

**ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ**

УДК 681.2 + 537.7 + 518.5

С. Б. Одиноков, М. В. Борисов

(Москва)

**ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЗАПИСИ
И СЧИТЫВАНИЯ МАТРИЦЫ ГОЛОГРАММ**

Предложена и исследована оптическая система записи и считывания матрицы фурье-голограмм двоичных транспарантов, которая может быть использована в голографических запоминающих устройствах, состоящих из конструктивно разделенных на отдельные части устройств записи и считывания информации.

Введение. Разработки голографических запоминающих устройств записи и воспроизведения аудио-, видео- и цифровой двоичной информации, представленной в виде страниц данных, известны достаточно давно [1–10]. Большинство из них представляют собой конструктивно объединенные системы, в которых осуществляется как запись, так и восстановление голограмм. Такая схема имеет свои достоинства и в особенности удобна при использовании обратимой голографической среды, допускающей многократную перезапись голограммы. Подобные среды известны [1, 10], продолжают их исследования и разработки, однако широкого распространения ни одна из них еще не получила.

В то же время широко используются необратимые голографические среды, методы обработки которых давно исследованы и оптимизированы. Так, например, в настоящее время хорошо отработан технологический процесс получения рельефно-фазовых голограмм-оригиналов на фоторезистивных материалах с последующим массовым тиражированием методом тиснения [1, 11]. При этом тиражированные на лавсановой пленке реплики голограмм имеют очень низкую себестоимость.

При использовании необратимых голографических сред имеет смысл разделить систему голографического запоминающего устройства на две самостоятельные части – устройство записи и устройство воспроизведения информации. Запись данных в виде голограмм при этом может осуществляться на одной стационарной установке в производственных условиях, а воспроизведение – на многочисленных малогабаритных и недорогих устройствах различными пользователями.

С учетом изложенного представляет интерес такая схема записи и восстановления голограмм, которая обеспечит максимальную простоту и

компактность устройства воспроизведения при допустимом усложнении устройства записи.

В данной работе предложена и исследована оптическая схема устройства записи матрицы голограмм, позволяющая существенно упростить устройство воспроизведения за счет применения в нем полупроводникового лазера и восстановления голографического изображения непосредственно в плоскости матричного фотоприемного устройства (МФПУ) без дополнительных оптических элементов, преобразующих восстановленное поле.

Описание голографической схемы. Рассматриваемая схема представлена на рис. 1. Она содержит установленные последовательно источник излучения; светоделитель, с помощью которого формируются объектный и опорный пучки; расположенные в объектной ветви телескопическую систему, пространственный модулятор света (ПМС), задающий входную страницу данных, и фурье-объектив. Телескопическая система состоит из сферических оптических элементов, ПМС выполнен в виде электроуправляемого двумерного транспаранта, а фурье-объектив – сферический многолинзовый. При этом носитель, на который записывается матрица фурье-голограмм, имеет прямоугольную форму. В объектной ветви находятся поворотное зеркало и телескопическая система, осуществляющая масштабирование изображения транспаранта и производящая низкочастотную пространственную фильтрацию, а в опорной ветви имеется расширительная телескопическая система, состоящая из цилиндрических оптических элементов и линейного ПМС, что обеспечивает дискретное перемещение опорного луча по плоскости носителя, на которую он падает под углом 90° к поверхности.

Оптические элементы, через которые проходит объектная волна между ПМС и носителем, располагаются таким образом, чтобы дифракционное изображение транспаранта – двоичной страницы данных, формируемой ПМС в процессе записи, образовывалось в плоскости, находящейся на некотором расстоянии за носителем.

Будем считать, что на транспаранте формируется изображение в виде шахматного раstra, состоящее из 16×16 прозрачных элементов квадратной формы, расположенных с периодом T_x , скважностью $\gamma = 2$ и пропусканием прозрачных и непрозрачных участков соответственно $\tau_1 = 1$ и $\tau_0 = 0$. Одномерная функция пропускания такого транспаранта описывается формулой [12]

$$\tau_{\text{тр}}(x_1) = \left[\text{rect}\left(\frac{2x_1}{T_x}\right) \otimes \text{comb}\left(\frac{x_1}{T_x} + \frac{T_x}{4}\right) \right] \text{rect}\left(\frac{x_1}{16T_x}\right). \quad (1)$$

При освещении такого транспаранта плоским волновым фронтом, падающим по нормали, с комплексной амплитудой $A(x_1) = 1$ комплексная амплитуда излучения на выходе транспаранта будет определяться как

$$A_p(x_1) = A(x_1)\tau_p(x_1). \quad (2)$$

Между транспарантом и объективом находится слой пространства толщиной $l_1 = -a$, следовательно, распределение комплексной амплитуды излучения на входе объектива будет определяться дифракцией в данном слое.

