

В. И. БОГАЧЕВ, А. А. ЖДАНОВ, В. Г. МОКЕРОВ
(Москва)

ЗАПИСЬ И СЧИТЫВАНИЕ ГОЛОГРАММ НА РАЗЛИЧНЫХ ДЛИНАХ ВОЛН В СХЕМЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ЗУ

При разработке голографических запоминающих устройств (ГЗУ) в ряде случаев требуется создание оптической схемы, в которой запись и считывание голограмм должны производиться на различных длинах световой волны. Это связано с наличием определенного класса перспективных реверсивных сред для ГЗУ, для применения которых необходимо соблюдение указанного условия [1]. Авторами работ [2, 3] было показано, что при считывании голограмм на длине волны света, отличной от длины волны записи, должны возникать деформация и смещение восстановленного изображения, накладывающие дополнительные ограничения на объем памяти. Однако, судя по литературным данным, к настоящему времени отсутствует детальная экспериментальная проверка выполненного расчета и не сделан выбор конкретной оптической схемы ГЗУ, обеспечивающей работу на различных длинах волн. Решению этих вопросов и посвящена данная работа. Здесь рассмотрены требования к оптической схеме ГЗУ, способной работать на различных λ , произведен геометрический расчет узлов записи и считывания информации, представлены детальные экспериментальные результаты по исследованию искажений изображения, восстановленного с различных голограмм матрицы ГЗУ с длиной волны, отличной от длины волны записи.

Прежде чем перейти к расчетному и экспериментальному анализу конкретной оптической схемы ГЗУ, необходимо выбрать схему, удовлетворяющую вышеотмеченному требованию. Пусть запись голограмм в ГЗУ производится по схеме, приведенной на рис. 1, а, где дан ход лучей при регистрации двух голограмм (1 и 2) в матрице ГЗУ. Углы падения центральных лучей сигнальных пучков на голограммах 1 и 2 обозначим α'_c и α''_c , а угол падения опорного луча α_0 одинаков для обеих голограмм. Запись голограмм производится на длине волны λ_1 . Поскольку запись этих голограмм осуществляется при различных углах между пучками, то интерференционная картина, создаваемая в плоскости голограмм, будет иметь разный период. Обозначим эти периоды

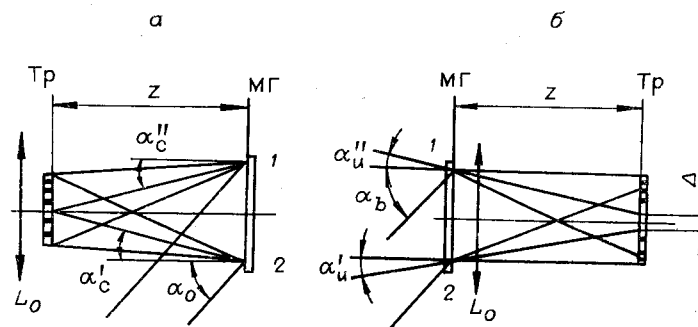


Рис. 1. Схема голографического ЗУ:
а — запись матрицы голограмм с изменяющимся углом падения сигнального пучка; б — считывание матрицы голограмм.

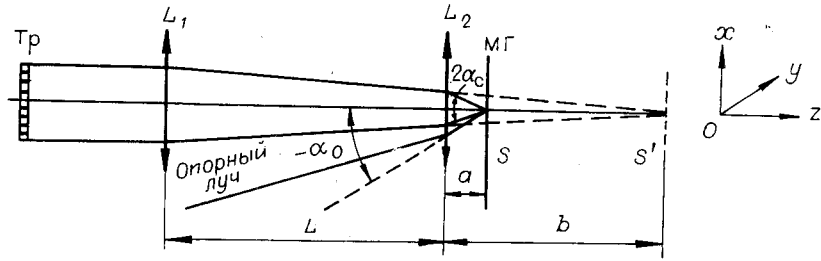


Рис. 2. Запись матрицы голограмм с постоянным углом падения сигнального пучка.

