

## МОДЕЛЬ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ГОЛОГРАММ

The way of holographic records consecutive reproduction is developed. The energy of zero order bunches on each previous cycle of the reading for the reproduction of this or other holograms on the subsequent cycles is used. The general mathematical description of information and power model of the method is given.

**Введение.** К вопросу улучшения информационных характеристик голографической памяти и дисплеев можно подходить двояко: либо с позиций повышения плотности записей на физическом носителе, либо с энергетических позиций. Первый подход тривиален и не требует обоснования.

Необходимость второго подхода – энергетического – вызвана предельной чувствительностью пространственных анализаторов изображений (многоканальных фотоприемных матриц, зрительных каналов восприятия изображений, оптически управляемых транспарантов и т. п.). В связи с этим информационная емкость голографической памяти и дисплеев оказывается ограниченной энергетическими параметрами, а именно яркостью воспроизводимых страниц информации. Как правило, улучшение информационных характеристик достигается либо путем увеличения мощности лазерных источников (это связано с увеличением габаритов), либо путем уменьшения быстродействия голографических средств информационной техники. В свою очередь, яркость воспроизводимых изображений определяется дифракционной эффективностью голограмм. Для управления яркостно-энергетическими характеристиками предложен ряд усовершенствований, к наиболее распространенным из которых следует отнести методы отбеливания, дефокусировки и случайной фазовой маски [1, 2]. Однако применение перечисленных методов не позволяет достичь стабильной дифракционной эффективности Фурье-голограмм выше 10–15%. Таким же низким и сопоставимым с дифракционной эффективностью  $\eta$  оказывается коэффициент использования когерентного излучения  $K_{ики}$  и при организации параллельного воспроизведения голограмм с нескольких матриц одновременно [1], когда выходное излучение лазера расщепляется на  $n$  каналов, каждый из которых предназначен для считывания голограмм в индивидуальной матрице:

$$K_{ики} = P_I / P_R = \eta P_R n^{-1} / P_R n^{-1} = \eta, \quad (1)$$

где  $P_R$  и  $P_I$  – мощность соответственно считываемого и информационного пучков света, воспроизводимых с голограммы.

В настоящей работе дан хронологический обзор разработки способа последовательного

воспроизведения голографических записей [4–10], с позиции общего математического описания представлены информационная и энергетическая модели данного способа, определена эффективность возможных практических реализаций, направленных на более полное использование светового потока считываемого пучка.

**1. Информационная модель способа.** При записи голограмм на фоточувствительной пластине регистрируется интерференционная картина локализованного объектного  $U_{WO}(x)$  и опорного  $U_{WR}(x)$  пучков. Пусть комплексная амплитуда объектного пучка выражается через амплитудное  $U_{WO}(x)$  и фазовое  $\psi(x)$  распределения:

$$U_{WO}(x) = u_{WO}(x) \exp[j\psi(x)] \exp(j2\pi \sum_{i=1}^n v_{WO_i} x), \quad (2)$$

где объектный пучок представлен суммой  $N$  элементарных излучателей, на которые можно дискретизировать изображение входной страницы информации, с несущей частотой

$$v_{WO_i} = \frac{\sin \alpha_{WO_i}}{\lambda_W}. \quad (3)$$

Здесь и в последующем для упрощения анализа двумерные функции будем представлять с аргументом в одной плоскости  $xOz$ , поскольку основные выводы можно просто распространить на двумерном варианте.

Для простоты аналитических выкладок возьмем опорный пучок с плоским волновым фронтом, имеющий комплексную амплитуду

$$U_{WR}(x) = u_{WR} \exp(j2\pi v_{WR} x). \quad (4)$$

Тогда для интенсивности, регистрируемой фотопластиной, можно записать выражение

$$I(x) = (U_{WO} + U_{WR})(U_{WO} + U_{WR})^* = U_{WO}U_{WO}^* + U_{WR}U_{WR}^* + U_{WO}U_{WR}^* + U_{WR}U_{WO}^*. \quad (5)$$

Другого или с учетом выражений(2), (4) и (5)

$$I(x) = u_{WO}^2(x) + u_{WR}^2 +$$

$$+ u_{WO}(x)u_{WR} \exp[j\psi(x)] \exp \left[ j2\pi \left( \sum_{i=1}^N v_{WO_i} - v_{WR} \right) x \right] +$$

$$+ u_{WO}(x)u_{WR} \exp[-j\psi(x)] \exp \left[ j2\pi \left( v_{WR} - \sum_{i=1}^N v_{WO_i} \right) x \right].$$