Комплексная амплитуда излучения на входе объектива определяется сверткой амплитуды на выходе транспаранта $A_{\text{тп}}(x_1, y_1)$ с когерентной функцией рассеяния слоя пространства $h_{\text{фр}}(x', y'; l_1)$ [13]:

$$A_{\text{об}}(x'_1, y'_1) = A_{\text{тп}}(x_1, y_1) \otimes h_{\text{фр}}(x'_1, y'_1; l_1), \quad (3)$$

где

$$h_{\text{фр}}(x'_1, y'_1; l_1) = (\exp[jkz_1]/jk l_1) \exp[j(\pi/\lambda l_1)(x_1'^2 + y_1'^2)]. \quad (4)$$

Комплексный коэффициент пропускания тонкого безабберационного сферического объектива определяется формулой

$$\tau_{\text{об}}(\xi, \eta) = P_{\text{зр}}(\xi, \eta) \exp[-j(\pi/\lambda f')(\xi^2 + \eta^2)], \quad (5)$$

где ξ, η – координаты в плоскости зрачка объектива; $P_{\text{зр}}(\xi, \eta)$ – функция зрачка объектива; f' – заднее фокусное расстояние объектива.

Тогда комплексная амплитуда излучения на выходе объектива будет определяться как

$$\begin{aligned} A_{\text{об}}(x_2, y_2) &= A_{\text{об}}(x'_1, y'_1) \tau_{\text{об}}(x_2, y_2) = \\ &= A_{\text{тп}}(x_1, y_1) \otimes h_{\text{фр}}(x'_1, y'_1; z_1) P_{\text{зр}}(x_2, y_2) \exp[-j(\pi/\lambda f')(x_2^2 + y_2^2)] \end{aligned} \quad (6)$$

(для тонкого объектива можно считать $x'_1 = x_2, y'_1 = y_2$).

Примем следующее допущение:

$$P_{\text{зр}}(x_2, y_2) = \begin{cases} 1, & \sqrt{x_2^2 + y_2^2} \leq \rho_{\text{зр}}, \\ 0, & \sqrt{x_2^2 + y_2^2} > \rho_{\text{зр}}, \end{cases} \quad (7)$$

где $\rho_{\text{зр}}$ – радиус зрачка объектива.

Если выбрать $\rho_{\text{зр}}$ достаточно большим, можно считать $P_{\text{зр}}(x_2, y_2) = 1$ для любых значений координат в плоскости зрачка. Тогда при $l_1 = -a$ формула (6) преобразуется к виду

$$A_{\text{об}}(x_2, y_2) = A_{\text{тп}}(x_1, y_1) \otimes h_{\text{фр}}(x'_1, y'_1; -a) \exp[-j(\pi/\lambda f')(x_2^2 + y_2^2)]. \quad (8)$$

Плоскость регистрации голограммы расположена на расстоянии l_2 от объектива и повернута в плоскости x, z на некоторый угол θ . Следовательно, комплексная амплитуда излучения в этой плоскости будет определяться как свертка распределения $A_{\text{об}}(x_2, y_2)$ с функцией рассеяния слоя пространства $h_{\text{фр}}(\xi, \eta, l_2)$, т. е.

$$A_{\text{гол}}(\xi, \eta) = A_{\text{об}}(x_2, y_2) \otimes h_{\text{фр}}(\xi, \eta, l_2). \quad (9)$$

Рассмотрим сначала, как преобразуется при прохождении через систему распределение комплексной амплитуды оптического сигнала вдоль оси y .

