

Министерство высшего и среднего специального  
образования РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ С.П.КОРОЛЕВА

ГОЛОГРАФИЯ

Лабораторная работа  
(задание № 22-3, 22-4)

Куйбышев 1980

Лабораторная работа содержит задания по получению и исследованию свойств голограмм плоской и сферической волн. Дано теоретическое обоснование получения дифракционной решетки Рэлея, возникающей при голографировании плоской волны.

Работа предназначена для студентов УИ факультета для обеих специальностей.

Составители: О.А. Журавлев, Л.И. Федосова

Рецензент Л.П. Муркин

Утверждена редакционно-издательским  
советом института 9.01.80 г.

## ПРЕИМУЩЕСТВА ГОЛОГРАФИИ ПЕРЕД ФОТОГРАФИЕЙ

Фотография и голография – два метода записи информации о сцене, т.е. о пространственном расположении и форме какой-либо группы предметов. Фотографический процесс, кратко описанный ниже, впервые был разработан французским ученым Дагерром в 1839 году. При фотографировании сцены световая волна, исходящая от объектов сцены, фокусируется объективом на фоточувствительном материале (например, фотопластинке). Полученное изображение однозначно соответствует виду сцены с точки, где находится фотоаппарат.

Фоточувствительный материал реагирует на освещенность, которая пропорциональна квадрату амплитуды световой волны. После обработки фотопластинки на ней оказывается запечатленным так называемый негатив сцены, т.е. двумерное поле почернений, когда более ярким участкам фотографируемого объекта соответствует большая степень почернения негатива. Если изготовить негатив полученного негатива, то образуется так называемый позитив, на котором запечатлено прямое двумерное изображение сфотографированной сцены.

Спустя 110 лет английский физик Габор предложил способ фотографической записи трехмерного изображения сцены, который получил название "голография" (от греческого: голос – весть, графия – пишу, т.е. "полная запись"). Для получения голограммы какого-либо объекта на фотопластинку направляют две световые волны: волну, отраженную от объекта (эта волна называется предметной) и волну, когерентную с отраженной и имеющую простую форму волнового фронта. (Обычно это плоская волна, называемая опорной).

В результате интерференции предметной и опорной волн образуется сложная интерференционная картина, регистрируемая фотопластинкой. Проявленная и обработанная голограмма внешне выглядит как слабо засвеченная фотопластинка, поскольку интерференционные полосы являются очень тонкими (ширина их сравнима с длиной волны све-

та  $\lambda = 0,6$  мкм). Если же осветить голограмму светом, соответствующим опорной волне, то в результате взаимодействия этого света с системой интерференционных полос, находящихся на голограмме, возникает волна, теоретически тождественная первоначальной предметной волне. Иными словами, восстанавливается первоначальное изображение объектов, т.е. голограмма создает иллюзию реального трехмерного изображения сцены. В этом случае внешние контуры пластины — голограммы представляют собой как бы окно, через которое мы видим сцену.

Интерференционная картина, записанная на голограмме, может быть представлена как наложение интерференционных картин, создаваемых при взаимодействии опорной волны с волнами, исходящими от каждой точки объектов сцены, причем каждая такая картина занимает всю поверхность фотопластины.

Следовательно, любой участок голограммы образован действием световых волн от всех точек объекта в отличие от фотографии, где каждая точка объекта создает свое изображение на фотопластинке. Поэтому, например, каждый кусочек разбитой голограммы восстанавливает первоначальное изображение в том же виде, что и целая голограмма. Однако качество этого изображения будет хуже. Фотография же безвозвратно теряет информацию, если уничтожить какой-либо ее участок.

Другим принципиальным отличием голограммы от фотографии является то, что и негатив, и позитив голограммы при освещении опорной волной дают совершенно одинаковые трехмерные изображения объектов.

## ГОЛОГРАФИРОВАНИЕ ПЛОСКОЙ ВОЛНЫ

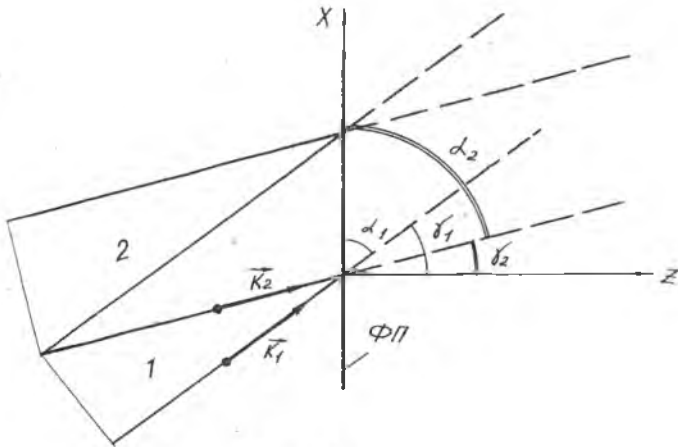


Р и с. I

Рассмотрим простейшую голограмму — голограмму плоской волны. Плоскую волну можно получить, если точечный источник света поместить в фокусе собирающей линзы (рис. I).