для голограмм 1 и 2 как d_1 и d_2 соответственно. Можно легко показать, что при восстановлении голограмм пучком с длиной волны λ_2 , распространяющимся под некоторым углом α_B , изображения, восстановленные с различных голограмм, будут смещены на величину (см. рис. 1, б)

$$\Delta = z [\text{tg arcsin}(\lambda_2/d_1 - \sin \alpha_B) - \text{tg arcsin}(\lambda_2/d_2 - \sin \alpha_B) - \text{tg arcsin}(\lambda_1/d_1 - \sin \alpha_0) + \text{tg arcsin}(\lambda_1/d_2 - \sin \alpha_0)]. \quad (1)$$

Здесь z — расстояние между плоскостью транспаранта (Tr) и плоскостью матрицы голограмм (MГ). Из этого выражения следует, что, во-первых, Δ обращается в нуль, если $d_1 \neq d_2$, но $\lambda_1 = \lambda_2$ и $\sin \alpha_B = \sin \alpha_0$, во-вторых, Δ обращается в нуль, если $d_1 = d_2$ при любых прочих условиях. Для нас, несомненно, представляет интерес лишь второй случай, и поэтому условие $d_1 = d_2$ можно принять в качестве определяющего при выборе схемы голографического ЗУ, работающего на двух длин волн.

Проанализируем работу схемы такого типа [4], узлы записи и считывания которой представлены на рис. 2 и 3. Введем следующие обозначения (см. рис. 2): a — расстояние от главной плоскости объекта L_2 до плоскости регистрации (S) матрицы голограмм; b — расстояние от главной плоскости объектива L_2 до мнимого изображения плоскости регистрации (S') матрицы голограмм; L — расстояние между главными плоскостями объектов L_1 и L_2 ; $2\alpha_c$ — угол схождения сигнального пучка; α_0 — угол падения опорного пучка; λ_1 — длина волны при записи матрицы голограмм. В данной схеме в качестве объективов L_1 и L_2 используются объективы, у которых передняя и задняя главные плоскости совпадают.

Восстановление матрицы голограмм производится на длине волны λ_2 по схеме, представленной на рис. 3, причем опорный и восстанавливающий лучи распространяются в одной и той же плоскости (xOz). Координата (по x) точки восстановленного изображения дается выражением

$$x_n = ((a(b+f))/b) \text{tg } \alpha_n, \quad (2)$$

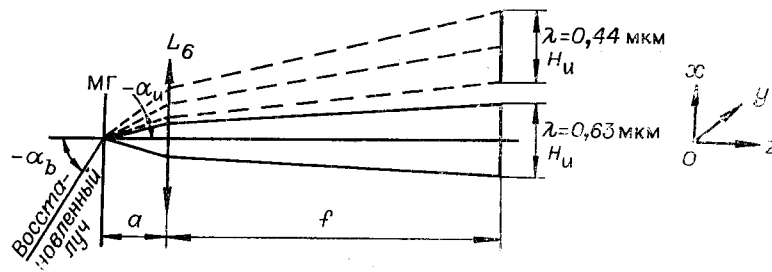


Рис. 3. Считывание матрицы голограмм.

где $\operatorname{tg} \alpha_{\text{н}}$ находится из соотношения

$$-\sin \alpha_{\text{н}} = \sin \alpha_{\text{в}} - (\lambda_2/\lambda_1) \sin \alpha_0 + (\lambda_2/\lambda_1) \sin \alpha_{\text{с}}. \quad (3)$$

Здесь $\alpha_{\text{н}}$ — угол между оптической осью и направлением дифрагированного луча длиной λ_2 , восстанавливающего точку изображения с координатой $x_{\text{н}}$; $\alpha_{\text{в}}$ — угол падения восстанавливающего пучка. Для координаты данной точки восстановленного изображения по оси y имеем

$$y_{\text{н}} = -\frac{a(b+f)}{b} \frac{\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \sin \alpha_{\text{с}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \sin \alpha_{\text{с}}\right)^2}}. \quad (4)$$

Искажения δ восстановленного изображения при симметричном расположении транспаранта относительно оптической оси равны

$$\delta = \frac{a(b+f)}{b} |\operatorname{tg} \alpha_{\text{н}}| - \frac{a(b+f)}{b} \operatorname{tg} \arcsin \left| \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \sin \alpha_{\text{с}} - \sin \alpha_{\text{в}} \right| - \frac{\lambda_2 a(b+f)}{\lambda_1 b} |\operatorname{tg} \alpha_{\text{с}}|, \quad (5)$$

где первый член справа — координата точки восстановленного изображения пучком с длиной волны $\lambda_2 \neq \lambda_1$; второй член справа — величина смещения центра восстановленного изображения относительно оптической оси и третий член соответствует координате точки идеального изображения (изображения, восстановленного пучком с λ_1) в масштабе λ_2/λ_1 .