Используем альтернативное представление преобразования Френеля и с учетом того, что в плоскости y, z расстояние l_2 постоянно и равно f' ; из (9) получим

$$\begin{aligned} A_{\text{гол}}(\eta) &= h_{\text{фр}}(\eta, f') \int_{-\infty}^{\infty} A_{\text{тр}}(y_1) \otimes h_{\text{фр}}(y_1'; -a) \exp[-j(\pi/\lambda f') y_2^2] \times \\ &\quad \times \exp[j(\pi/\lambda f') y_2^2] \exp[-j(2\pi/\lambda f') \eta y_2] dy_2 = \\ &= h_{\text{фр}}(\eta, f') \int_{-\infty}^{\infty} A_{\text{тр}}(y_1) \otimes h_{\text{фр}}(y_1'; -a) \exp[-j(2\pi/\lambda f') \eta y_2] dy_2. \end{aligned} \quad (10)$$

Видно, что выражение (10) можно переписать таким образом:

$$A_{\text{гол}}(\eta) = h_{\text{фр}}(\eta, f') F\{A_{\text{тр}}(y_1)\} F\{h_{\text{фр}}(y_1'; -a)\}, \quad (11)$$

где F – оператор прямого преобразования Фурье.

Подставляя в (11) выражение для функции рассеяния слоя пространства (4) и проводя замену переменных $\eta = v_y \lambda f'$; выражение (11) преобразуем к виду

$$\begin{aligned} A_{\text{гол}}(v_y) &= \exp[j\pi \lambda f' v_y^2] F\{A_{\text{тр}}(y_1)\} F\{\exp[-j(\pi/\lambda a) y_1'^2]\} = \\ &= \exp[j\pi \lambda (f' + a) v_y^2] F\{A_{\text{тр}}(y_1)\}. \end{aligned} \quad (12)$$

Известно, что $z = f' + a$, где z – расстояние от переднего фокуса объектива до точки, в которой предмет пересекает оптическую ось системы. Тогда комплексная амплитуда излучения как функция пространственных частот в плоскости записи голографического поля будет иметь вид:

$$A_{\text{гол}}(v_y) = \exp[j\pi \lambda (z v_y^2)] F\{A_{\text{тр}}(y_1)\}. \quad (13)$$

Известно также, что $z' = -f'^2/z$, где z' – расстояние от заднего фокуса объектива до точки, в которой изображение предмета пересекает оптическую ось системы.

Тогда комплексную амплитуду излучения можно представить как функцию координат, преобразовав (13) к виду:

$$A_{\text{гол}}(\eta) = \exp[j\pi (z/\lambda f'^2) \eta^2] F\{A_{\text{тр}}(y_1)\} = \exp[-j(\pi/\lambda z') \eta^2] F\{A_{\text{тр}}(y_1)\}. \quad (14)$$

Это означает, что распределение комплексной амплитуды оптического сигнала вдоль оси η в фокальной плоскости фурье-объектива представляет собой фурье-образ промежуточного изображения транспаранта с точностью до фазового множителя, в то время как на расстоянии z' за этой плоскостью будет находиться окончательное изображение транспаранта.

Далее рассмотрим, как преобразуется при прохождении через систему распределение комплексной амплитуды оптического сигнала вдоль оси x . Из выражения (9) комплексная амплитуда излучения в плоскости x, z будет

определяться как свертка распределения $A_{об}(x_2)$ с функцией рассеяния слоя пространства $h_{фр}(\xi, l_2)$, т. е.

$$A_{гол}(\xi) = A_{об}(x_2) \otimes h_{фр}(\xi, l_2). \quad (15)$$

Тогда с учетом (8) получим

$$A_{об}(x_2) = A_{об}(x_1) \tau_{об}(x_2) = A_{тр}(x_1) \otimes h_{фр}(x_1; -a) \exp[-j(\pi/\lambda f') x_2^2]. \quad (16)$$

Вновь используем альтернативное представление преобразования Френеля и, учитывая, что в плоскости x, z расстояние l_2 определяется как $l_2 = (f' + \xi \operatorname{tg} \theta)$, из (15) и (16) получим

$$\begin{aligned} A_{гол}(\xi) &= h_{фр}(\xi, l_2) \int_{-\infty}^{\infty} A_{об}(x_1) \exp[-j(\pi/\lambda f') x_2^2] \exp[j(\pi/\lambda l_2) x_2^2] \times \\ &\quad \times \exp[j(\pi/\lambda l_2) x_2^2] \exp[-j(2\pi/\lambda l_2) \xi x_2] dx_2 = \\ &= h_{фр}(\xi, l_2) F\{A_{об}(x_1) \exp[-j(\pi/\lambda)(f'^{-1} - l_2^{-1}) x_2^2]\}. \end{aligned} \quad (17)$$

