

емкости. Например, если для ГЦЗУ с общей емкостью 10^8 бит выбрать параметры, соответствующие двум значениям S , равным соответственно 1 и 2, то в первом случае требуется линза с фокусным расстоянием 45 см, а во втором — 450 см (см. табл. 2), т. е. габариты будут различаться на порядок.

Если какие-либо параметры, рассчитанные по данной схеме, не могут быть реализованы на практике, например, из-за отсутствия линз с требуемым апертурным числом и фокусным расстоянием или невозможности записи с максимальной плотностью из-за недостаточной разрешающей способности регистрирующей среды и т. д., тогда следует выполнить перерасчет параметров по той же расчетной схеме (20), только вместо соотношений (20а) необходимо пользоваться соотношением (16), которое обладает дополнительной степенью свободы. Выбирая комбинацию (β, S) , отличной от оптимального выражения (18), можно скорректировать систему так, чтобы она в достаточной степени удовлетворяла всем предъявляемым требованиям. Однако надо иметь в виду то обстоятельство, что это достигается за счет понижения плотности записи при одновременном увеличении габаритов системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. P. Graf, M. Lang. Geometrical Aspects of Consistent Holographic Memory Design.— "Appl. Opt.", 1972, v. 11, № 6.
2. T. Inagaki, P. Furukawa, V. Nishimura. Capacity of Page Oriented Hologram Memory.— "FUITSU Scientific Tech. J.", 1973, March.
3. M. Lang. Holographische Datenspeicher Mit Kapazitäten von Mehr Als 10^8 Bit.— "Optik", 1973, v. 37, № 5.
4. A. V. Lugt. Design Relationships for Holographic Memories.— "Appl. Opt.", 1973, v. 12, № 7.
5. Р. Кольер, К. Беркхарт, Л. Лин. Оптическая голография. М., «Мир», 1973.
6. А. Л. Микаэлян, В. И. Бобринев, А. А. Аксельрод, С. М. Наумов, М. М. Коблова, Э. А. Засовин, К. И. Куштанин, В. В. Харитонов. Голографическое запоминающее устройство с записью информации массивами.— «Квантовая электроника», 1971, № 1.
7. D. Chen, O. N. Tuite. Optical Memories Controlling the Beam.— "IEEE Spectrum", 1973, v. 10, № 3.
8. B. Hill. Some Aspects of a Large Capacity Holographic Memory.— "Appl. Opt.", 1972, v. 11, № 1.

*Поступила в редакцию 28 марта 1974 г.,
окончательный вариант — 19 сентября 1974 г.*

УДК 771.531.37 : 772.99

И. С. ГИБИН, Е. Ф. ПЕН, А. В. ТРУБЕЦКОЙ

(Новосибирск)

МЕТОДИКА ВЫБОРА УСЛОВИЙ ЗАПИСИ ГОЛОГРАММ

Введение. При выборе режима записи голограмм наиболее часто используется T_a-E (амплитудное пропускание — экспозиция) характеристика фотоматериала [1] или ей подобная $\phi-E$ (фаза — экспозиция). В этом случае не учитывается влияние на свойства голограмм эффектов фазовой и амплитудной модуляции регистрирующего материала, пространственной частоты интерференционной картины, толщины и эффектов усадки фотоматериала и т. д. Поэтому наблюдается существенное расхождение экспериментальных и расчетных данных.

Большее соответствие этих данных для широкого класса регистрирующих материалов и типов голограмм можно получить, если выбирать условия голографической записи исходя из зависимости дифракционной эффективности голограммы от средней экспозиции и контраста интерференционных полос [2].