Положим, что при обработке фотопластины с зарегистрированной голограммой обеспечена линейная пропорциональность между ее амплитудным коэффициентом пропускания и интенсивностью голографической интерференционной картины. Тогда при освещении данной голограммы считывающим пучком света с плоским волновым фронтом и комплексной амплитудой

$$U_R(x) = u_R \exp(j2\pi\nu_R x) \quad (7)$$

комплексную амплитуду света на выходе голограммы можно представить как

$$U_{\text{ВЫХ}_1}(x) = I(x) U_R(x) = U_{WR} U_{WO}^* U_R + U_{WR} U_{WR}^* U_R + U_{WO} U_{WR}^* U_R + U_{WO}^* U_{WR} U_R, \quad (8)$$

или с учетом (6), (7) и (8):

$$U_{\text{ВЫХ}_1}(x) = u_R u_{WO}^2(x) \exp(j2\pi\nu_R x) + u_R u_{WR}^2 \times \exp(j2\pi\nu_R x) + u_{WO}(x) u_{WR} u_R \times \exp[j\psi(x)] \times \exp\left[j2\pi\left(\sum_{i=1}^N \nu_{WO_i} - \nu_{WR} + \nu_R\right)x\right] + u_{WO}(x) u_{WR} u_R \times \exp[-j\psi(x)] \times \exp\left[j2\pi\left(\nu_{WR} - \nu_R - \sum_{i=1}^N \nu_{WO_i}\right)x\right]. \quad (9)$$

С точностью до постоянного множителя первые два слагаемых в выражении (9) умножаются на  $\exp(j2\pi\nu_R x)$ . Это означает, что соответствующие им составляющие распространяются от голограммы в направлении считывающего пучка. Третье слагаемое соответствует копии волнового фронта объектного пучка, четвертое слагаемое описывает составляющую, которая распространяется под еще более крутым углом относительно нормали голограммы. Учитывая реальную регистрацию голограмм на фотопластинах с конечной толщиной эмульсионного слоя, который в ряде практических случаев достаточен для подавления комплексно-сопряженного изображения, при энергетическом анализе воспроизведения голограмм последней составляющей в выражении (9) можно пренебречь.

**2. Энергетическая модель способа.** Идея метода последовательного воспроизведения голографической информации заключается в использовании световой энергии с комплексной амплитудой двух первых слагаемых в выражении (9) на каждом предыдущем цикле считывания для воспроизведения этой же или любых других голограмм на последующих циклах.

Рассмотрим случай последовательного воспроизведения фазовых голограмм (рис. 1), расположенных на одной оптической оси пучка когерентного света мощностью  $P_{R_i}$  и находящихся друг от друга на расстоянии

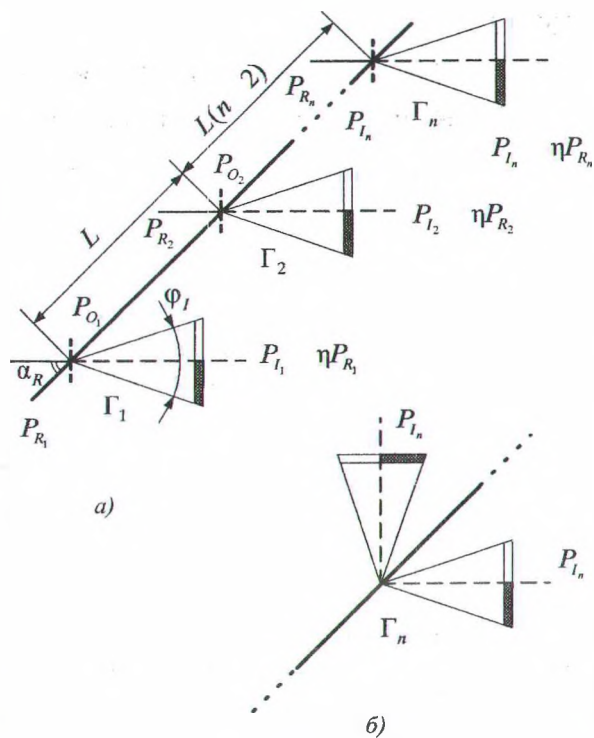


Рис. 1. Схема последовательного воспроизведения голограмм: а) для «толстых»; б) для «тонких» голограмм