С учетом того, что $\xi = \nu_x \lambda f'$, и используя (16), преобразуем (17) к виду

$$\begin{aligned} A_{гол}(\xi) &= h_{фр}(\xi, l_2) F\{A_{тр}(x_1) \otimes h_{фр}(x_1; -a)\} \otimes \\ &\quad \otimes F\{\exp[-j(\pi/\lambda)(f'^{-1} - l_2^{-1}) x_2^2]\} = \\ &= h_{фр}(\xi, l_2) F\{A_{тр}(x_1)\} \exp[j\pi(a/\lambda f'^2) \xi^2] \otimes \exp[j\pi(l_2/\lambda f'(f' - l_2)) \xi^2]. \end{aligned} \quad (18)$$

Выражение (18) вместе с (14) описывает распределение комплексной амплитуды оптического сигнала в плоскости регистрации голограммы. Видно, что за счет наклона этой плоскости результат отличается от «правильного» (канонического) представления пространственно-частотного спектра, получаемого в случае ее расположения перпендикулярно оси системы.

Вследствие регистрации в указанной плоскости картины интерференции предметной и опорной волн на носителе образуется голограмма.

Освещение этой голограммы восстанавливающей волной, по геометрическим параметрам идентичной опорной, приведет к тому, что изображение страницы данных без использования дополнительных оптических элементов сформируется в том же месте и таким же, каким оно было в процессе записи. Действительно, в плоскости, отстоящей от голограммы на расстоянии $l_3 = z'$, распределение комплексной амплитуды главной восстановленной волны вдоль оси y можно определить как свертку комплексной амплитуды излучения в плоскости голограммы с функцией Френеля $h_{фр}(y_3, z')$ (без учета конечной апертуры голограммы и восстановленного пучка):

$$\begin{aligned} A_{и}(y_3) &= h_{фр}(y_3, z') \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{A}_{тр}(\eta/f_3) \exp(-j\pi(1/\lambda z') \eta^2) \exp(j\pi/\lambda z' \eta^2) \times \\ &\quad \times \exp(-j2\pi(1/\lambda z') \eta_3) d\eta = h_{фр}(y_3, z') A_{тр}(-y_3). \end{aligned} \quad (19)$$

С учетом того, что $v_y = y_1/\lambda f'$, получим $y_3 = y_1 z'/f'$. В таком случае

$$A_n(y_3) = h_{\text{фр}}(y_3, z') A_{\text{тр}}(\beta y_1), \quad (20)$$

где $\beta = -z'/f'$ – увеличение фурье-объектива.

Распределение комплексной амплитуды восстановленной волны вдоль оси x аналогично будет определяться сверткой комплексной амплитуды излучения в плоскости голограммы с функцией Френеля $h_{\text{фр}}(x_3, l_3)$. Тогда с учетом (16) имеем

$$A_n(x_3) = A_{\text{гол}}(\xi) \otimes h_{\text{фр}}(x_3, l_3) = A_{\text{об}}(x_2) \otimes h_{\text{фр}}(\xi, l_2) \otimes h_{\text{фр}}(x_3, l_3). \quad (21)$$

Выполним фурье-преобразование выражения (21):

$$F\{A_n(x_3)\} = F\{A_{\text{об}}(x_2)\} \exp[-j\pi\lambda(l_2 + l_3)v_x^2]. \quad (22)$$

После обратного фурье-преобразования получим

$$\begin{aligned} F^{-1}\{F\{A_n(x_3)\}\} &= A_n(x_3) = A_{\text{об}}(x_2) \otimes h_{\text{фр}}(\xi, l_2 + l_3) = \\ &= A_{\text{об}}(x_2) \otimes h_{\text{фр}}(\xi, f' + z'). \end{aligned} \quad (23)$$

Видно, что полученный результат с учетом (15) и (16) в точности описывает прохождение сигнала через оптическую систему, формирующую изображение [12]. При этом выражение (20) можно переписать для функции двух переменных:

$$A_n(x_3, y_3) = h_{\text{фр}}(x_3, y_3; z') A_{\text{тр}}(\beta x_1, \beta y_1). \quad (24)$$

Запись строки матрицы голограмм на носитель осуществляется за счет того, что при переходе к записи каждой следующей голограммы производят одновременное дискретное перемещение зеркала, ПМС, компонентов телескопической системы и фурье-объектива, находящихся в объектной ветви, таким образом, чтобы изображение страницы данных, формирующееся за носителем, не изменяло своего положения.

