

ФАЗОВЫЕ ГОЛОГРАММЫ МАЛОГО РАЗМЕРА  
ДЛЯ ХРАНЕНИЯ ДВОИЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ

А. А. Вербовецкий и В. Б. Федоров

Приводятся результаты экспериментов по записи двоичной информации на фазовые голограммы малого размера ( $\sim 1 \text{ мм}^2$ ). Фазовые голограммы формировались методом отбеливания амплитудных голограмм, выполненных на высокоразрешающих фотоэмульсиях. На голограмме диаметром 1.2 мм было записано около  $10^4$  двоичных знаков при эффективности восстановления 16% и отношении сигнал/шум не менее 27.

Голограммы малого размера ( $\sim 1 \text{ мм}^2$ ) используются для хранения двоичной информации в оптических запоминающих устройствах со страничной организацией [1]. Основными характеристиками таких голограмм являются: количество и плотность хранения двоичной информации, эффективность ее восстановления и отношение сигнал/шум в восстановленном изображении. Ввиду того что дифракционная эффективность фазовых голограмм значительно превосходит амплитудные и может теоретически достигать 100% [2, 3], то хранение двоичной информации на таких голограммах представляет значительный интерес [4-6].

В данной работе экспериментально исследовались характеристики фазовых голограмм малого размера, выполненных на отечественных высокоразрешающих фотоэмульсиях типа ВР, сенсibilизированных к красному свету. В качестве источника света использовался He-Ne лазер с длиной волны излучения 0.63 мкм. Фазовые голограммы получали методом отбеливания амплитудных голограмм. Обработка экспонированных фотопластинок сводилась к следующему: проявление в проявителе Д-19 (5 мин.), промывка в дистиллированной воде (1 мин.), фиксирование (5 мин.), промывка в дистиллированной воде (10 мин.), обработка в железосинеродистом отбеливателе — 16 г  $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6 + 14 \text{ г КВг}$  на 1 л дистиллированной воды (5 мин.), промывка в дистиллированной воде (10 мин.), пропитка в 50%-м изопропиловом спирте (2 мин.), пропитка в 90%-м изопропиловом спирте (2 мин.), сушка. Вся обработка проводилась при температуре  $20^\circ \text{C}$ .

Основные характеристики отбеленных фотоэмульсий: зависимость дифракционной эффективности  $\eta$  от экспозиции, частотно-контрастная характеристика, угловые дифракционные характеристики и модуляционная характеристика приведены на рис. 1. Для их получения на фотопластинках записывалась дифракционная решетка, получающаяся методом интерференции двух плоских волн. Все характеристики (за исключением частотно-контрастной) снимались при угле между интерферирующими пучками, равном  $40^\circ$ .

Максимальная дифракционная эффективность отбеленных голограмм достигалась при экспозициях, в 5-10 раз превышающих необходимые для амплитудных голограмм, и равнялась 59%. Частотно-контрастная характеристика почти не спадает вплоть до пространственной частоты 1500 л/мм. Дифракционная эффективность сравнительно слабо зависит от угловой ориентации фотопластинки.



Запись двоичной информации производилась по схеме, изображенной на рис. 2. Угол между опорным и сигнальным пучками был выбран равным  $40^\circ$ , при этом дифракционная эффективность восстановления падает до уровня 0.8 (рис. 1, а). Для записи голограмм на линейном участке характеристической кривой фотоэмульсии пластинка была смещена примерно на 2 мм от фокальной плоскости объектива, а интенсивность сигнального пучка составляла 14% от интенсивности опорного. При таком соотношении интенсивностей эффективность восстановления падала до уровня 0.7 (рис. 1, в). Таким образом, для выбранной схемы записи двоичной информации при оптимальной экспозиции можно ожидать эффективность восстановления около 33%.

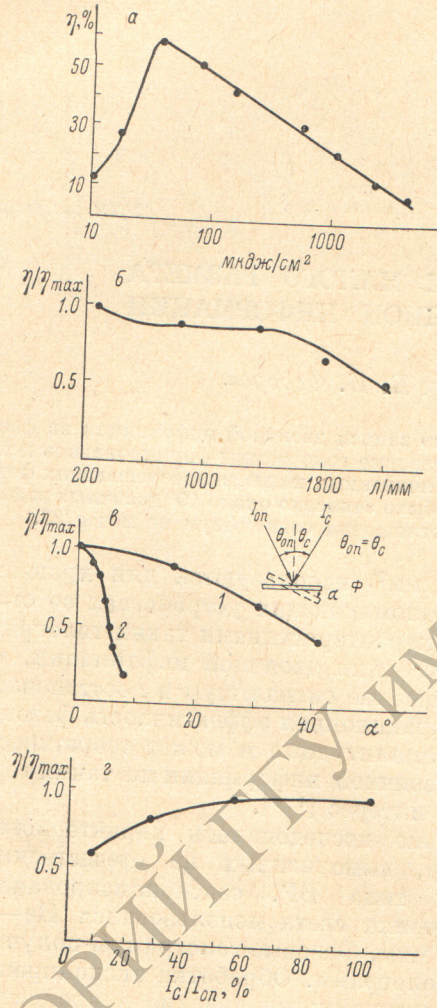


Рис. 1. Характеристики отбеленных фотоэмульсий.