Пусть на пластинку падают две плоские монохроматические

волны: 1, характеризующаяся волновым вектором  $\vec{k}_1$ , и 2, характеризующаяся волновым вектором  $\vec{k}_2$  (рис. 2). Волну 1 считаем предметной, волну 2 - опорной.



Р и с. 2

Так как волны 1 и 2 когерентны, то в любой точке, которой они достигнут, будет возникать интерференционная картина. Мы будем для простоты предполагать, что обе волны одинаково линейно поляризованы. Расположим фотопластинку перпендикулярно плоскости распространения волн. Запишем уравнения волн 1 и 2 в экспоненциальной форме:

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= E_{01} \exp i \varphi_1 \\ E_2 &= E_{02} \exp i \varphi_2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Фазы волн

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1 &= \omega t - \vec{k}_1 \vec{r} + \varphi_{01} = \omega t - k(x \cos \alpha_1 + y \cos \beta_1 + z \cos \gamma_1) + \varphi_{01}; \\ \varphi_2 &= \omega t + \vec{k}_2 \vec{r} + \varphi_{02} = \omega t - k(x \cos \alpha_2 + y \cos \beta_2 + z \cos \gamma_2) + \varphi_{02}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$  и  $\alpha_2, \beta_2, \gamma_2$  - направляющие углы волновых векторов  $\vec{k}_1$  и  $\vec{k}_2$ , соответственно.

Выберем следующую систему координат: начало ее поместим на фотопластинке, ось  $x$  направим вдоль фотопластинки и параллельно

плоскости падения волн, ось  $z$  - перпендикулярно плоскости фото-  
пластинки. Тогда  $\beta_1 = \beta_2 = \frac{\pi}{2}$ ;  $\alpha_1 = \frac{\pi}{2} - \gamma_1$ ;  $\alpha_2 = \frac{\pi}{2} - \gamma_2$ , и уравнения волн  
в плоскости фотопластинки запишутся в виде

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= E_{01} \exp i(\omega t - kx \sin \gamma_1 - \varphi_{01}) \\ E_2 &= E_{02} \exp i(\omega t - kx \sin \gamma_2 - \varphi_{02}) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Согласно принципу суперпозиции для результирующей волны будем  
иметь

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2. \quad (4)$$

Известно, что освещенность фотопластинки пропорциональна  
квадрату модуля напряженности электромагнитной волны.

Если почернение пластинки пропорционально освещенности, то на  
негативе оно так же будет пропорционально квадрату модуля напря-  
женности волны.

На позитивной же пластинке коэффициент пропускания

$$T(x) \sim |\vec{E}|^2.$$

Используя соотношения (I) и (4), получим для коэффициента пропус-  
кания

$$\begin{aligned} T(x) &= B |\vec{E}_1 + \vec{E}_2|^2 = B (E_{01}^2 \exp i \varphi_1 + E_{02}^2 \exp i \varphi_2) [E_{01} \exp(-i \varphi_1) + \\ &+ E_{02} \exp(-i \varphi_2)] = B \{ E_{01}^2 + E_{02}^2 + E_{01} E_{02} [\exp i(\varphi_1 - \varphi_2) + \\ &+ \exp i(\varphi_2 - \varphi_1)] \}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $B$  - некоторая константа.

На основании формулы Эйлера запишем соотношение (5) в триго-  
нометрической форме:

$$\begin{aligned} T(x) &= B [E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02} \cos(\varphi_2 - \varphi_1)] = B \{ E_{01}^2 + E_{02}^2 + \\ &+ 2E_{01}E_{02} \cos [k(\sin \gamma_1 - \sin \gamma_2)x + \varphi_{02} - \varphi_{01}] \}. \end{aligned}$$

Выберем начало координат так, чтобы  $\varphi_{01} - \varphi_{02} = \frac{\pi}{2}$ , и введем  
обозначение

$$|k(\sin \gamma_1 - \sin \gamma_2)| = \frac{2\pi}{a}.$$

Учитывая, что волновое число  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ , получим

$$a = \frac{\lambda}{|\sin \gamma_1 - \sin \gamma_2|}. \quad (6)$$

Тогда

$$T(x) = B (E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02} \sin \frac{2\pi}{a} x). \quad (7)$$

Из уравнения (7) видно, что прозрачность пластинки меняется по синусоидальному закону по оси  $x$ .