Синхронно с перемещениями в объектной ветви осуществляют переключение линейного ПМС в опорной ветви таким образом, что объектная и опорная волны каждый раз пересекаются в плоскости носителя.

Такая схема записи позволяет осуществить восстановление любой из голограмм, записанных в строке, с неподвижного носителя на неподвижное МФПУ. Таким образом упрощается конструкция устройства считывания информации и увеличивается скорость доступа к информации, записанной в строке голограмм.

Запись следующей строки матрицы голограмм осуществляют, переместив носитель вдоль плоскости его фоточувствительного слоя на величину шага расположения строк матрицы голограмм.

Считывание информации производится при последовательном освещении голограмм, составляющих матрицу, записанную на носитель, восстанавливающей волной, по геометрическим параметрам идентичной опорной. В процессе считывания производится дискретное сканирование восстанавливающим лучом по одной координате в плоскости носителя и перемещение самого носителя по другой координате. Изображение страницы данных, за-

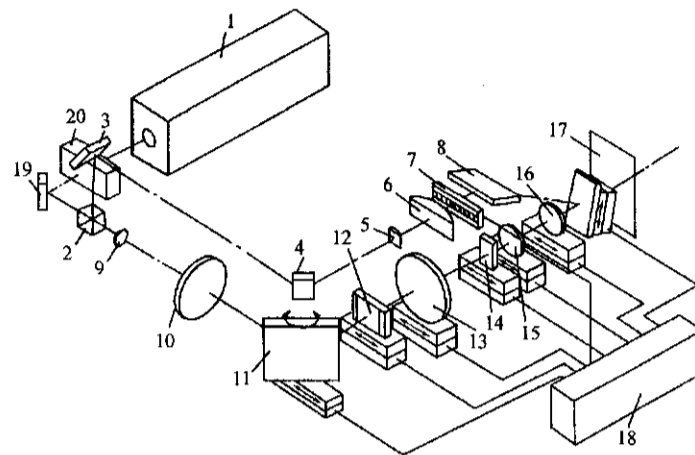


Рис. 1. Устройство записи матрицы голограмм

писанное на освещаемой в данный момент голограмме, восстанавливается непосредственно с носителя на МФПУ без использования дополнительных оптических элементов. Это позволяет упростить конструкцию устройства считывания информации.

Принцип действия устройства записи. На рис. 1 представлена конкретная схема предлагаемого устройства записи, которое содержит лазер 1 и светоделитель 2, входящие в опорную ветвь зеркал 3, 4; цилиндрическую телескопическую систему 5, 6; линейный ПМС 7; зеркало 8; телескопическую систему 9, 10; поворотное зеркало 11; двумерный ПМС 12; объектив 13; пространственный фильтр 14; объектив 15 и фурье-объектив 16; носитель 17; устройство управления 18, а также зеркало 19 и затвор 20.

ПМС 12, объективы 13, 15, 16 и пространственный фильтр 14 можно перемещать перпендикулярно оптической оси и параллельно плоскости носителя. Зеркало 11, кроме того, имеет возможность поворота вокруг оси, перпендикулярной направлению перемещения. Плоскость рабочей поверхности носителя 17 расположена перпендикулярно направлению опорного луча, а сам носитель может перемещаться вдоль этой плоскости перпендикулярно направлению перемещения остальных компонентов объектной ветви.

Перемещениями всех подвижных компонентов и работой ПМС 7, 12 управляет блок 18, подключенный к ЭВМ.

Устройство работает следующим образом. Излучение от лазера 1 проходит светоделитель 2, после которого попадает в две ветви – опорную и объектную. Излучение в опорной ветви, направляемое зеркалами 3, 4, проходит через телескопическую систему 5, 6, цилиндрические линзы которой осуществляют его расширение по одной координате, и освещает линейный ПМС 7. В рабочем состоянии лишь один элемент ПМС является открытым, и прошедшее через него излучение составляет плоскую опорную волну, которая, отражаясь от зеркала 8, падает на носитель 17 под углом 90° к его рабочей поверхности.