$$L \geq \frac{2z \operatorname{tg} 0,5\phi_1}{\cos \alpha_R}. \quad (10)$$

Выбор фазовых голограмм для описываемого способа воспроизведения обусловлен следующей причиной. На этапе голографической регистрации информации при равномерном распределении интенсивности света в плоскости транспаранта прозрачность амплитудной голограммы очень неравномерна по ее апертуре в силу большого динамического диапазона интенсивностей оптического Фурье-спектра. Это вызывает сильную модуляцию по интенсивности пучка света нулевого порядка и резко ухудшает качество изображения, воспроизводимого с очередной голограммы. Отбеливание амплитудной голограммы для ее преобразования в фазовую не исключает такой модуляции вследствие неравномерности дифракционной эффективности отдельных участков голограммы. Наиболее приемлемой альтернативой для устранения этого нежелательного явления оказывается применение случайной фазовой маски для записи Фурье-голограмм. При этом распределение интенсивности света, а следовательно, и дифракционная эффективность по апертуре голограммы становятся практически равномерными. Нежелательные фазовые искажения волны нулевого порядка проявляются в рассеянии света, которое реально не сказывается на читаемости восстановленных картин с последовательно воспроизводимых голограмм и в даль-



нейшем будет учитываться в качестве составляющей в общем коэффициенте потерь  $\xi$  голограммы.

Учитывая потери на отражение, поглощение и рассеяние, коэффициент которых  $\xi$  будем считать одинаковым для всех голограмм, на выходе первой голограммы  $\Gamma_1$  для мощностей света, дифрагируемых в информационный порядок и в нулевой порядок, справедливы следующие отношения:

$$P_{I_1} = \eta P_{R_1},$$

$$P_{O_1} = P_{R_1} - \eta P_{R_1} - \xi P_{R_1} = P_{R_1} (1 - \eta - \xi).$$

Для мощностей света на входе и выходе второй голограммы характерна система уравнений следующего вида:

$$P_{R_2} = P_{O_1} = P_{R_1} (1 - \eta - \xi),$$

$$P_{I_2} = \eta P_{R_2} = \eta P_{R_1} (1 - \eta - \xi),$$

$$P_{O_2} = P_{R_2} - \eta P_{R_2} - \xi P_{R_2} = P_{R_1} (1 - \eta - \xi)^2.$$

Для третьей голограммы  $\Gamma_3$  –

$$P_{R_3} = P_{O_2} = P_{R_1} (1 - \eta - \xi)^2,$$

$$P_{I_3} = \eta P_{R_3} = \eta P_{R_1} (1 - \eta - \xi)^2,$$

$$P_{O_3} = P_{R_3} - \eta P_{R_3} - \xi P_{R_3} = P_{R_1} (1 - \eta - \xi)^3.$$

И по аналогии, для  $n$ -й голограммы  $\Gamma_n$  –

$$P_{R_n} = P_{(n-1)} = P_{R_1} (1 - \eta - \xi)^{(n-1)},$$

$$P_{I_n} = \eta P_{R_n} = \eta P_{R_1} (1 - \eta - \xi)^{(n-1)}, \quad (11)$$

$$P_{O_n} = P_{R_n} - \eta P_{R_n} - \xi P_{R_n} = P_{R_1} (1 - \eta - \xi)^n.$$

Таким образом, благодаря дифракции света в информационный порядок на каждой голограмме коэффициент использования когерентного излучения возрастает на величину

$$\Delta K_{\text{ИКИ}} = \frac{\eta [(1 - \eta - \xi) - (1 - \eta - \xi)^n]}{\eta + \xi} 100\% \quad (12)$$

и общее значение  $K_{\text{ИКИ}}$  определяется выражением

$$K_{\text{ИКИ}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{I_i}}{P_{R_1}} = \frac{\eta [1 - (1 - \eta - \xi)^n]}{\eta + \xi}. \quad (13)$$

При одинаковом среднестатистическом коэффициенте заполнения информационными элементами воспроизводимых изображений их энергетические характеристики монотонно убывают с увеличением  $n$  по сравнению с первой голограммой в соответствии с зависимостью

$$P_{I_n} / P_{I_1} = (1 - \eta - \xi)^{n-1}. \quad (14)$$

Анализируя полученные формулы (11) и (14) для различных значений  $\eta$  и  $\xi$ , можно сделать вывод, что наибольшая эффективность использования предложенного метода наблюдается для чисто фазовых голограмм с максимально возможной дифракционной эффективностью при условии линейной записи.