Однако указанная зависимость мало пригодна в тех случаях, когда средняя экспозиция и контраст полос меняются по поверхности голограммы. В этом случае при выборе условий записи более удобно пользоваться зависимостью дифракционной эффективности голограмм не от средней экспозиции и контраста полос, а от экспозиции сигнальной волны (при фиксированной экспозиции опорной волны), поэтому целесообразно использовать характеристику вида

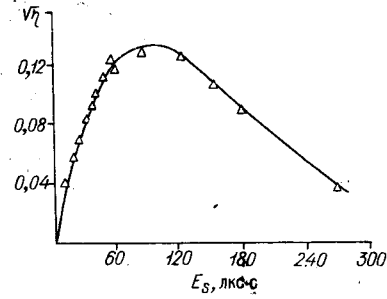


Рис. 1.

$$\sqrt{\eta} = f(E_s, E_0 = \text{const}), \quad (1)$$

где η — дифракционная эффективность голограммы (отношение интенсивности света в первом порядке дифракции к интенсивности света, падающего на голограмму), E_s и E_0 — экспозиции сигнальной и опорной волн [3]. Особенностью указанной характеристики является то, что она отражает связь амплитуды восстановленной сигнальной волны с амплитудой той же волны при записи голограммы. Это позволяет более точно определять необходимые условия голографической записи.

В данной работе описана методика выбора условий записи голограмм с использованием характеристики вида (1), получаемой экспериментальным путем. При заданном распределении значений E_s по зависимости (1) с хорошей достоверностью определяется соответствующее распределение амплитуд восстановленной сигнальной волны, а также такие характеристики восстановленного изображения, как яркость и соотношение сигнал/фон. Данное обстоятельство положено в основу рекомендуемой методики.

Описание методики. Кривая, изображенная на рис. 1, соответствует характеристике вида (1). Она может быть аппроксимирована функцией

$$\sqrt{\eta} = \alpha \sqrt{E_s} e^{(\beta E_s + \gamma E_s^2)}, \quad (2)$$

которая представлена в виде

$$\sqrt{\eta} = \frac{|A_S|_{\text{ВЫХ}}}{|A_0|} = \alpha |A_S|_{\text{ВХ}} e^{(\beta |A_S|_{\text{ВХ}}^2 + \gamma |A_S|_{\text{ВХ}}^4)}, \quad (3)$$

где $|A_0| = \sqrt{E_0}$, $|A_S|_{\text{ВЫХ}} = \sqrt{E_{S \text{ ВЫХ}}}$, $|A_S|_{\text{ВХ}} = \sqrt{E_{S \text{ ВХ}}}$ — модули амплитуд опорной и сигнальной волн на «входе» и «выходе» голограммы.

Разлагая (3) в ряд по степеням $|A_S|_{\text{ВХ}}$, получим

$$|A_S|_{\text{ВЫХ}} \sim |A_0| (k_1 |A_S|_{\text{ВХ}} + k_2 |A_S|_{\text{ВХ}}^2 |A_S|_{\text{ВХ}} + k_3 |A_S|_{\text{ВХ}}^4 |A_S|_{\text{ВХ}} + \dots), \quad (4)$$

где $k_1 = \alpha$, $k_2 = \alpha\beta$, $k_3 = \alpha\gamma$. Из (4) следует, что между $|A_S|_{\text{ВЫХ}}$ и $|A_S|_{\text{ВХ}}$ существует нелинейная зависимость.

Поскольку нелинейность фотоматериала не искажает фазу сигнальной волны [3], то вместо (4) можно пользоваться выражением

$$A_{S \text{ ВЫХ}} \sim k_1 A_{S \text{ ВХ}} + k_2 |A_S|_{\text{ВХ}}^2 A_{S \text{ ВХ}} + k_3 |A_S|_{\text{ВХ}}^4 A_{S \text{ ВХ}} + \dots \quad (5)$$

Если менять «входные» условия и анализировать получаемые при этом «выходные» данные исходя из принятых критериев качества изо-

блуждения то можно найти наилучший вариант параметров голограммы

$$\eta_{\Sigma} = \frac{1}{A} \int_A \alpha^2 E_S(u, v) e^{[2\beta E_S(u, v) + 2\gamma E_S^2(u, v)]} dudv, \quad (6)$$

где η_{Σ} — суммарная эффективность голограммы; u, v — координаты плоскости голограммы; A — ее площадь;

б) отношением сигнал/фон

$$S/\Phi_n = \frac{k_1^2 |A_S|_{\text{вх}}^2}{|(k_2 |A_S|_{\text{вх}}^2 + k_3 |A_S|_{\text{вх}}^4 A_{S \text{ вх}} + \dots)|^2}, \quad (7)$$

где S — интенсивность света полезного изображения, восстановленного из голограммы, а Φ_n — интенсивность света нелинейной помехи.