Положение максимумов светлых полос на положительной пластинке согласно уравнению (7) описывается уравнением

$$\sin \frac{2\pi}{a} x_{\text{макс}} = 1,$$

из которого получаем

$$\frac{2\pi}{a} x_{\text{макс}} = (2n + \frac{1}{2})\pi, \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

Положение темных полос определяется уравнением

$$\sin \frac{2\pi}{a} x_{\text{мин}} = -1,$$

откуда

$$\frac{2\pi}{a} x_{\text{мин}} = (2n - \frac{1}{2})\pi.$$

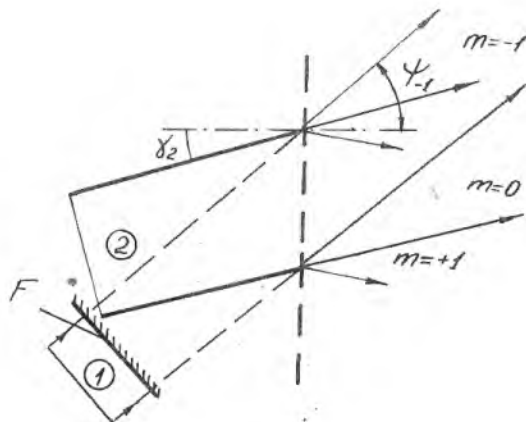
Таким образом, на фотопластинке получается система полос с периодом  $a$ , параллельных оси  $y$ .

Следовательно, голограмма плоской волны представляет собой систему параллельных полос с синусоидальным распределением прозрачности. Такая голограмма называется дифракционной решеткой Рэлея.

На отрицательной пластинке голограммы, очевидно, получается такая же система полос, сдвинутая на  $0,5a$  (там, где на положительной пластинке коэффициент пропускания максимален, на отрицательной — минимален).

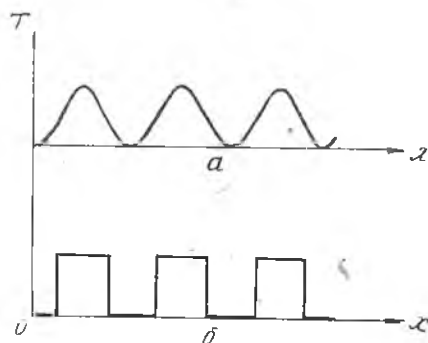
Рассмотрим процесс восстановления плоской волны I. Для этого поместим фотопластинку (голограмму) в то же место и в той же ориентации, в каких она экспонировалась, и направим на нее просвечивающую волну, идентичную опорной 2 (рис. 3), перекрыв волну I дифракцией  $F$ .

Поскольку голограмма плоской волны представляет собой дифракционную решетку, то справа от нее возникает набор плоских дифрагировавших волн. Отличие дифракции на решетке Рэлея с синусоидальным распределением прозрачности (рис. 4, а) от дифракции на обычной решетке со ступенчатым распределением прозрачности (рис. 4, б) состоит в том, что при дифракции на решетке Рэлея



Р и с. 3

получается только три максимума: нулевой, плюс и минус первого порядков ( $m = 0, \pm 1$ ).



Р и с. 4

чим (если  $\gamma_1 > \delta_2$ )

$$\psi_1 = \delta_1.$$

Таким образом, волна, распространяющаяся в направлении максимума порядка  $m = -1$ , идентична волне I. Следовательно, голограмма восстанавливает предметную волну. Восстановленная волна может отличаться от предметной только интенсивностью, по фазе и

Дифрагировавшие на голограмме волны подчиняются известному условию главных максимумов

$$a(\sin \gamma_2 - \sin \psi_m) = m\lambda,$$

где  $\psi_m$  - направление на главный максимум порядка  $m$ .

Запишем условие обозначения максимума  $m = -1$ :

$$a(\sin \gamma_2 - \sin \psi_1) = -\lambda. \quad (8)$$

Из уравнений (6) и (8) полу-



направлению распространения она совпадает с предметной. Это обстоятельство отражено на рис. 3 пунктирными линиями, которые являются продолжением лучей I в противоположном им направлении.

Так как в действительности почернение пластинки не строго пропорционально освещенности, то на получаемой голограмме коэффициент  $T(x)$  меняется по синусоидальному закону только приближенно.

## З а д а н и е № 2 2 - 3

### ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ГОЛОГРАММЫ ПЛОСКОЙ ВОЛНЫ

**Ц е л ь р а б о т ы:** изучение физических основ голографирования плоской волны, получение и восстановление голограммы волны, изучение характеристик дифракционной решетки Рэлея.