Потери света на голограмме являются определяющими в достижении максимального использования когерентного излучения, предельное значение которого оценивается выражением

$$K_{\text{ИКИ}} = \frac{\eta}{\eta + \xi} 100\%. \quad (15)$$

Число последовательно считываемых голограмм должно определяться минимально допустимыми яркостными характеристиками при воспроизведении последней голограммы, а также предельно допустимой мощностью излучения на входе системы, не вызывающей выхода из строя первой голограммы. При практической реализации данный положительный эффект можно использовать для улучшения других параметров средств информационной техники, например яркостных, временных, емкостных, габаритных.

**3. Воспроизведение многослойных голограмм.** Хорошей иллюстрацией многослойной голограммы является рис. 1 при  $L \neq 0$ . Особенность ее воспроизведения заключается в том, что оба световых пучка (как пучок нулевого порядка, так и информационный) каждого предыдущего слоя голограммы проходят через все последующие слои. При этом часть света нулевого порядка дифрагирует в информационный. В свою очередь, часть света информационного пучка дифрагирует в нулевой порядок. Это является свойством ассоциативности голограмм, в соответствии с которым комплексную амплитуду света на выходе голограммы при ее освещении копией объектного пучка можно представить как

$$U_{\text{ВЫХ}_2}(x) = I(x) U_{\text{ВО}}(x) = U_{\text{ВО}}^2 U_{\text{ВО}}^* + U_{\text{ВО}} U_{\text{WR}} U_{\text{WR}}^* + U_{\text{ВО}}^2 U_{\text{WR}} + U_{\text{ВО}} U_{\text{ВО}}^* U_{\text{WR}} \quad (16)$$

или с учетом выражений (2), (4) и (16)

$$U_{\text{ВЫХ}_2}(x) = u_{\text{ВО}}^3(x) \exp[j\psi(x)] \times$$

$$\times \exp\left(j2\pi \sum_{i=1}^N v_{\text{ВО}_i} x\right) + u_{\text{ВО}}^2 u_{\text{WR}} \exp(j2\pi v_{\text{WR}} x) +$$

$$+ u_{\text{WR}}^2 u_{\text{ВО}}(x) \exp[j\psi(x)] \exp\left(j2\pi \sum_{i=1}^N v_{\text{ВО}_i} x\right) +$$

$$+ u_{\text{ВО}}^2(x) u_{\text{WR}} \exp[j\psi(x)] \times$$

$$\times \exp\left[j2\pi \left(\sum_{i=1}^N 2v_{\text{ВО}_i} - v_{\text{WR}}\right) x\right]. \quad (17)$$

Видно, что второе слагаемое выражения (17) описывает составляющую света, которая распространяется в направлении, совпадающем с направлением опорного (считывающего) пучка света. При энергетическом анализе воспроизведения многослойных голограмм это необходимо учитывать, в связи с чем на выходе второй голограммы характерна система уравнений следующего вида:

$$P_{I_2} = P_{I_1} - \eta P_{I_1} - \xi P_{I_1} + \eta P_{O_1} = \\ = P_{I_1}(1 - \xi)\eta(P_{O_1} - P_{I_1}) = \eta P_{R_1}(1 - \xi) + \eta P_{R_1}(1 - 2\eta - \xi),$$

$$P_{O_2} = P_{O_1} - \eta P_{O_1} - \xi P_{O_1} + \xi P_{I_1} = P_{O_1}(1 - \xi) - \eta \times \\ \times (P_{O_1} - P_{I_1}) = P_{R_1}(1 - \eta - \xi)(1 - \xi) - \eta P_{R_1}(1 - 2\eta - \xi),$$

на выходе третьей голограммы

$$P_{I_3} = P_{I_2} - \eta P_{I_2} - \xi P_{I_2} + \eta P_{O_2} = P_{I_2}(1 - \xi) + \eta \times \\ \times (P_{O_2} - P_{I_2}) = \eta P_{R_1}(1 - \xi)^2 + \eta P_{R_1}(1 - 2\eta - \xi) \times \\ \times (1 - \xi) = \eta P_{R_1}(1 - 2\eta - \xi)^2,$$

$$P_{O_3} = P_{O_2} - \eta P_{O_2} - \xi P_{O_2} + \xi P_{I_2} = P_{O_2}(1 - \xi) - \eta \times \\ \times (P_{O_2} - P_{I_2}) = P_{R_1}(1 - \eta - \xi)(1 - \xi)^2 - \eta P_{R_1} \times \\ \times (1 - 2\eta - \xi) = (1 - \xi) - \eta P_{R_1}(1 - 2\eta - \xi)^2,$$