В восстановленном изображении обычно присутствуют шумы рассеяния регистрирующего материала. Если обозначить отношение сигнал/фон рассеяния как $S/\Phi_{\text{расс}}$, то значение суммарного отношения сигнал/фон можно найти из выражения

$$S/\Phi = \frac{1}{1/(S/\Phi_n) + 1/(S/\Phi_{\text{расс}})}. \quad (8)$$

Наиболее часто требуется обеспечить возможно большую дифракционную эффективность при заданном отношении сигнал/фон. Хотя существует целое семейство характеристик вида (1), при выборе условий записи голограмм достаточно ограничиться той, которая позволяет получить наибольшую дифракционную эффективность. Процедура определения этой характеристики для фотографических материалов описана ниже.

Таким образом, предлагаемая методика включает в себя:

- 1) получение экспериментальным путем характеристики вида (1) и аппроксимацию этой характеристики на ЭВМ;
- 2) вычисление на ЭВМ значений дифракционной эффективности и уровня нелинейных искажений в восстановленном изображении при различных условиях записи голограмм;
- 3) выбор наиболее оптимальных условий записи с точки зрения принятых критериев качества восстановленного изображения.

Запись Фурье-голограмм. Для примера определим оптимальные условия записи Фурье-голограмм, используемых в качестве ячеек памяти в голограммных запоминающих устройствах. Как известно из [4], в случае применения случайной фазовой маски распределение интенсивности сигнальной волны в плоскости голограммы описывается выражением

$$I_s(u, v) \sim Na^2 \text{sinc}^2(u) \text{sinc}^2(v), \quad (9)$$

где N — полное количество двоичных знаков в записываемом массиве данных; a^2 — интенсивность волны, освещающей транспарант с изображением массива данных; u, v — координаты в плоскости голограммы. Принимая во внимание (9), по формулам (6) и (7) можно определить дифракционную эффективность и отношение S/Φ_n восстановленного изображения в зависимости от $E_{S \text{ max}}$, где $E_{S \text{ max}}$ — значение экспозиции сиг-

нальной волны в точке $u, v=0$ спектра Фурье. Выберем значение $E_{S \max}$, при котором достигается максимальная дифракционная эффективность голограммы, а отношение S/Φ_n не превышает заданной величины.

На рис. 2 изображена расчетная зависимость дифракционной эффективности голограммы от экспозиции сигнальной волны $E_{S \max}$. Размер голограммы принимался равным ширине центрального максимума в распределении (9).

Нелинейная помеха при записи массива двоичной информации проявляется в виде «ложного» изображения двоичных знаков. Для вычисления S/Φ_n обратимся к выражению (5) и выполним над ним операцию обратного преобразования Фурье. Тогда получим

$$F^{-1} \{k_1 A_{S \text{ вх}} + k_2 |A_{S \text{ вх}}|^2 A_{S \text{ вх}} + k_3 |A_{S \text{ вх}}|^4 A_{S \text{ вх}} + \dots\} = k_1 a_{S \text{ вх}} + k_2 (a_{S \text{ вх}} * a_{S \text{ вх}}) \otimes a_{S \text{ вх}} + \dots,$$

где $a_{S \text{ вх}} = F^{-1} \{A_{S \text{ вх}}\}$, * — знак операции корреляции, а \otimes — знак операции свертки.

Отношение S/Φ_n выражается как

$$S/\Phi_n = \frac{k_1^2 |a_{S \text{ вх}}|^2}{k_2^2 [(a_{S \text{ вх}} * a_{S \text{ вх}}) \otimes a_{S \text{ вх}}]^2 + \dots} \quad (10)$$

На рис. 3 (кривая 1) изображена расчетная зависимость S/Φ_n для тестового массива информации, имеющего вид квадратной матрицы регулярно расположенных отверстий (все отверстия, кроме центрального, прозрачные). Кривая 2 на рис. 3 описывает экспериментальную зависимость отношения сигнал/фон от экспозиции сигнальной волны $E_{S \max}$. Отличие начальных участков экспериментальной и расчетной зависимостей объясняется тем, что при расчете не учтено влияние шумов рассеяния.