**П р и б о р ы и п р и н а д л е ж н о с т и:** голографический стол с оптическими элементами, гелий-неоновый одномодовый лазер, фотопластинки ЛОИ-2, секундомер, микрофотометр МФ-4.

### О п и с а н и е л а б о р а т о р н о й у с т а н о в к и

В состав установки входят:

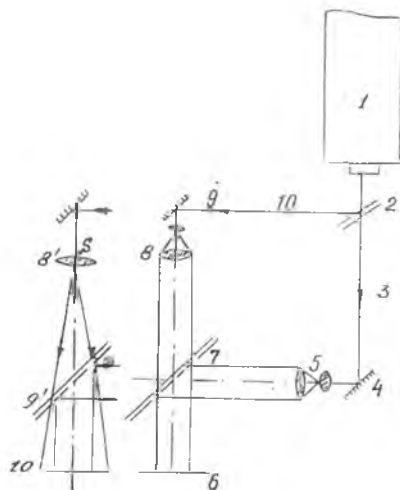
1 - голографический стол, состоящий из массивной металлической плиты, установленной на автомобильных камерах;

2 - одномодовый гелий-неоновый лазер ЛГ-3В ( $\lambda = 6328 \text{ \AA}$ );

3 - оптические элементы, включающие линзы, зеркала, светоразделительные пластинки (полупрозрачные зеркала).

Луч лазера I (рис. 5) с помощью полупрозрачного зеркала 2 расщепляется на два луча 3 и IO. Эти лучи направляются на зеркала 4 и 9. Луч 3, отразившись от зеркала 4, расширяется в телескопической системе 5 и образует опорную (плоскую) волну. С помощью полупрозрачного зеркала 7 опорный и предметный пучки накладываются друг на друга и падают перпендикулярно поверхности экрана 6.

При этом на экране образуется интерференционная картина, зависящая от формы волновой поверхности лучков, угла между ними.



Р и с. 5

П о р я д о к   в ы п о л н е н и я  
р а б о т ы

1. Включить лазер. Для этого необходимо:

- а) тумблером "Накал катода" подать напряжение на катод;
- б) через 2-3 мин включить тумблер "Высокое напряжение";
- в) через 0,5-1 мин нажать кнопку "Поджиг", должна возникнуть генерация направленного излучения.

2. Произвести юстировку оптической схемы установки. Добиться равномерного освещения плоскости экрана опорным и предметным пучками.

3. Совмещая предметный и опорные пучки, получить на экране интерференционную картину в виде дифракционной решетки. Дифракционную решетку на экране можно наблюдать визуально с помощью лупы.

4. Получить фотопластинку у преподавателя (узнать время экспонирования).

5. Закрывать луч лазера диафрагмой и поставить фотопластинку в рамку на место экрана.

6. Произвести экспонирование фотопластины.

7. Выключить лазер.

8. Произвести обработку фотопластины. (Поместить на 2-3 мин в проявитель, промыть водой, поместить в закрепитель на 2 мин, затем промыть и высушить).

9. Подготовить установку для восстановления голограммы. Включить лазер в соответствии с п. 1. Перекрыть предметный луч диафрагмой.

10. Установить голограмму на место экспонирования и восстановить предметную (плоскую) волну.

11. Ознакомиться с правилами работы на микрофотометре МФ-4 (инструкции на микрофотометр получить у лаборанта).

12. Укрепить голограмму на предметном столике микрофотометра и измерить период дифракционной решетки в трех участках голограммы. Данные занести в таблицу.

№ измерения	$a_1$ мм	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$
1						
2						
3						
Среднее значение						

13. С помощью микрофотометра для выбранных участков снять зависимость степени прозрачности  $T(x)$  дифракционной решетки по интервалам ее периода.

14. Построить график зависимости среднего значения (по трем измерениям) степени прозрачности дифракционной решетки по периоду

$a_{ср}$  .

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ГОЛОГРАММЫ  
СФЕРИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ

Теоретическая часть данной работы изложена в разделе "Физические принципы голографии" лабораторной работы "Голография" (задания 22-1, 22-2), 1978.

Ц е л ь р а б о т ы: изучение физических основ голографирования сферической волны, получение и восстановление голограммы сферической волны, измерение параметров зонной решетки.

П р и б о р ы и п р и н а д л е ж н о с т и: голографический стол с оптическими элементами, гелий-неоновый одномодовый лазер, фотопластинки ЛОИ-2, секундомер, компаратор МИР-12.