на выходе четвертой голограммы

$$P_{I_4} = P_{I_3} - \eta P_{I_3} - \xi P_{I_3} + \eta P_{O_3} = \\ = P_{I_3}(1 - \xi) + \eta(P_{O_3} - P_{I_3}) = \eta P_{R_1}(1 - \xi)^3 + \\ + \eta P_{R_1}(1 - 2\eta - \xi) \times (1 - \xi)^2 + \eta P_{R_1} \times \\ \times (1 - 2\eta - \xi)^2 \times (1 - \xi) + \eta P_{R_1}(1 - 2\eta - \xi)^3,$$

$$P_{O_4} = P_{O_3} - \eta P_{O_3} - \xi P_{O_3} + \xi P_{I_3} = P_{O_3}(1 - \xi) - \\ - \eta(P_{O_3} - P_{I_3}) = P_{R_1}(1 - \eta - \xi)(1 - \xi)^3 - \eta P_{R_1} \times \\ \times (1 - 2\eta - \xi)(1 - \xi)^2 - \eta P_{R_1}(1 - 2\eta - \xi)^2 \times \\ \times (1 - \xi) - P_{R_1}(1 - 2\eta - \xi)^3,$$

по аналогии на выходе  $n$ -й голограммы

$$P_{I_n} = (\eta + \Delta\eta)P_{R_1} = \\ = \eta P_{R_1} \left[ 1 + \sum_{i=2}^n (1 - 2\eta - \xi)^{i-1} (1 - \xi)^{n-i} \right]; \quad (18)$$

$$P_{O_n} = P_{R_1} \left[ \begin{array}{l} (1 - 2\eta - \xi)(1 - \xi)^{n-1} - \\ - \eta \sum_{i=2}^n (1 - 2\eta - \xi)^{i-1} (1 - \xi)^{n-i} \end{array} \right].$$

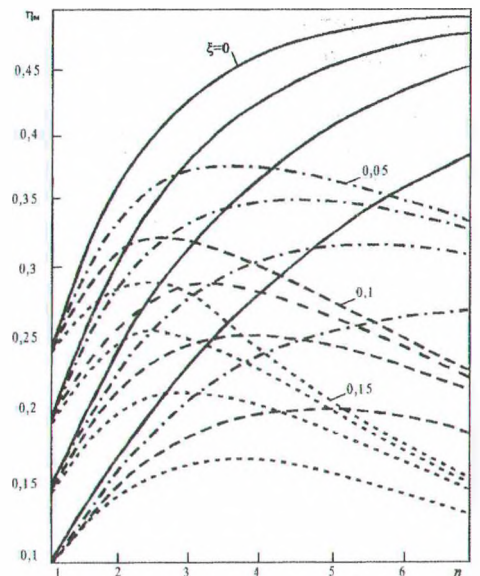


Рис. 2. Графики дифракционной эффективности многослойных голограмм

Из графиков (рис. 2), изображающих зависимость приращения дифракционной эффективности  $\Delta\eta$  многослойной голограммы от дифракционной эффективности отдельных голограмм  $\eta$  без потерь, видно, что с увеличением числа  $n$  максимальное приращение возрастает и его оптимальное значение смещается в сторону более низкой дифракционной эффективности отдельных голограмм ( $\eta = 0,1 - 0,2$ ), практическая реализация которых не представляет особых трудностей.

Предельное значение дифракционной эффективности

$$\eta_m = \eta + \Delta\eta = \eta \left[ 1 + \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=2}^n (1 - 2\eta - \xi)^{i-1} (1 - \xi)^{n-i} \right] = \\ = \eta \left[ 1 - (1 - 2\eta - \xi)(1 - \xi) \right]^{-1}, \quad (19)$$

которое может быть достигнуто при организации многослойной голограммы, не превышает 50% даже в случае абсолютно фазовых отдельных голограмм для любого значения  $\eta$ . Дифракционная эффективность отдельных голограмм  $\eta$  определяет лишь скорость приближения  $\eta_m$  к значению 0,5 и, как следствие, число отдельных голограмм в многослойной голограмме по заданной результирующей дифракционной эффективности  $\eta_m$ . Из графиков также видно, что наиболее предпочтительным является составление многослойной голограммы из голограмм с дифракционной эффективностью  $\eta \approx 0,25$  (значение  $\eta_m$  при  $n=1$ ), когда при пяти-шести слоях удается осуществить перекачку в информационный порядок около 50% энергии лазерного света.