Известно, что

$$S/\Phi_{\text{расс}} = \frac{\eta(\lambda L)^2}{N\Phi}, \quad (11)$$

где η — дифракционная эффективность голограммы, λ — длина волны света, L — расстояние от голограммы до плоскости изображения, N — количество двоичных знаков в восстановленной картине, Φ — нормализованный спектр мощности шумов рассеяния [5].

Кривая 3 на рис. 3 описывает расчетное суммарное отношение S/Φ . При расчетах $S/\Phi_{\text{расс}}$ по формуле (11) использован спектр мощности шумов рассеяния на разных уровнях амплитудного пропускания голограммы (рис. 4, 5), полученный экспериментальным путем. Шумы рассеяния измерялись по методике, описанной в [6].

Для сравнения с расчетными данными на рис. 2 (кривая 1) и на рис. 3 (кривая 2) показаны экспериментальные зависимости дифракционной эффективности голограммы и отношения S/Φ от $E_{S \max}$.

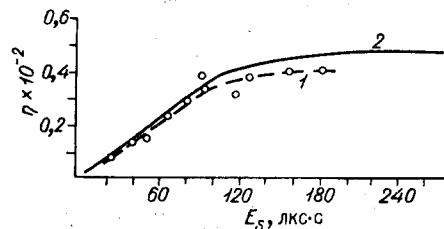


Рис. 2.

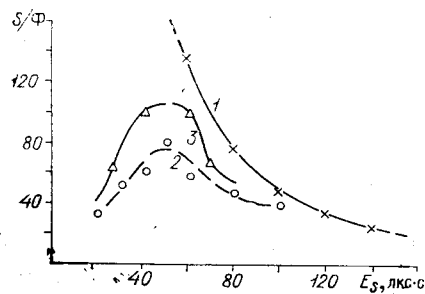


Рис. 3.

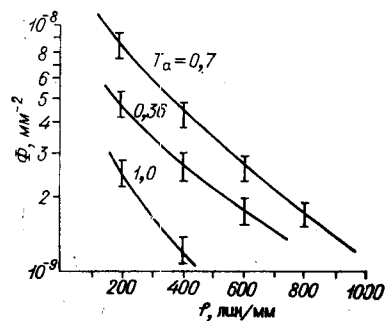


Рис. 4.

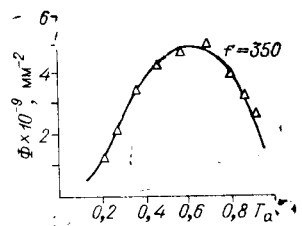


Рис. 5.

Полученные данные позволяют выбрать оптимальные условия записи голограмм. Приняв, например, $S/\Phi = 50$, из двух возможных значений $E_{S \max} = 30$ лкс и $E_{S \max} = 70$ лкс (см. рис. 3) следует предпочесть второе значение экспозиции, так как в этом случае реализуется большая дифракционная эффективность голограммы (см. рис. 2, кривая 2).

Результаты экспериментов. Приведем описание способа получения характеристики (1) и результаты ее аппроксимации. На разных участках фотопластинки регистрировалась серия голограмм, для которых сигнальный и опорный пучки света ($\lambda = 0,63$ мкм) представляли собой плоские волны. Интенсивность опорного пучка для всех голограмм сохранялась постоянной, а интенсивность сигнального — изменялась. Угол между пучками составлял 10° . Эксперименты проводились на фотопластинках типа «Микрат-ВРЛ». Режим фотообработки: 5 мин в проявителе Д-19, 5 мин в кислом фиксаже, промывка в спиртовых ваннах. Измерения дифракционной эффективности голограмм, уровня нелинейных искажений и шумов рассеяния производились при помощи ФЭУ.

Характеристика с наибольшей дифракционной эффективностью находится следующим образом. Вначале получается зависимость дифракционной эффективности от экспозиции опорного пучка при одинаковых интенсивностях сигнального и опорного пучков. В этом случае достигается наибольшая для фотографического материала дифракционная эффективность. Значение экспозиции опорного пучка, соответствующее максимуму эффективности, принималось в качестве параметра при построении кривой (1) и составило 55 лкс. Значения коэффициентов аппроксимирующей зависимости вычислялись по методу наименьших квадратов. Получено, что $\alpha = 0,638$, $\beta = 0,01605$, $\gamma = -0,000885$. Эти данные использовались при расчетах дифракционной эффективности и отношения S/Φ . Полное количество двоичных знаков в расчетах и в эксперименте составляло $N = 32 \times 32$.