В свою очередь, излучение в объектной ветви после выхода из светоделителя 2 попадает в телескопическую систему 9, 10, затем отражается от зеркала 11 и освещает ПМС 12 плоским волновым фронтом. Электроуправляемый ПМС 12 находится в передней фокальной плоскости объектива 13, который совместно с объективом 15 составляет телескопическую систему. Следова-

тельно, промежуточное изображение страницы данных, формируемой ПМС 12, будет располагаться в задней фокальной плоскости объектива 15. Объектив 16, работая как репродукционный, строит окончательное изображение страницы данных на некотором расстоянии за своей задней фокальной плоскостью.

В то же время плоская волна на входе телескопической системы, состоящей из объективов 13, 15, остается плоской на выходе из нее и, попадая в фурье-объектив 16, фокусируется в его задней фокальной плоскости на фоточувствительной поверхности носителя 17. Таким образом, в этой плоскости образуется пространственный фурье-образ страницы данных, сформированной ПМС 12, который интерферирует с плоской опорной волной, отраженной от зеркала 8, и образует на рабочей поверхности носителя голограмму.

Для записи каждой следующей голограммы в строке зеркало 11, ПМС 12, объективы 13, 15, 16 и пространственный фильтр 14 дискретно перемещают перпендикулярно оптической оси на расстояния, которые для случая тонких компонентов могут быть рассчитаны по формуле

$$x_k = l_k X / L,$$

где x_k – искома величина перемещения k -го компонента; l_k – расстояние вдоль оптической оси от главных плоскостей k -го компонента (без учета расстояний между главными плоскостями компонентов) до плоскости изображения страницы данных за носителем; X – шаг расположения голограмм в строке; L – расстояние вдоль оптической оси от плоскости записи до изображения страницы данных за носителем (рис. 2).

При этом зеркало 11 поворачивают на угол, величина которого определяется по формуле

$$\alpha_i = 0,5 \left(\arctg \frac{m}{l} - \arctg \frac{m - x_i}{l} \right),$$

где α_i – искомый угол поворота зеркала; m – суммарная величина перемещений зеркала от исходного положения, когда компоненты оптической системы находятся на одной оси, до текущего положения; l – расстояние вдоль оптической оси от зеркала (без учета расстояний между главными плоскостями компонентов) до плоскости изображения страницы данных за носителем; x_i – величина перемещения зеркала на данном шаге. При таких соотношениях величин перемещений компонентов изображение страницы данных, формируемое ПМС 12, останется неподвижным.

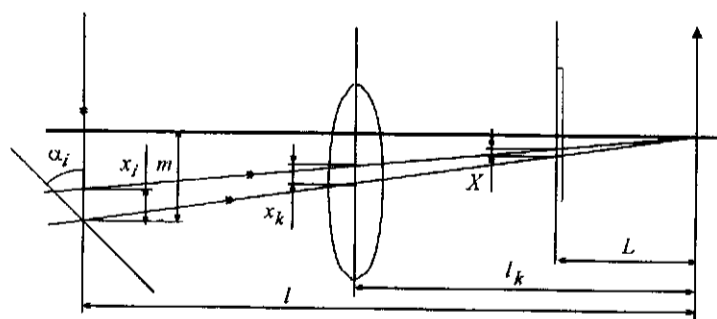


Рис. 2. Схема записи строки голограмм

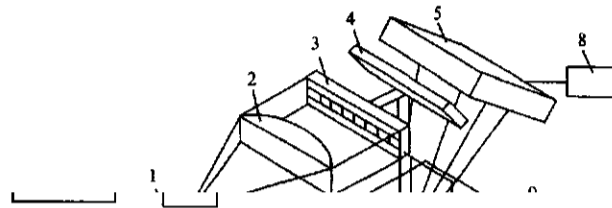


Рис. 3. Устройство считывания матрицы голограмм

Одновременно с этим открывают следующий элемент линейного ПМС 7, задавая опорный луч такого направления, которое снова обеспечит пересечение обеих волн на рабочей поверхности носителя.

