

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЕЙСТВИТЕЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ГОЛОГРАММ В ОТРАЖЕННОМ СВЕТЕ

К. А. Стожарова и Г. Б. Семёнов

Приведены результаты экспериментов по восстановлению действительных изображений в отраженном свете с помощью рельефно-фазовых голограмм, зарегистрированных на сферической и плоской поверхностях. Разрешающая способность в изображении достигла 2.5 мкм, дифракционная эффективность — 40%. Показано, что при получении изображения с высоким разрешением предъявляются высокие требования к точности установки голограммы относительно опорного и восстанавливающего источников излучения.

В ряде практических применений голографии существует необходимость в получении действительных изображений высокого качества с помощью голограмм [1]. Для голограмм, восстанавливающих изображение в проходящем свете, этот вопрос проработан достаточно подробно как теоретически, так и экспериментально. Обычно такие голограммы регистрируют на галоидно-серебряной эмульсии и для восстановления изображения формируют волну, сопряженную опорной волне при записи голограммы [2].

В настоящей статье приводятся экспериментальные данные, подтверждающие возможность получения действительных изображений высокого качества с помощью голограмм, восстанавливающих изображение в отраженном свете. Наиболее подходящим способом реализации голограмм, восстанавливающих изображение в отраженном свете, является рельефно-фазовая голографическая запись на светочувствительных средах типа фоторезистов с последующим алюминированием поверхности [3]. Такой способ записи используется при получении голографических дифракционных решеток, однако он может быть распространен и на случай регистрации голограмм произвольных объектов. К достоинствам этого способа записи следует отнести достаточно высокую дифракционную эффективность (более 30%), сохраняемость голограмм в условиях изменяющейся температуры и влажности окружающей среды, отсутствие усадки слоя, высокую степень равномерности светочувствительного слоя по толщине, что подтверждается, в частности, исследованием качества волновых фронтов, формируемых плоскими голографическими дифракционными решетками [4]. Кроме того, рельефно-фазовая голографическая запись позволяет использовать для размножения голограмм метод получения реплик, разработанный для копирования дифракционных решеток.

Сказанное выше характеризует рельефно-фазовую голографическую запись как перспективный способ записи в тех случаях, когда голограмма является компонентом оптического прибора и подтверждает целесообразность изучения отображающих свойств таких голограмм. Особый интерес представляет формирование действительного изображения, поскольку в этом случае для регистрации восстановленного изображения не требуется вспомогательная оптика.

Теоретически возможность получения безабберационных действительных изображений протяженных объектов с помощью тонкослойных

голограмм, восстанавливающих изображение в отраженном свете, была исследована ранее для случая, когда голограмма зарегистрирована на поверхности второго порядка или на плоской поверхности [5]. Было показано, что для получения действительных изображений в этом случае необходимо располагать опорный и восстанавливающий источники относительно поверхности голограммы таким образом, чтобы любой из этих источников изображался поверхностью голограммы как зеркалом в другой источник.

В данной статье приведены результаты экспериментов по восстановлению действительных изображений в отраженном свете с помощью голограмм, зарегистрированных на плоской и сферической поверхностях, и приведены данные по оценке качества этих изображений.

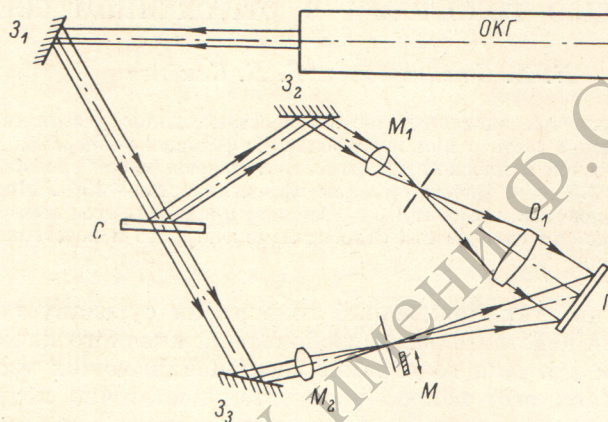


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема установки для регистрации голограмм и восстановления изображений.

На рис. 1 приведена принципиальная оптическая схема установки, на которой проводились исследования по восстановлению изображения с помощью голограмм, зарегистрированных на плоской поверхности.

В качестве источника излучения в этой схеме использовался аргоновый лазер ($\lambda = 488$ нм). Формирование пучков при регистрации голограммы осуществлялось с помощью зеркал Z_1 — Z_3 , светоделителя C , микробъективов M_1 и M_2 и коллиматорного объектива O_1 . При этом формировались две волны: плоская и сферическая. Аберрации обоих волновых фронтов не превышали величины $\lambda/4$.

В схеме предусматривалась возможность установки фотопластинки как по нормали к направлению распространения плоской волны, так и под углом к этому направлению. Объектом в этом случае служил точечный источник сферической волны.