Абсорбционный характер реальных фазовых голограмм, получаемых, например, из амплитудных путем их отбеливания, резко ограничивает энергетические возможности многослойных голограмм. Это следствие сильного амплитудного



подавления наиболее мощных световых составляющих информационного порядка, идущих от отдельных голограмм с меньшим порядковым номером. Относительная величина световых потерь определяется по формуле

$$P_{\xi_n} / P_{R_1} = 1 - (P_{0_n} + P_{1_n}) = 1 - (1 - \xi)^n, \quad (20)$$

причем с увеличением значения  $\xi$  максимальная величина  $\eta_m$  значительно уменьшается и количество слоев  $n$  может быть ограничено двумя-тремя.

**4. Многослойные матрицы скопированных голограмм.** Практическая реализация многослойной матрицы голограмм предполагает запись  $n$ -го количества абсолютно идентичных матриц и их пространственное объединение в «сэндвич», причем для уменьшения эффекта размывания краев информационных элементов в воспроизводимом изображении толщина отдельных матриц должна быть по возможности минимальной. На фотопластинах со стеклянной подложкой, толщина которых сопоставима с размерами голограмм (например, фотопластинах типа ЛОИ-2, ПЭ-2), принципиально возможным оказывается создание «сэндвича» лишь из двух матриц голограмм с обращенными друг к другу эмульсионными слоями.

Для исключения эффекта размывания краев информационных элементов и сокращения временных затрат на запись  $n$  идентичных матриц наиболее эффективен способ получения многослойной матрицы с применением метода интерференционного копирования [11], который заключается в замене волновых фронтов, сформированных реальными транспарантами, волновыми фронтами, воспроизводимыми голограммами соответствующих транспарантов. Вплотную к исходной матрице фазовых голограмм располагают вторую неэкспонированную фотопластину, и со стороны матрицы освещают две пластины световым пучком с направлением, длиной волны и кривизной волнового фронта, идентичными соответствующим параметрам опорного пучка при записи исходной матрицы голограмм. Часть света, которая дифрагирует на интерференционных решетках голограмм исходной матрицы и воспроизводит волновые фронты изображений записанных транспарантов, является объектом голографического копирования, а вторая часть – пучок нулевого порядка – используется в качестве опорного пучка. Интерференционная картина этих пучков по всей площади матрицы фиксируется в течение времени экспозиции на регистрирующем слое фотопластины, которая затем подвергается химической обработке.

Для получения двухслойной матрицы скопированную и исходную матрицы голограмм совмещают друг с другом абсолютно так же, как и на этапе копирования. Аналогично могут

быть получены третья, четвертая и последующие матрицы и на основе их совмещения многослойная матрица голограмм. Из-за различия соотношения интенсивностей объектного и опорного световых пучков при копировании дифракционная эффективность голограмм отдельных матриц оказывается разной, с учетом этого для мощностей света в информационном и нулевом порядках после прохождения каждого слоя голограмм по аналогии с предыдущим вариантом можно записать выражения