Исходя из выражения (5) можно показать, что наименьшее искажение транспаранта, расположенного симметрично относительно оптической оси, возникает при $\sin \alpha_{\text{в}} = (\lambda_2/\lambda_1) \sin \alpha_0$. Определим допустимый угловой размер сигнального пучка для этого случая, задаваясь величиной допустимых искажений $l/4$ (в согласии с литературными данными), где l — размер бита:

$$\alpha_{\text{с}} \leq \left\{ \frac{3l}{4 \frac{a(b+f)}{b} \left[\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^3 - \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right]} \right\}^{1/3}. \quad (6)$$

Хотелось бы подчеркнуть, что указанную оценку, как и в данном случае, необходимо делать по отношению к размеру бита, а не к шагу (периоду) транспаранта, поскольку в общем случае эти параметры транспаранта могут быть разными, а величина сигнала фотоприемника непосредственно определяется относительным расположением светового пятна и площадки (бита) фотоприемника.

В качестве исходных данных при расчете использовались характеристики объектива «Индустар-51» с $f=210$ мм. Исходя из геометрических соображений размер a был выбран равным 26 мм, расстояние между главными плоскостями объективов $L=175$ мм, а синус угла падения опорного пучка — 0,4. Размер рабочего транспаранта равнялся $22,5 \times 22,5$ мм², размер бита — 200, шаг — 500 мкм. Используя выражение (6), получаем, что $\alpha_{\text{с}} \leq 0,1$. В нашем случае угловой размер транспаранта не превышал допустимой величины. Следовательно, величиной искажений восстановленного изображения при условии $\sin \alpha_{\text{в}} = (\lambda_2/\lambda_1) \sin \alpha_0$ можно пренебречь.

Оценим величину искажений восстановленного изображения для случая $\sin \alpha_{\text{в}} = \sin \alpha_0$. Результаты этих оценок сведены в табл. 1.

Отметим, что различие размеров исходного объекта и его восстановленного изображения в случае $\lambda_1 = \lambda_2$ обусловлено конечной толщиной объективов. Последнее приводит к тому, что коэффициент $[a(b+f)]/b$ в выражении (2) становится отличным от f . Кроме того, при

Таблица 1

Координата точки транспаранта, мм	Координата точки изображения								$\delta(\lambda=0,44)$, мкм		
	расчетная				экспериментальная						
	$\lambda_2=0,44$ мкм		$\lambda_2=0,63$ мкм		$\lambda_2=0,44$ мкм		$\lambda_2=0,63$ мкм		δ_x (расчетное)	δ_x (экспериментальное)	δ_y
	$x_{и}$	$y_{и}$	$x_{и}$	$y_{и}$	$x_{и} + \frac{x_3}{2}$	$y_{и} + \frac{y_3}{2}$	$x_{и} + \frac{x_3}{2}$	$y_{и} + \frac{y_3}{2}$			
11,25	16,365	-9,165	-13,100	-13,100	9,187	9,086	13,088	13,095	85	101	0
8,25	18,820	-6,720	-9,600	-9,600	6,735	6,657			75	78	0
5,25	21,325	-4,270	-6,100	-6,100	4,294	4,252			20	42	0
0	25,615	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-5,25	29,815	4,270	6,100	6,100	4,324	4,251			70	73	0
-8,25	32,500	6,720	9,600	9,600	6,842	6,657			165	185	0
11,25	35,035	9,165	13,100	13,100	9,397	9,094	13,094	13,090	255	303	0

Примечание: $x_3(\lambda_2=0,44)=1,238$ мм, $y_3(\lambda_2=0,44)=-1,228$ мм; $x_3(\lambda_2=0,63)=1,743$ мм, $y_3(\lambda_2=0,63)=1,740$ мм.

$\sin \alpha_0 = \sin \alpha_n$ происходит увеличение искажения восстановленного изображения по оси x . При использовании транспаранта с размерами, превышающими допустимые, и в случае считывания под углом записи возникают искажения, которые приводят к ограничению объема памяти. Увеличение объема памяти может быть достигнуто при введении поправки на топологию транспаранта или фотоприемной матрицы.