На этой установке были зарегистрированы голограммы диаметром от 15 до 30 мм. Расстояние от объекта до голограммы составляло соответственно 350 и 100 мм. Голограммы регистрировались на светочувствительном слое хромированного шеллака [6], нанесенном на плоскую поверхность высококачественной подложки из оптического стекла. Толщина светочувствительного слоя составляла от 0.1 до 0.2 мкм. После «проявления» в слое формировалась рельефная голограмма, на поверхность которой наносился напылением в вакууме тонкий слой алюминия. С помощью изображенной на рис. 1 установки проверялось два случая восстановления безабберационного изображения в отраженном свете. В первом случае плоская опорная волна падала на фотопластинку по нормали к ее поверхности, а ось расходящегося пучка составляла угол 35° с нормалью к поверхности пластинки. Таким образом, средняя частота штрихов на голограмме была около 1200 мм^{-1} . Для восстановления безабберационного изображения в этом случае восстанавливающая пло-

ская волна распространялась в направлении нормали к поверхности голограммы [5]. Полученное действительное изображение имело вид дифракционной структуры, не искаженной аберрациями.

В другом случае плоская опорная волна при регистрации голограммы распространялась под некоторым углом относительно нормали к поверхности пластинки. Объектом, как и в первом случае, служил точечный источник излучения.

Безаберрационное изображение восстанавливалось в этом случае при освещении голограммы плоской волной когерентного излучения, падающей на голограмму под тем же углом, что и опорная волна при ее регистрации, но симметрично относительно нормали к поверхности голограммы [5].

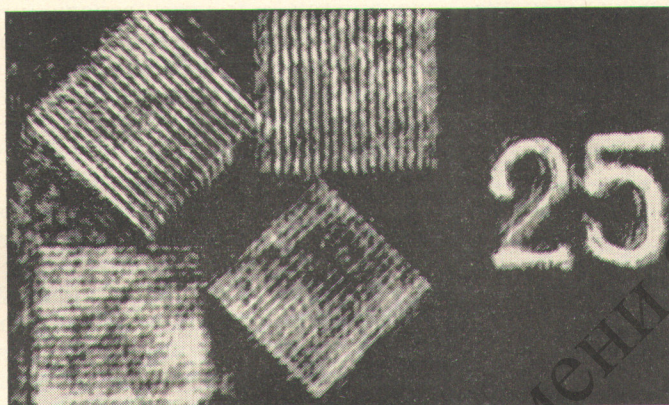


Рис. 2. Восстановленное изображение элемента миры № 1 с частотой штрихов 200 мм^{-1} .

Для подтверждения возможности получения высококачественного изображения протяженных объектов при восстановлении изображения в отраженном свете осуществлялась регистрация голограммы штриховой миры № 1. В этом случае мира M устанавливалась в расходящемся пучке лучей, как это показано на рис. 1. В восстановленном в отраженном свете изображении миры разрешались все элементы, включая элемент с наивысшей пространственной частотой штрихов 200 мм^{-1} . В качестве иллюстрации на рис. 2 приведен фрагмент восстановленного изображения миры — элемент с частотой штрихов 200 мм^{-1} . Вследствие отсутствия стандартных мир с частотой штрихов больше 200 мм^{-1} предельное разрешение в изображении оценивалось по восстановленному изображению точки. Для голограмм диаметром 30 мм и при расстоянии от точечного объекта до голограммы 100 мм разрешение в изображении, определяемое по критерию Рэлея, составило 2,5 мкм.

Регистрация голограмм на сферической поверхности и восстановление изображений в отраженном свете осуществлялись по схеме, которая была во многом аналогична схеме, изображенной на рис. 1.

Отличие заключалось в том, что объектив O_1 устраняли из схемы, а фотопластинку устанавливали таким образом, чтобы центр кривизны ее сферической поверхности совпадал с фокусом объектива M_1 . Объектом служила точка, сформированная объективом M_2 . Пространственная частота записи в центре голограммы составляла около 1200 мм^{-1} . Как и следовало ожидать [5], дифракционное изображение точечного объекта наблюдалось, когда восстанавливающий точечный источник был совмещен с центром кривизны сферической поверхности голограммы.

Таким образом, проведенные эксперименты подтверждают возможность восстановления высококачественного изображения в отраженном свете с помощью голограмм, зарегистрированных на плоской и сфери-

ческой поверхностях. Однако при этом предъявляются довольно высокие требования к точности установки голограммы относительно восстанавливающего источника. Эксперименты показали, что точность установки зависит от отношения диаметра голограммы к расстоянию от объекта до голограммы. Назовем это отношение апертурным углом пучка и будем характеризовать его в относительной мере. В частности, для голограмм с плоской поверхностью при апертурном угле объектного пучка 1 : 10 допустимая установка голограммы относительно параллельного восстанавливающего пучка составляет 3—4 угл. мин. При апертурном угле объектного пучка 1 : 5 допустимая неточность установки составляет 1—2 мин., а при угле 1 : 3 требуемая точность установки превышала 1 мин.

