрачные кольца, будут дифрагировать, т.е. отклоняться (рис. 5.3).

Для дифракционных решеток угол, под которым виден максимум  $k$ -того порядка определяется соотношением:

$$d \sin \alpha_k = k\lambda, \quad (5.5)$$

где  $d$  – расстояние между соседними штрихами (постоянная решетки).

Если вместо  $d$  подставить в эту формулу  $\Delta R$  из формулы (5.4), то из сравнения формул (5.4) и (5.5) видно, что промежуток между двумя соседними кольцами будет отклонять падающее на пластинку излучение под тем же углом к оси симметрии, под которым на место этого промежутка падало излучение от точечного источника при экспонировании. (Это справедливо для  $k=1$  – в этом направлении при дифракции идет максимальная часть излучения).

Таким образом лучи, дифрагирующие в направлении оси, пересекутся в одной точке на оси на том же расстоянии от пластины, на котором был расположен точечный источник, но с другой стороны. Продолжения лучей, отклоненных от оси, также пересекутся в одной точке, причем в том же месте, где находился точечный источник. Видно, что сформировались два изображения источника – действительное  $S'$  (справа от пластины) и мнимое  $S$  (слева от пластины) (рис. 5.3). Если посмотреть сквозь пластинку вдоль пучка падающих на нее лучей, то можно увидеть изображение светящейся точки в том месте, где она находилась при экспонировании. Эта операция называется «восстановлением голографического изображения объекта», записанного в схеме, изображенной на рис. 5.2. В данном случае записан простейший объект – точка.

Можно ли записать и восстановить изображение реального объемного предмета? Очевидно, что это возможно, поскольку объект в оптике – это совокупность светящихся точек. Необходимо иметь источник излучения, обладающий высокой степенью когерентности и монохроматичности. Таким источником является оптический квантовый генератор – лазер.

Для получения изображения предмета как совокупности светящихся точек необходимо чтобы каждая точка создала на фотопластинке свою систему интерференционных полос. Следовательно, фотоэмульсия должна иметь очень высокую разрешающую способность, т.е. на единице площади поверхности фотоэмульсии должно помещаться очень большое количество отдельных, несливающихся полос. Повышение разрешения эмульсии сопряжено с уменьшением ее чувствительности, что приводит к значительному увеличению времени экспозиции. В результате, за время длительной экспозиции оптические элементы установки могут сдвинуться относительно друг друга. Если сдвиг будет величиной хотя бы в одну длину волны, то интерференционная картина станет размытой и на фотоэмульсии не зафиксируется. Чтобы избежать даже малейших смещений, необходимо создать специальные конструкции, устойчивые к вибрациям, и повысить мощность лазера.

Принципиальные схемы записи и восстановления голограммы реального объекта представлены на рис. 5.4.