Экспериментальные измерения проводились на специально собранном макете, схема которого представлена на рис. 4. Запись голограмм осуществлялась He-Ne лазером (ЛГ-36А) с $\lambda_1=0,6328$ мкм, считывание выполнялось на двух длинах волн $\lambda_2: 0,6328$ и $0,44$ мкм (He-Cd лазер ЛГ-31). На рисунке ППЗ — полупрозрачное зеркало — расщепитель пучка, в качестве элементов L_3, L_4, L_5 и L_6 использовались промышленные объективы «Индустар-51» с относительным отверстием

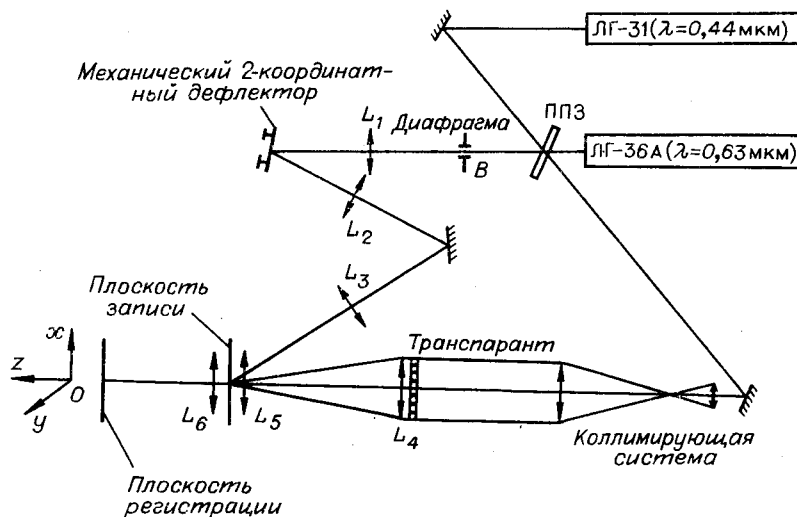


Рис. 4. Экспериментальная схема записи и считывания матрицы голограмм на двух длинах волн.

1:4,5 и фокусным расстоянием 210 мм. Транспарант представлял квадратную матрицу размером 22,5·22,5 мм² с размером элемента (бита) 200 и шагом 500 мкм. При записи матрицы голограмм один из лучей (сигнальный) после расщепителя освещает рабочий транспарант, а другой направляется на диафрагму *B*, изображение которой с помощью объективов *L*₁, *L*₂, *L*₃ и *L*₄ переносится в плоскость записи голограмм, где происходит совмещение сигнального и опорного пучков. Размер голограммы определяется диаметром диафрагмы (0,8 мм). Для обеспечения равномерности освещенности по полю голограммы было осуществлено смещение плоскости записи относительно эквивалентной фокальной плоскости пары объективов *L*₄ и *L*₅. Постоянство угла между опорным и сигнальным пучками при записи различных голограмм было реализовано за счет того, что в процессе записи ход лучей оставался неизменным, а перемещение регистрирующего материала осуществлялось по двум координатам при переходе от одной голограммы к другой. В качестве регистрирующего материала использовались фотопластины типа 8E75. Восстановление матрицы голограмм производилось с помощью зеркального дефлектора, расположенного в фокальной плоскости объективов *L*₁ и *L*₂ одновременно на двух длинах волн, поскольку изображения двух цветов (красное и голубое) не перекрывались.

При исследовании восстановленных изображений было обращено внимание на их относительные смещения и трансформацию для считывания с различных голограмм. Смещение изображений в плоскости регистрации (в фокальной плоскости объектива *L*₆) с различных голограмм фиксировалось визуально микроскопом с реперной отметкой. Было установлено, что максимальное смещение изображения при переходе от центральной голограммы к краевой при $\lambda=0,6328$ мкм не превышало 20 мкм. В случае $\lambda=0,44$ мкм соответствующее смещение составляло 50 мкм. Такое увеличение смещения при переходе от $\lambda=0,6328$ мкм к $\lambda=0,44$ мкм, по-видимому, связано с хроматической аберрацией объектива «Индустар-51». Изображения, одновременно восстановленные на двух длинах волн, фотографировались в плоскости регистрации. Размеры полученных изображений измерялись на микроскопе УИМ-23. Погрешность измерений составляла ± 20 мкм. Результаты этих измерений представлены в табл. 1, где приведены экспериментальные значения для координат восстановленного изображения центральной, крайних и четырех промежуточных точек транспаранта. В таблице также приведены величины искажений $\delta_{x \text{ змс}}$ и $\delta_{y \text{ змс}}$, которые определялись как $x_i - y_i$. Согласно представленным результатам, максимальные искажения при $\lambda_2=0,44$ мкм соответствуют краям изображения и составляют 101 и 303 мкм. Как видно из табл. 1, в пределах указанной погрешности измерений (± 20 мкм) имеется удовлетворительное согласие для расчетных и экспериментальных значений.