$$\begin{aligned} P_{I_1} &= \eta_1 P_{R_1}, \\ P_{O_1} &= P_{R_1} (1 - \eta_1 - \xi); \\ P_{I_2} &= P_{R_1} [\eta_1 (1 - \xi) + \eta_2 (1 - 2\eta_1 - \xi)]; \\ P_{O_2} &= P_{R_1} [(1 - \eta_1 - \xi)(1 - \xi) - \eta_2 (1 - 2\eta_1 - \xi)]; \\ P_{I_3} &= P_{R_1} \left[ \begin{array}{l} \eta_1 (1 - \xi)^2 + \eta_2 (1 - 2\eta_1 - \xi)(1 - \xi) + \\ + \eta_3 (1 - 2\eta_1 - \xi)(1 - 2\eta_2 - \xi) \end{array} \right]; \\ P_{O_3} &= P_{R_1} \left[ \begin{array}{l} (1 - \eta_1 - \xi)(1 - \xi)^2 - \eta_2 (1 - 2\eta_1 - \xi) \times \\ \times (1 - \xi) - \eta_3 (1 - 2\eta_1 - \xi)(1 - 2\eta_2 - \xi) \end{array} \right]; \\ P_{I_4} &= P_{R_1} \left[ \begin{array}{l} \eta_1 (1 - \xi)^3 + \eta_2 (1 - 2\eta_1 - \xi)(1 - \xi)^2 + \\ + \eta_3 (1 - 2\eta_1 - \xi)(1 - 2\eta_2 - \xi) \times \\ \times (1 - \xi) + \eta_4 (1 - 2\eta_1 - \xi) \times \\ \times (1 - 2\eta_2 - \xi)(1 - 2\eta_3 - \xi) \end{array} \right]; \\ P_{O_4} &= P_{R_1} \left[ \begin{array}{l} (1 - \eta_1 - \xi)(1 - \xi)^3 - \eta_2 (1 - 2\eta_1 - \xi) \times \\ \times (1 - \xi)^2 - \eta_3 (1 - 2\eta_1 - \xi)(1 - 2\eta_2 - \xi) \times \\ \times (1 - \xi) - \eta_4 (1 - 2\eta_1 - \xi)(1 - 2\eta_2 - \xi) \times \\ \times (1 - 2\eta_3 - \xi) \end{array} \right]; \\ P_{I_n} &= P_{R_1} \sum_{i=1}^n \eta_i (1 - \xi)^{n-i} \left[ \prod_{i=2}^n (1 - 2\eta_{i-1} - \xi) \right]; \\ P_{O_n} &= P_{R_1} \left\{ \begin{array}{l} (1 - \eta_1 - \xi)(1 - \xi)^{n-1} - \\ - \sum_{i=2}^n \eta_i (1 - \xi)^{i-1} \left[ \prod_{i=2}^n (1 - 2\eta_{i-1} - \xi) \right] \end{array} \right\}. \quad (21) \end{aligned}$$

Максимальная дифракционная эффективность, которую могут иметь голограммы первой копии матриц, определяется формулой [12]

$$\eta_2 = \eta_1 (V_2 / V_1)^2, \quad (22)$$

где  $V_1$  и  $V_2$  – контраст интерференционных полос голограмм исходной матрицы и ее копии соответственно. Аналогично для второй и третьей копий  $\eta_3 = \eta_{m2} (V_3 / V_2)^2$ ,  $\eta_4 = \eta_{m3} (V_4 / V_3)^2$  и т. д., где  $\eta_{m2}$  и  $\eta_{m3}$  – дифракционная эффективность голограмм двух- и трехслойной матриц соответственно. Тогда для  $(n-1)$ -й копии матрицы

$$\eta_i = \eta_1 \prod_{i=2}^n (V_i / V_{i-1})^2 = \eta_1 (V_n / V_1)^2. \quad (22)$$

Полагая, что распределение интенсивности света в объектном и опорном пучках равномерно по апертуре голограммы, а также учитывая известное соотношение [12] оценки контраста интерференционных полос

$$V_i = \frac{2\sqrt{R_i}}{R_i + 1}, \quad R_i = \frac{P_{O(i-1)}}{P_{I(i-1)}}, \quad (23)$$

выражение (22) для определения дифракционной эффективности голограмм любой копии при условии  $V_1 = 1$  можно привести к виду

$$\eta_i = \frac{4\eta_1 P_{I(i-1)} P_{O(i-1)}}{(P_{I(i-1)} + P_{O(i-1)})^2}. \quad (24)$$

Графики зависимости  $\eta_m = f(\eta_1, \xi, n)$ , построенные согласно выражению (21) с учетом (24), подобны графикам, представленным на рис. 2, но максимально достижимое значение несколько меньше для последнего варианта. Это объясняется уменьшением значения дифракционной эффективности каждой копии матрицы голограмм по сравнению с матрицей-оригиналом.