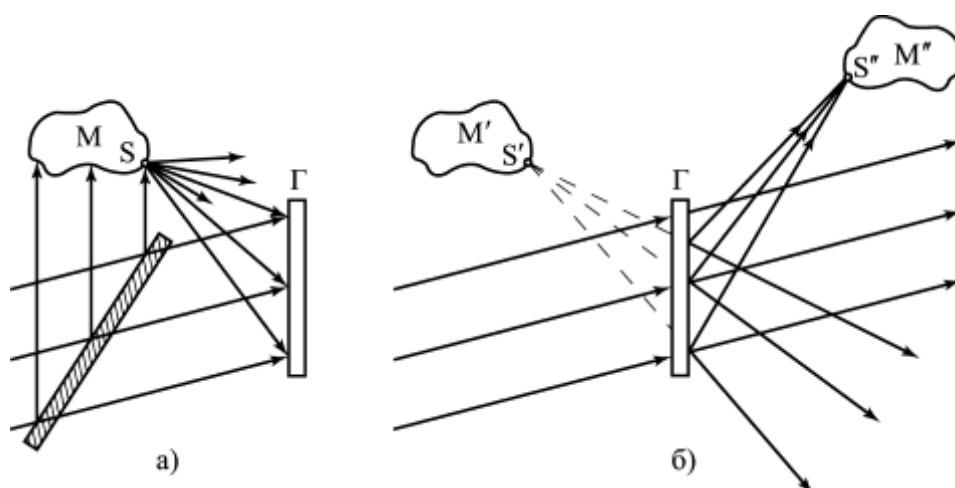


Рис. 5.4

При записи голограммы (рис. 5.4,а) используется один лазер, только так можно обеспечить когерентность двух световых пучков. Его излучение делится полупрозрачной пластиной на два пучка: один пучок освещает объект и рассеянные им лучи затем попадают на фотопластинку, второй пучок – фоновый или опорный формируется излучением, проходящим через полупрозрачную пластину. Излучение, рассеянное объектом, и опорный луч когерентны, поэтому они интерферируют на фотоэмульсии и создают сложную систему полос, содержащую информацию об амплитудах и фазах волн, рассеянных каждой точкой объекта.

После обработки фотопластинки она помещается в пучок когерентного излучения, которое, дифрагируя на системе полос, формирует действительное и мнимое изображение предмета (рис. 5.4,б). Мнимое изображение можно увидеть сквозь голограмму. Наиболее интересное свойство этого изображения – его «объемность». Изменяя угол зрения, можно увидеть предмет в разных ракурсах так же, как и его прототип.

Но голография используется не только для создания «объемных» изображений реальных объектов. Она широко применяется в научных исследованиях. В частности, на принципе голографии был создан метод, который называется методом лазерной интерферометрии поверхности.

### Методика выполнения эксперимента

В некоторых технических задачах возникает необходимость измерения малых деформаций поверхности твердых объектов с точностью до долей микрона. Для решения таких задач применение метода лазерной интерферометрии оказывается наиболее эффективным.

Схема установки изображена на рис. 5.5. Луч лазера делительным зеркалом ДЗ разделяется на два когерентных пучка – I и II. Луч II, отражаясь от зеркала З2, проходя

через диафрагму  $D$ , расширяется линзой  $L1$  и зеркалом  $31$ , направляется на деформируемую пластину  $O$ , от которой лучи диффузно (равномерно по поверхности) отражаются и попадают на фотопластинку  $\Gamma$ . Нижний край пластины закреплен, а к верхнему краю прикладывается малая горизонтальная сила, за счет чего пластина изгибается. Размеры пластины: толщина  $h = (2,0 \pm 0,1)$  мм, высота  $l = (20,0 \pm 0,1)$  см, ширина  $b = (20,0 \pm 0,1)$  см. Модуль упругости материала пластины (дюраль)  $E = 7 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>. Луч  $I$ , являясь когерентным фоном – опорным лучом, отразившись от системы зеркал  $33 - 35$  и пройдя рассеивающую линзу  $L2$ , также попадает на фотопластинку.