Установка голограмм со сферической формой поверхности относительно восстанавливающего пучка осложняется тем, что голограмма должна быть установлена не только под тем же углом к восстанавливающему пучку, как в случае восстановления изображения с помощью плоской голограммы, но, кроме того, центр кривизны сферической поверхности голограммы должен совпадать с точечным источником восстанавливающей волны. В результате при точности совмещения центра кривизны поверхности голограмм с восстанавливающим источником, равной 0.1 мм, требования к точности установки голограммы по углу оказались выше, чем для случая плоской голограммы, а именно около 1 угл. мин. для голограмм с апертурным углом, равным 1 : 8 и 1 : 10.

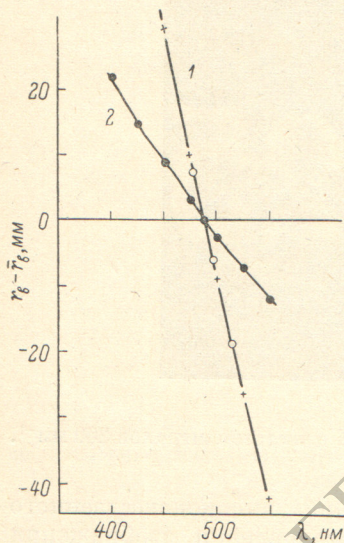


Рис. 3. Зависимость астигматической разности от длины волны восстанавливающего пучка. 1 — для пучка с апертурным углом 1 : 3, 2 — для пучка с апертурным углом 1 : 20.

Приведенные выше результаты по восстановлению изображения высокого качества с помощью голограммы в отраженном свете относятся к тому случаю, когда регистрация голограммы и восстановление изображения осуществляются на одной и той же длине волны. При восстановлении изображений на длине волны, отличной от длины волны, на которой голограмма регистрировалась, в изображении возникают aberrации. Как показали проведенные расчеты и эксперимент, основной aberrацией является астигматизм.

Расчет астигматической разности для различных длин волн проводился с помощью выражений, полученных для расчета aberrаций вогнутых голографических дифракционных решеток [7], поскольку для точечного объекта исследуемые голограммы можно рассматривать как разновидность голографической решетки.

На рис. 3 приведены две рассчитанные зависимости астигматической разности от длины волны восстанавливающего изображения источника излучения в пределах от 400 до 550 нм для случая, когда голограмма регистрировалась на плоской поверхности на длине волны 488 нм и имела среднюю пространственную частоту 1200 мм^{-1} .

Кривая 1 соответствует голограмме диаметром 30 мм и расстоянию от точечного объекта до плоскости регистрации голограммы 100 мм, кривая 2 — голограмме диаметром 15 мм и расстоянию от объекта до плоскости регистрации 350 мм. Кружками на том же рисунке нанесены значения астигматической разности, полученные экспериментально при восстановлении изображения на длинах волн 476.4, 488, 497 и 514.5 нм. Как видно, рассчитанные и экспериментальные данные хорошо совпадают.

Из приведенных кривых следует, что отличие длины волны, на которой восстанавливается изображение, от длины волны регистрации голограммы приводит к существенному ухудшению качества изображения, восстановленного в отраженном свете. Причем величина искажений существенно зависит от апертурного угла объектного пучка.

Существенным параметром голограмм является дифракционная эффективность. Из теории голографических дифракционных решеток следует, что дифракционная эффективность рельефных голограмм при восстановлении изображений в отраженном свете зависит от целого ряда факторов: от длины волны восстанавливающего источника, ориентации плоскости поляризации излучения, от частоты штрихов решетки и формы профиля штриха и т. д. В настоящей работе не преследовалась цель оптимизации дифракционной эффективности. Однако толщина светочувствительного слоя, условия его экспонирования и обработки были такими же, как при получении плоских голографических дифракционных решеток с пространственной частотой записи 1200 мм^{-1} [4]. При этом значения дифракционной эффективности, измеренные для голограмм, зарегистрированных на плоской и сферической поверхностях, составили около 40%.

Проведенные исследования показывают, что голограммы, восстанавливающие изображение в отраженном свете, позволяют получить действительное изображение с разрешением 2.5 мкм при дифракционной эффективности около 40%.

Литература

- [1] Р. Кольер, К. Берхарт, А. Лин. В кн.: Оптическая голография, 405. «Мир», М., 1973.
- [2] R. W. Meier. J. Opt. Soc. Am., 55, 987, 1965.
- [3] A. K. Rigler. J. Opt. Soc. Am., 55, 1693, 1965.
- [4] Р. Р. Герке, Е. Д. Воейкова, Г. И. Коваль, Т. Г. Дубровина. Оптико-механич. промышл., № 2, 1978.
- [5] Г. Б. Семенов, Р. Р. Герке. ЖТФ, 47, 839, 1977.
- [6] В. А. Вейденбах, Е. Д. Воейкова, Р. Р. Герке, Г. И. Коваль. Тез. докл. II Всес. конф. «Бессеребряные и необычные фотографические процессы», 112. Кишинев, 1975.
- [7] H. Noda, T. Namiooka, M. Seua. J. Opt. Soc. Am., 64, 1031, 1974.

Поступило в Редакцию 30 августа 1978 г.