а — зависимость дифракционной эффективности  $\eta$  от экспозиции; б — зависимость относительной дифракционной эффективности от пространственной частоты (частотно-контрастная характеристика); в: 1 — зависимость относительной дифракционной эффективности от ориентации биссектрисы угла между опорным ( $I_{\text{оп}}$ ) и сигнальным ( $I_c$ ) пучками относительно фотопластинки ( $\Phi$ ) (угловая дифракционная характеристика), 2 — зависимость относительной дифракционной эффективности от углового смещения восстанавливающего пучка от положения опорного пучка при записи (угловая дифракционная чувствительность); з — зависимость относительной эффективности от соотношения интенсивностей опорного и сигнального пучков (модуляционная характеристика).

Транспарант размером  $20 \times 20$  мм, используемый в эксперименте (рис. 3, а), содержит 9216 двоичных знаков, размещенных в виде квадратной матрицы  $96 \times 96$  прозрачных и непрозрачных круглых пятен на черном фоне. Наличие прозрачного пятна соответ-

ствует записи «единицы» двоичной информации, его отсутствие — «нуля». Диаметр пятна равен 120 мкм. Учитывая, что в нашей схеме голограмма малого размера осуществляет фильтрацию пространственных частот, можно оценить ее размер, достаточный для ка-

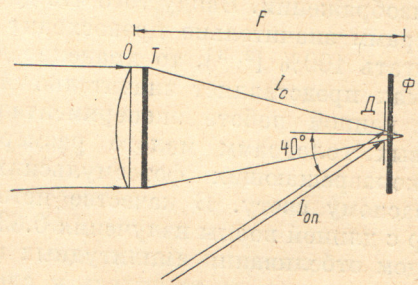


Рис. 2. Схема записи двоичной информации.

О — объектив, Т — транспарант, Д — диафрагма,  $\Phi$  — фотопластинка,  $F$  — фокусное расстояние объектива,  $I_c$  — сигнальный пучок,  $I_{\text{оп}}$  — опорный пучок.

чественного восстановления изображения транспаранта. Считая, как это принято в радиотехнике [7], что для пропускания сигналов необходимо, чтобы информационный канал имел полосу частот, заключающуюся между значениями частот, в которых спектр первый раз обращается в нуль, получим <sup>1</sup>

учитывая, что в нашей схеме голограмма малого размера осуществляет фильтрацию пространственных частот, можно оценить ее размер, достаточный для ка-

чественного восстановления изображения транспаранта. Считая, как это принято в радиотехнике [7], что для пропускания сигналов необходимо, чтобы информационный канал имел полосу частот, заключающуюся между значениями частот, в которых спектр первый раз обращается в нуль, получим <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Такая полоса частот в два раза превышает полосу, необходимую для разрешения восстановленных сигналов по критерию Аббе [8].



$$d = 2.44 \frac{\lambda F}{a},$$

где  $d$  — диаметр голограммы,  $\lambda$  — длина волны излучения лазера,  $F$  — фокусное расстояние объектива,  $a$  — диаметр пятен транспаранта.