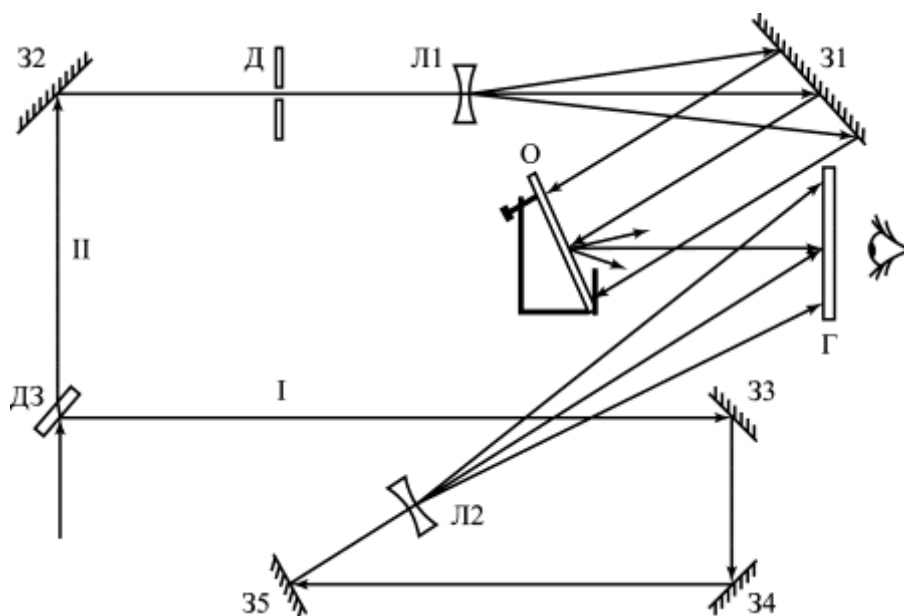


Рис. 5.5

При записи интерферограммы использовался специальный голографический одномодовый He - Ne лазер ЛГН-215 с длиной волны излучения  $\lambda = 632,8$  нм. Мощность непрерывного излучения лазера составляла  $\sim 20$  мВт. После записи изображения пластины, она деформировалась и производилась еще одна экспозиция. Голограмма записывалась на фотопластинке высокого разрешения марки ПФГ-3 с чувствительностью на длине волны  $\lambda = 633$  нм, равной  $35$  Дж·м<sup>2</sup> при дифракционной эффективности (отношению дифрагированного в первый порядок светового потока к падающему на голограмму), равной 30%. Суммарная экспозиция голограммы составляла 16 мин. Проявка и закрепление голографического изображения производилась проявителем СП-4, в состав которого входит сульфат натрия, гидрохинон, КОН, фенидон, роданистый аммоний, бензотриазил.

На стадии восстановления обработанная фотопластинка помещается на прежнее место, луч  $II$  перекрывается, а луч  $I$ , служивший при записи опорным лучом, диффразируя на голограмме, формирует голографическое изображение пластины  $O$  в первом порядке

дифракции. Такой ход лучей позволяет наблюдать голографическое изображение в горизонтальном направлении (схема Лейта и Упатниекса).

Для того чтобы получить интерферограмму, необходимо записать на одну и ту же фотопластинку голографические изображения недеформированной пластины и пластины после деформации. Тогда при восстановлении этой «двойной» голограммы световые потоки, формирующие изображения деформированной и недеформированной пластин, являясь когерентными, будут интерферировать, и по этой картине можно определить профиль деформированной пластины.

В лабораторной работе запись интерферограммы не производится, поскольку эта операция весьма сложная и трудоемкая. Учащиеся восстанавливают готовую интерферограмму, сделанную на этой же установке. Для наглядности восстановленное изображение пластины находится на фоне этой же пластины. Таким образом, схема восстановления выглядит так же, как и схема на рис. 5.5, но в ней отсутствует луч II.

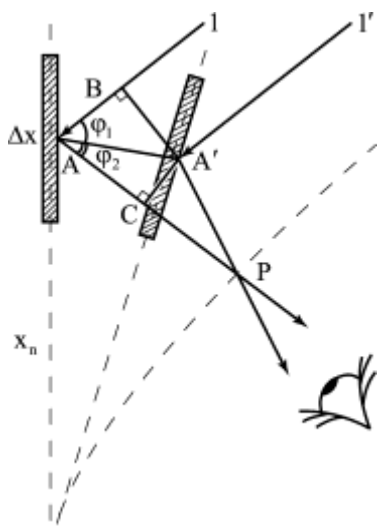


Рис. 5.6

Выберем произвольную узкую полоску пластины  $\Delta x$  (рис. 5.6), находящуюся на расстоянии  $x_n$  от зажима пластины. Лучи, формирующие изображения пластины в двух положениях интерферируют, причем интерференционные полосы локализованы на некоторой поверхности перед пластиной  $P$ . Светлая полоса окажется там, где оптическая разность хода между отраженными лучами 1 и 1' будет кратной длине волны. Из рисунка 5.6 видно, что эта разность хода складывается из двух отрезков  $AB$  и  $AC$ . В свою очередь

$$AB = AA' \cos \varphi_1 \text{ и } AC = AA' \cos \varphi_2 .$$

В точке  $P$  будет наблюдаться максимум интерференционной картины (светлая полоса), если суммарная разность хода кратна длине волны:

$$\Delta_n = AB + AC = AA' (\cos \varphi_1 + \cos \varphi_2) = n\lambda ,$$

где  $AA'$  – это смещение участка пластины шириной  $\Delta x$ , находящегося на расстоянии  $x_n$  от зажима пластины.