После того как строка матрицы голограмм записана, перемещают носитель вдоль его рабочей поверхности на расстояние, равное шагу строк, и записывают следующую строку.

Принцип действия устройства считывания. На рис. 3 представлена схема устройства считывания, которое содержит источник излучения низкой временной когерентности (полупроводниковый лазер) 1, коллимирующий однолинзовый объектив 2, линейный ПМС 3, зеркало 4, матричный фотоприемник 5, блок питания 6, блок управления 7, оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) 8 и носитель 9.

Излучение лазера 1 за счет естественной расходимости освещает весь прямоугольный входной зрачок сферического объектива 2. Объектив 2 расположен таким образом, что на выходе из него образуется плоская волна, которая освещает линейный ПМС 3. В рабочем состоянии все элементы, кроме одного, закрыты и не пропускают излучение, поэтому восстанавливающая волна, которая падает на текущую голограмму под углом 90° к рабочей поверхности носителя, отразившись от зеркала 4, представляет собой излучение, прошедшее через единственный открытый элемент ПМС 3. Дискретное сканирование восстанавливающего луча по строке голограмм осуществляется за счет последовательного открытия элементов ПМС 3.

Изображение страницы данных, восстанавливаемое с любой голограммы текущей строки, попадает непосредственно на чувствительную площадку неподвижного МФПУ 5, с которого информация в виде электрического сигнала направляется в ОЗУ 8 и затем может быть выведена на индикаторное устройство. Переход к считыванию следующей строки голограмм осуществляется за счет перемещения носителя 9.

Заключение. Предложена и исследована схема записи и восстановления голограмм, обеспечивающая простоту и малые размеры устройства воспроизведения за счет возможности применения в нем компактного источника излучения (полупроводникового лазера) и восстановления голографического изображения непосредственно в плоскости матричного фотоприемного устройства без дополнительных оптических элементов. Возникающее при

этом усложнение устройства записи вполне допустимо, поскольку последнее представляет собой стационарную установку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Оптическая голография** /Под ред. Г. Колфилда. М.: Мир, 1982.
2. **Pat. 4269473 USA.** Identification card with a hologram and process for the production thereof /D. Flothmann, H. Ruell, A. Staimer. Publ. 26.05.81.
3. **Pat. 4018503 USA.** Holographic system having reference beam coded holograms /D. Silverman, E. Johnson. Publ. 19.04.77.
4. **А. с. 1141905 СССР.** Голографическое запоминающее устройство /А. А. Вербовецкий. Оpubл. 20.01.86, Бюл. № 19.
5. **А. с. 1769233 СССР.** Способ многослойной оптической записи и воспроизведения двоичной информации /И. Ш. Штейнберг, Ю. А. Щепеткин. Оpubл. 15.10.92, Бюл. № 38.
6. **Заявка 93001460 РФ.** Система регистрации и восстановления цифровой информации /Н. Н. Вьюжина, В. А. Домбровский, С. А. Домбровский и др. Оpubл. 30.04.95, Бюл. № 24.
7. **Пат. 2106688 РФ.** Устройство считывания с голографической карты /В. П. Антонов. Оpubл. 10.03.98, Бюл. № 27.
8. **Микаэлян А. Л., Бобринев В. И.** Голографические системы памяти // Радиотехника и электроника. 1974. XIX, вып. 5. С. 898.
9. **Ванюшев Б. В., Волков А. В., Гибин И. С. и др.** Устройство хранения и считывания цифровых данных в голографической системе архивной памяти // Автоматрия. 1984. № 3. С. 19.
10. **Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л.** Оптическая голография. М.: Мир, 1973.
11. **Бартолини, Хэннен, Карлсон, Лури.** Использование рельефных фазовых голограмм для воспроизводства телевизионных программ // Зарубеж. радиоэлектрон. 1972. № 1.
12. **Гудмен Дж.** Введение в фурье-оптику. М.: Мир, 1970.
13. **Мосягин Г. М., Немтинов В. Б., Лебедев Е. Н.** Теория оптико-электронных систем. М.: Машиностроение, 1990.

*Московское государственное
техническое училище им. Н. Э. Баумана,
E-mail: odinokov@r12.bmstu.ru*

*Поступила в редакцию
23 июля 1999 г.*