Результаты измерений по восстановлению голограмм под углом $\sin \alpha_c = (\lambda_2/\lambda_1) \sin \alpha_0$ и при условии $\alpha_c < 0,1$ представлены в табл. 2.

Из таблицы непосредственно следует, что в этом случае в согласии с приведенным выше расчетом искажений изображений не наблюдается (в пределах погрешности измерений).

Таким образом, в результате выполненной работы дан краткий анализ оптических схем для ГЗУ, работающих на разных длинах волн. Показано, что для этой цели можно использовать оптическую схему с постоянным углом между опорным и сигнальным пучками. Рассмотрены искажения изображения транспаранта при считывании разными длинами волн. Экспериментальные результаты исследования искажений

Таблица 2

λ , мкм	x_1 , мм	x_2	x_3	y_1 , мм	y_2	y_3
0,44	8,469	8,471	1,231	8,474	8,472	1,229

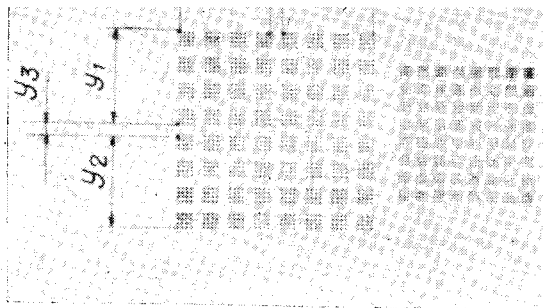


Рис. 5. Изображения транспаранта, восстановленные с голограммы на двух длинах волн.

использования транспаранта с размерами, не превышающими допустимые, и при восстановлении голограмм под углом таким, что $\sin \alpha_B = (\lambda_2/\lambda_{10}) \sin \alpha_0$, трансформация изображения не наблюдается и при этом появляется дополнительный канал считывания (рис. 5). В случае равенства углов записи и считывания наблюдаются искажения восстановленного изображения по оси x . Максимальная величина искажения при этом

получается равной 303 мкм, что превышает допустимую величину. При этом ограничение на величину объема записываемой информации можно снять, вводя поправку на топологию транспаранта или фотоприемной матрицы. Максимальное смещение изображения при восстановлении с разных голограмм, обусловленное наличием aberrаций используемых объективов, равно 50 мкм и не превышает допустимой величины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bordogna I., Keneman S. A., Amodei I. I. Recyclable holographic storage media.— "RCA Rev.", 1972, vol. 33, N 1, p. 227—247.
2. Миорчук М. А., Самойлов В. Д. Информационная емкость запоминающего устройства при записи и считывании голограмм источниками с различными длинами волн излучения.— «Квантовая электроника», 1974, № 3, с. 609—614.
3. Миняков В. Г., Федоров В. Б. Aberрации поля изображения и информационная емкость микроголограмм при записи и считывании источниками излучения с различными длинами волн.— «Опт. и спектр.», 1975, т. 39, вып. 5, с. 951—955.
4. Hill B. Some aspects of a large capacity holographic memory.— "Appl. Opt.", 1972, vol. 11, N 1, p. 182—191.

Поступила в редакцию 15 октября 1976 г.,
окончательный вариант — 11 февраля 1977 г.

УДК 681.84

А. КОРПЕЛЬ
(Чикаго, США)

ОБЗОР ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВИДЕОДИСКА

Большинству инженеров-оптиков представляется очевидным, что только сфокусированный лазерный луч является достаточно тонким, чтобы им можно было считывать видеодиск. Чтобы убедиться в этом, кратко рассмотрим некоторые параметры видеодиска. Получасовая теле-