Поскольку целью работы и является определение зависимости смещения участков пластины от координаты данного участка – профиля пластины, введем новое обозначение:

$$AA' = y_n(x_n) . \text{ Тогда}$$

$$y_n = \frac{n\lambda}{\cos \varphi_1 + \cos \varphi_2}.$$

Для того чтобы эта зависимость выглядела более привычно ( $y$  – по вертикали,  $x$  – по горизонтали), повернем рис. 5.6 так, как это показано на рис. 5.7.

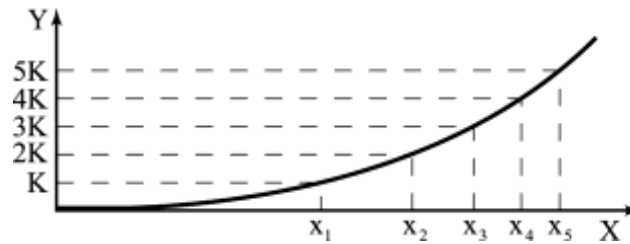


Рис. 5.7

Каждой  $x_n$  – координате  $n$ -й светлой полосы, отсчитанной от зажима пластины, соответствует величина отклонения участка пластины равная  $Kn$ , где  $K = \lambda(\cos \varphi_1 + \cos \varphi_2)^{-1}$ , а  $n = 1, 2, 3, \dots$ . Нормальное отклонение пластины на одну полосу для данной установки равна  $K = 0,34$  мкм/полосу. Таким образом, непосредственно измерив эти координаты, можно построить искомую зависимость  $Y(x)$  – профиль изгиба пластины.

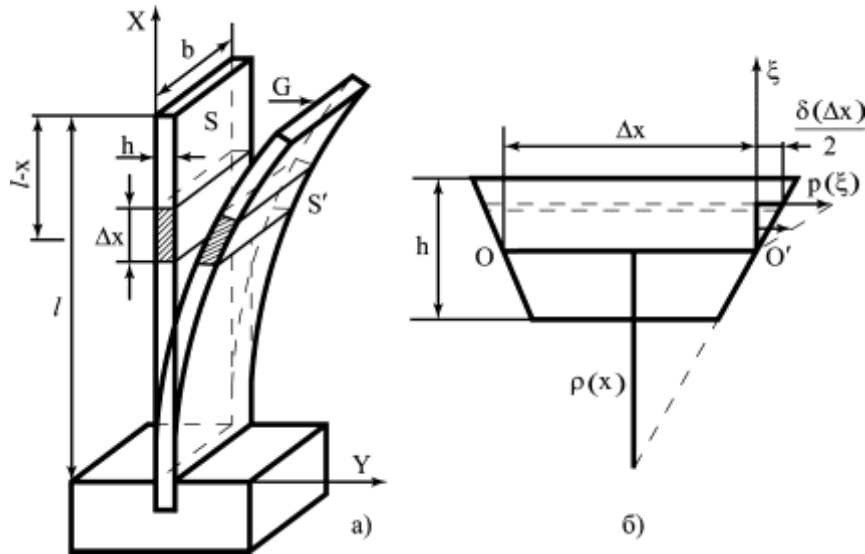


Рис. 5.8

Для сравнения экспериментально полученного профиля пластины с теоретическим, могут быть использованы формулы теории упругости. Выбранный участок пластины  $S$ , имеющий малый размер  $\Delta x$ , находится в равновесии. Воздействие соседних участков приводит не только к отклонению рассматриваемого участка, но и к его упругой деформации (рис. 5.8,а,б), причем одна часть участка растягивается относительно средней плоскости  $OO'$ , а другая сжимается. Напряжение  $p$  на границах участка зависит от вспомогательной координаты  $\xi$ , отсчитанной от средней плоскости  $OO'$ . По закону Гука



для любого сечения, находящегося на расстоянии  $\xi$  от средней плоскости  $OO'$

$p(\xi) = E \frac{\delta(\Delta x)}{\Delta x}$ , здесь  $\frac{\delta(\Delta x)}{\Delta x}$  - относительное удлинение, зависящие от  $\xi$  (рис. 5.8,б). Из

подобия треугольников  $\frac{\delta(\Delta x)}{\Delta x} = \frac{\xi}{\rho(x)}$ , где  $\rho(x)$  - радиус кривизны участка ( $\rho > h$ ). Тогда