Заключение. Описанная методика может быть применена для широкого класса регистрирующих материалов и различных типов голограмм. В методике сочетаются экспериментальные и расчетные средства, что позволяет с хорошей достоверностью определить оптимальные условия записи голограмм.

Сравнение экспериментальных и расчетных данных при определении оптимальных условий записи Фурье-голограмм двоичного массива информации показало хорошее совпадение результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. A. Frisem, J. S. Zelenka. Effects of Film Nonlinearities in Holography.—“Appl. Opt.”, 1967, v. 6, № 10.
2. L. H. Lin. Method of Characterizing Hologram-Recording Materials.—“J. Opt. Soc. Am.”, 1971, v. 61, № 2.

3. J. Upatnieks, C. D. Leonard. Linear Wavefront Reconstruction from Nonlinearly Recorded Holograms.—“Appl. Opt.”, 1971, v. 10, № 10.
4. B. Hill. Some Aspects of a Large Capacity Holographic Memory.—“Appl. Opt.”, 1972, v. 11, № 1.
5. G. Goldman. Recording of Digital Data Masks in Quasi Fourier Holograms.—“Optik”, 1971, v. 34, № 3.
6. Р. Кольер, К. Беркхарт, Л. Лин. Оптическая голография. М., «Мир», 1973.

Поступила в редакцию 13 августа 1974 г.

УДК 621.373.826

**В. М. МАСТИХИН, В. К. САПОЖНИКОВ, М. Г. СЕРБУЛЕНКО,
К. М. СОБОЛЕВСКИЙ, Ю. Н. ТИЩЕНКО, Д. В. ШЕЛОПУТ**

(Новосибирск)

К ВЫБОРУ МАТЕРИАЛА И ИССЛЕДОВАНИЮ АКУСТООПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СВЕТОЗВУКОПРОВОДОВ ДЕФЛЕКТОРНЫХ ЯЧЕЕК

При разработке систем отклонения лазерного излучения, использующих дифракцию света на ультразвуковой волне [1], одной из центральных и привлекающих широкое внимание продолжает оставаться задача создания высококачественных светозвукопроводов для акустооптических дефлекторных ячеек, причем в решении этой задачи сохраняется актуальность выбор материала и критериев контроля. Поэтому в дополнение к [2, 3] представилось целесообразным доложить о некоторых новых результатах, полученных в этой области, а также охарактеризовать специфику применяемых нами методов исследования оптического качества, обеспечивших эффективный контроль создаваемых светозвукопроводов.

Исходя из основных требований к материалу светозвукопровода (он должен обладать достаточно большим коэффициентом акустооптического качества M_1 и M_2 , высокой прозрачностью в области рабочих длин волн света и малым акустическим поглощением на рабочих звуковых частотах [2]), и в результате исследований, выполненных в последний период, можно несколько уточнить перечень наиболее перспективных материалов. Такой перечень приведен в табл. 1, где данные, взятые из [2, 4], дополнены новыми результатами наших исследований.

Как видно из табл. 1, из-за основных параметров несколько ограниченный диапазон применения имеют парамолибдат свинца и КРС-6, которые целесообразно использовать только на относительно низких частотах (из-за большого акустического затухания), а также прустит и КРС-5, применимые только для красной и инфракрасной областей спектра.

Для некоторых применений (там, где требуется максимально возможная прозрачность оптического тракта) может оказаться более предпочтительным иодат лития, несмотря на его небольшой коэффициент акустооптического качества, поскольку просветленные экспериментальные образцы светозвукопровода из йодата лития толщиной около 15 мм обеспечивали пропускание (на длине волны 0,63 мкм) более 97%*. Кроме того, йодат лития обладает, как известно [5], хорошими пьезо-

* Просветление экспериментальных образцов светозвукопроводов из йодата лития и других материалов выполнялось инженером Н. Н. Каменевым.