Для создания многослойных матриц голограмм методом интерференционного копирования требуется разработка специальной технологии последовательного нанесения фоточувствительного материала на экспонированный, химически обработанный и закрепленный слой матрицы. При использовании же серийных фотопластин типа ЛОИ-2 или ВРЛ возможен вариант лишь двухслойной матрицы голограмм с обращенными друг к другу эмульсионными слоями. Попытки получения копии для создания трехслойной матрицы на указанных пластинах с записью на высокой несущей пространственной частоте из-за значительной толщины стеклянной подложки, сравнимой с размером голограмм, вызывают разделение информационного пучка света и пучка света нулевого порядка в плоскости копирования, в результате чего копирование оказывается в большей или меньшей степени перекрестным (с информацией соседних голограмм в матрице). Наиболее существенный недостаток двух представленных выше методов получения многослойных матриц – относительно низкая результирующая дифракционная эффективность, которая в идеальном случае не может превысить 50% и резко падает с увеличением  $\xi$ .

**Заключение.** Разработан способ последовательного воспроизведения голографических записей, основанный на использовании энергии пучков нулевого порядка на каждом предыдущем цикле считывания для воспроизведения этой же или другой голограммы на последующих циклах. Дано общее математическое описание информационной и энергетической мо-

дели способа. Показана 100%-я эффективность последовательного и двухканального воспроизведения голограмм. Для многослойных голограмм эффективность уменьшается вдвое. Практическим оформлением для полного использования лазерного излучения является амплитудно-фазовый характер реальных голограмм.

## Литература

1. Акаев А.А., Майоров С.А. Оптические методы обработки информации. – М.: Высшая школа, 1988. – 237 с.
2. Микаэлян А.Л. Оптические методы в информатике: запись, обработка и передача информации. – М.: Наука, 1990. – 229 с.
3. Микаэлян А.Л. Ассоциативная обработка информации и проблема памяти // Вестник Российской академии наук, 2002. – Т. 72. – №2. – С. 107–119.
4. А. с. № 647979 СССР, М. Кл.<sup>2</sup> G 11 C 11 / 42. Способ считывания голографической информации и устройство для его осуществления / Н.А. Ярмош, А.Г. Куконин, В.К. Ероховец, Д.К. Сигитов (СССР). – № 2342298/18-24; Заявлено 01.04.76; Оpubл. 20.10.78 // Бюл. № 46.
5. Пат. РФ № 2025760. МКИ<sup>5</sup> G 03 H 1 / 28. Способ получения и восстановления оптических голограмм и устройство для его осуществления / В.К. Ероховец. – № 4938314/25; Заявл. 27.05.91; Оpubл. 30.12.94; Заявл. 27.05.91 // Бюл. № 24.
6. А. с. № 647926. СССР, М.Кл.<sup>2</sup> G 03 Y 1/26, G 06 G 9/00, G 11 G 13/04. Устройство для воспроизведения модулей информационных массивов / Н.А. Ярмош, А.Г. Куконин, В.К. Ероховец (СССР). – № 2322593/18-25; Заявл. 30.01.76; Оpubл. 30.11.85 // Бюл. № 44.
7. А. с. № 711885 СССР, М. Кл.<sup>2</sup> G 11 C 11 / 42. Голографическое запоминающее устройство / Н.А. Ярмош, В.К. Ероховец, С.В. Кузьмин (СССР). – № 2511330/18-42; Оpubл. 28.09.79; Заявл. 25.07.77 // Бюл. № 49.
8. А. с. № 673050 СССР, М. Кл.<sup>2</sup> G 11 C 11 / 42. Голографическое запоминающее устройство / Н.А. Ярмош, А.В. Гуринович, В.К. Ероховец (СССР). – № 2513701/18-24; Оpubл. 15.03.79; Заявл. 08.08.77 // Бюл. № 48.
9. А. с. № 711887. СССР, М. Кл.<sup>2</sup> G 11 C 11 / 42. Голографическое запоминающее устройство / Н.А. Ярмош, В.К. Ероховец (СССР). – № 2596635/18-24; Оpubл. 28.09.79; Заявл. 29.03.78 // Бюл. № 49.
10. А. с. № 674553. СССР, М. Кл.<sup>2</sup> G 11 C 11 / 42. Голографическое запоминающее устройство / Н.А. Ярмош, В.К. Ероховец, А.А. Борискевич (СССР). – № 2584687/18-24; Оpubл. 22.03.79; Заявл. 24.02.78 // Бюл. № 48.
11. Оптическая голография: В 2 т. / Под ред. Г. Колфилда. – М., 1982.
12. Кольер Г., Беркхард К., Лин Л. Оптическая голография. – М., 1973.