О п и с а н и е л а б о р а т о р н о й  
у с т а н о в к и

В данной работе применяется лабораторная установка, описанная в задании № 22-3. Единственное отличие оптической схемы (рис. 5) в том, что предметный пучок здесь расширяется не телескопической системой, а двояковыпуклой линзой  $B'$ . При этом луч  $IO$  сходится в фокусе линзы  $B'$ , образуя как бы светящуюся точку  $S$ . Источник  $S$  испускает сферическую волну с выпуклым волновым фронтом.

П о р я д о к в ы п о л н е н и я  
р а б о т ы

1. Включить лазер. Для этого проделать операции, указанные в п. 1 задания № 22-3.
2. Произвести юстировку оптической схемы установки.
3. Совмещая предметный и опорный пучки, получить на экране интерференционную картину в виде зонной решетки (концентрические кольца). Зонную решетку можно визуальво наблюдать на экране через лупу.
4. Повторить последовательно п. 4-9 задания № 22-3.

5. Установить голограмму на место экспонирования и восстановить предметную (сферическую) волну.

6. Ознакомиться с правилами измерений на компараторе (подробная инструкция дана в работе № 9 лабораторного практикума).

7. Измерить с помощью компаратора радиусы  $z_k$  пяти колец (начиная в  $k \geq 4$ ) зонной решетки. Данные записать в таблицу.

№ измерения	$k$	$z_k$	$R_i$	$\Delta R_i$	$\Delta R_i^2$
1					
2					
3					
4					
5					
Среднее значение					

8. Пользуясь формулой (I)\*, определить радиус  $R$  волнового фронта точечного источника (т.е. расстояние от голограммы до фокуса линзы  $g'$ ,  $a = R$ ).

9. Определить погрешность измерения  $R$ . Задавшись доверительной вероятностью  $\alpha = 0,9$ , определить по таблице коэффициент Стьюдента  $t_{\alpha n}$ , где  $n = 5$  (число измерений). Затем определить доверительный интервал  $\Delta R = S_R t_{\alpha n}$ , где

$$S_R = \sqrt{\frac{\sum \Delta R_i^2}{n(n-1)}}.$$

Окончательный результат записать в виде

$$R = R \pm \Delta R, \quad \varepsilon = \frac{\Delta R}{R} 100\%.$$

---

\*  $z_k^2 = 2ak\lambda + k^2\lambda^2$  (см. лабораторную работу "Голография" (задания № 22-1, 22-2). Для  $k < 10^2$  в расчетах можно пренебречь  $k^2\lambda^2$ .

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какое различие между голографией и фотографией?
2. Каким образом на фотопластинке можно зафиксировать амплитуду и фазу световой волны, рассеиваемой объектом?
3. Какие явления волновой оптики используются при записи голограммы и восстановлении с нее изображения?
4. Какую роль выполняет опорный луч в схеме?
5. Что представляет голограмма точки? Рассмотреть процесс получения голограммы точки.
6. Роль какого оптического элемента может выполнять голограмма точечного источника света?
7. Расскажите о восстановлении световой волны, записанной на голограмме точки.
8. Какие требования предъявляются к источникам света в голографии?
9. Почему голографическая установка расположена на массивной плите, установленной на амортизационной подушке?
10. Почему при голографировании не предъявляются повышенные требования к качеству оптических деталей установки?

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Л а н д с б е р г С.Г. Оптика. М., 1976, § 57-60, 67.  
С а в е л ь е в И.В. Курс общей физики. Т. 2. М., 1978.  
С о р о к о Л.М. Основы голографии и когерентной оптики. М., 1971.  
О с т р о в с к и й Ю.И. Голография. М., 1970.  
Г о р а х о в Ю.Г., Н е п л ю е в Л.Н. Голография в приборах и устройствах. М., 1974.  
Оптика и атомная физика. Под. ред. Р.И.Солоухина. Новосибирск, 1976.

Составители: Олег Анатольевич Журавлев, Лидия Ивановна Федосова

### ГОЛОГРАФИЯ

Лабораторная работа  
(задания № 22-3, 22-4)

Редактор Т.К. К р е т и н и н а  
Техн. редактор Н.М. К а л е н ь к  
Корректор Е.Д. А н т о н о в а

Подписано в печать 24.09.80г. Формат 60x84<sup>I</sup>/16  
Бумага оберточная белая. Печать оперативная.  
Усл.п.л. 0,93. Уч.-изд.л. 0,9. Тираж 1000 экз.  
Заказ № 5986 Бесплатно.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени  
авиационный институт имени С.П.Королева,  
г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

Областная типография имени В.П.Мяги.  
г. Куйбышев, ул. Венцека, 60.