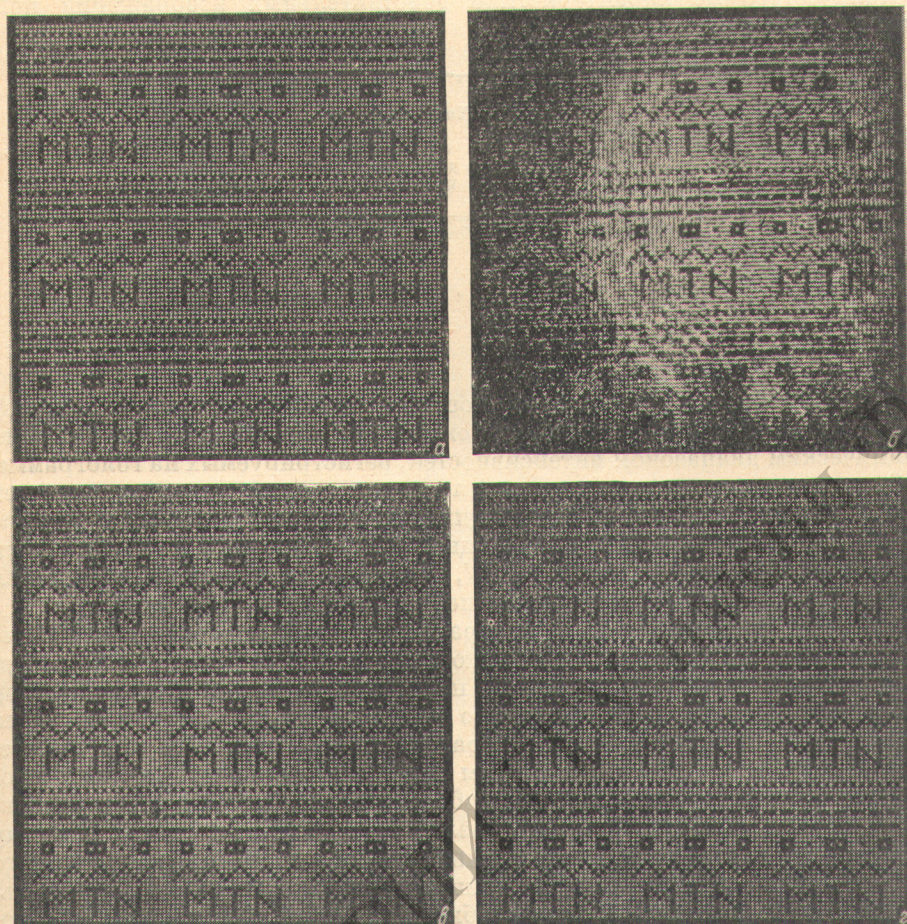


Рис. 3. Транспарант (а) и действительные изображения, восстановленные с голограмм диаметром 0,6 (б), 1,2 (в), 1,8 мм (г) соответственно.

Поскольку число двоичных знаков, записанное на квадратном транспаранте, равно

$$N = \frac{l^2}{a^2 k^2},$$

где  $l$  — линейный размер транспаранта,  $k$  — отношение минимального периода повторения пятен к их диаметру, получим

$$d = 2.44 \frac{\lambda F k \sqrt{N}}{l}.$$

Для нашей схемы записи величина  $d = 1.16$  мм, что соответствует плотности хранения информации  $0.68 \cdot 10^4$  дв. зн./мм<sup>2</sup>.

В экспериментах запись производилась на голограммы 0,6, 1,2, 1,8 мм. Размер голограмм ограничивался соответствующей диафрагмой, устанавливаемой в плоскости фотопластинки. На рис. 3, б, в, г представлены фотографии действительных изображений, восстановленных с голограмм. Как видно из приведенных фотографий, качество восстановленных изо-

СКОРИНЫ



бражений существенно улучшается при увеличении размера голограммы. Если в случае рис. 3, б форма пятен едва различима и наблюдается значительное изменение их яркости, то в случае рис. 3, г восстановленное изображение практически не отличается от исходного транспаранта (рис. 3, а).

Количественные характеристики действительных изображений приведены в таблице.

Диаметр голограммы, мм	Эффективность восстановления действительного изображения, %	Наименьшее отношение сигнал/шум в действительном изображении	Относительное изменение яркости пятен в восстановленном изображении
0.6	3	3	4
1.2	16	27	2
1.8	16	36	1.4

Дифракционная эффективность восстановления голограмм с двоичной информацией оказалась меньше, чем ожидалось. Это объясняется большим динамическим диапазоном интенсивностей, регистрируемых на голограмме.

Отношение сигнал/шум определялось как отношение интенсивностей света в положениях, соответствующих считыванию «единицы» и «нуля». Измерения производились с помощью перемещающегося в плоскости действительного изображения ФЭУ, задифрагмированного отверстием с диаметром, равным диаметру пятна транспаранта (120 мкм).

Во всех восстановленных изображениях наблюдалось уменьшение яркости пятен на краях по сравнению с центром. Это происходило вследствие расположения голограммы на некотором расстоянии от фокальной плоскости объектива, что приводило к потере света от крайних пятен транспаранта, а также из-за его неравномерного освещения при съемке.

При диаметре голограммы 0.6 мм вследствие высокого уровня пространственных шумов и большого разброса яркости пятен в восстановленном изображении не всегда можно различить «единицу» и «ноль». Поэтому этот диаметр голограммы меньше минимального диаметра, необходимого для считывания информации. Из приведенных данных можно заключить, что для считывания информации необходимо запись производить на голограмму диаметром 1.2 мм (это хорошо совпадает с нашей оценкой), при этом эффективность восстановления достигает 16%, а наименьшее отношение сигнал/шум — 27.

В заключение следует отметить, что эффективность восстановления можно увеличить до 19% при устранении отражения от поверхностей фотопластинки.

При использовании для записи более короткофокусного объектива можно при необходимости увеличить плотность хранения двоичной информации в несколько раз.

#### Литература

- [1] F. M. Smits, L. E. Gallaher. *Bell Syst. Techn. J.*, 46, 1267, 1967.
- [2] Ю. Н. Денисюк. *Опт. и спектр.*, 15, 522, 1963.
- [3] J. C. Urbach, R. W. Meier. *Appl. Opt.*, 8, 2269, 1969.
- [4] K. S. Pennington, S. Harper. *Appl. Opt.*, 9, 1643, 1970.
- [5] C. B. Burckhardt, E. T. Doherty. *Appl. Opt.*, 8, 2479, 1969.
- [6] L. H. Lin. *Appl. Opt.*, 8, 963, 1969.
- [7] А. А. Харкевич. *Спектры и анализ*. Физматгиз, М., 1962.
- [8] М. Борн, Э. Вольф. *Основы оптики*. Изд. «Наука», М., 1970.

Поступило в Редакцию 27 января 1971 г.