$p(\xi) = E \frac{\xi}{\rho}$  есть линейная функция  $\xi$ . Вращающий момент сил, действующий на

участок, определяется как  $M = \int \xi \cdot dF(\xi)$ , где  $dF(\xi)$  - сила, действующая вдоль сечения,

расположенного на расстоянии  $\xi$  от средней плоскости. Очевидно, что

$dF(\xi) = p(\xi) \cdot b \cdot d\xi$ , так как  $b \cdot d\xi$  - площадь элемента границы рассматриваемого участка,

на который действует сила  $dF(\xi)$ . Тогда  $M = b \int_0^{h/2} \xi \cdot p(\xi) \cdot d\xi = \frac{Eh^3b}{12\rho}$ .

Этот момент должен быть равен по величине и противоположен по знаку моменту, действующему на элемент со стороны части пластины, находящейся под воздействием силы  $G$ . Ее плечо  $l - x$  (рис. 5.8,а), поэтому

$$G(l - x) = \frac{Eh^3b}{12\rho(x)}, \quad (5.6)$$

откуда

$$\rho(x) = \frac{Eh^3b}{12G(l - x)}. \quad (5.7)$$

Радиус кривизны  $\rho(x)$  графика функции  $y(x)$  при малой кривизне определяется из

уравнения  $\rho^{-1}(x) = \frac{d^2y}{dx^2}$ . После подстановки  $\rho(x)$  из (5.7) получим дифференциальное

уравнение

$$\frac{d^2y}{dx^2} = - \frac{12G \cdot (l - x)}{Eh^3b},$$

решение которого с учетом граничных условий  $y(x=0) = 0$ ,  $\left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=0} = 0$  дает

математическую зависимость, определяющую профиль пластины:

$$y(x) = - \frac{6Gx^2}{Eh^3b} \left( \frac{x}{3} - l \right). \quad (5.8)$$

При значениях  $x$  ( $x < l$ ) формулу (5.8) можно упростить:

$$y(x) = - \frac{6Gl}{Eb^3} x^2. \quad (5.9)$$

Деформирующая сила  $G$  неизвестна, ее нужно определить по результатам измерений.

### Порядок проведения эксперимента

**(ВНИМАНИЕ! Запрещается трогать голограмму и оптические поверхности зеркал и линз).**

#### Задание 1.

1. Используя осветитель, добейтесь одновременной видимости системы интерференционных полос и шкалы линейки на ее фоне.

2. Измерьте координаты центров светлых полос  $x_n$ , отсчитывая их от нижнего края пластины. Результаты запишите в таблицу.

№ полосы $n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Координата полосы $x_n$												
$Y_n = Kn$												

3. Рассчитайте нормальное смещение точек пластины  $Y_n$ , соответствующие каждой из  $n$  полос. Результаты запишите в таблицу.

4. Постройте график зависимости  $Y_n(x_n)$ . Определите погрешность измерений, нанесите эти погрешности на график.

#### Задание 2.

1. Для экспериментальных точек при  $x_n < l$  рассчитайте значение коэффициента

$$a_n = \frac{Y_n}{x_n^2}.$$

2. Рассчитайте среднее  $\langle a \rangle = \frac{\sum a_n}{n}$ .

3. Для сравнения постройте зависимость  $\langle a \rangle \cdot x_n^2$  от  $x_n$  на том же графике.

4. Считая, что  $\langle a \rangle = \frac{6Gl}{Ebh^3}$ , определите значение неизвестной силы  $G$ . Величина  $G$

составляет порядка десятков милли Ньютон.

### Контрольные вопросы

1. Для чего нужен когерентный фон (опорный луч) при голографической записи изображений?
2. Как производится восстановление голографического изображения?
3. В каком порядке дифракции наблюдается голографическое изображение?
4. Что произойдет с изображением, если перекрыть часть поверхности голограммы?
5. При записи интерферограммы рядом с пластиной был установлен предмет. Каким является изображение этого предмета – мнимым или действительным?
6. Почему при восстановлении интерферограммы мы наблюдаем систему полос, а при восстановлении обычной голограммы такие полосы не наблюдаются?