

А. А. БЛОК, Б. В. ВАНЮШЕВ, А. В. ВОЛКОВ,  
И. С. ГИБИН, В. П. КОТЕНКО, Т. Н. МАНТУШ,  
Е. Ф. ПЕН, А. Н. ПОТАПОВ

(Новосибирск)

## УСТРОЙСТВО АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЗАПИСИ МАТРИЦ ГОЛОГРАММ ЦИФРОВЫХ ДАННЫХ

В данной статье описано устройство автоматической записи матриц голограмм (УЗГ), входящее в состав голографической системы архивной памяти. УЗГ состоит из оптико-механического блока и электронной системы управления и управляется от ЭВМ СМ-4. В УЗГ в отличие от ранее созданного устройства [1] для ввода информации использован электрически управляемый цифровой транспарант на основе жидких кристаллов (ЭУЦТ) [2]. Кроме того, для повышения качества записи в УЗГ дополнительно введены подсистемы стабилизации экспозиции, углового положения лазерного пучка, обнаружения и отбраковки дефектных участков регистрирующей среды.

Схема оптической системы УЗГ приведена на рис. 1; она включает следующие подсистемы: формирования опорного и предметного пучков, оптического преобразования изображения страницы данных, а также контроля углового положения, мощности лазерного пучка и дефектов регистрирующей среды. Световой пучок лазера 1, прошедший через двухкоординатный электрооптический дефлектор (ЭОД) 2, кубиком 3 делится на два пучка, при этом один из них поступает в подсистему контроля углового положения лазерного пучка, а второй через фотозатвор 4 и светоделительный кубик 5 — в подсистемы формирования предметного и опорного пучков.

В подсистему формирования опорного пучка входят линза 6 ( $f = 400$  мм), узел регулировки мощности 7, зеркало 8. Размер опорного пучка в плоскости регистрирующей среды 0,4 мм, радиус кривизны вол-

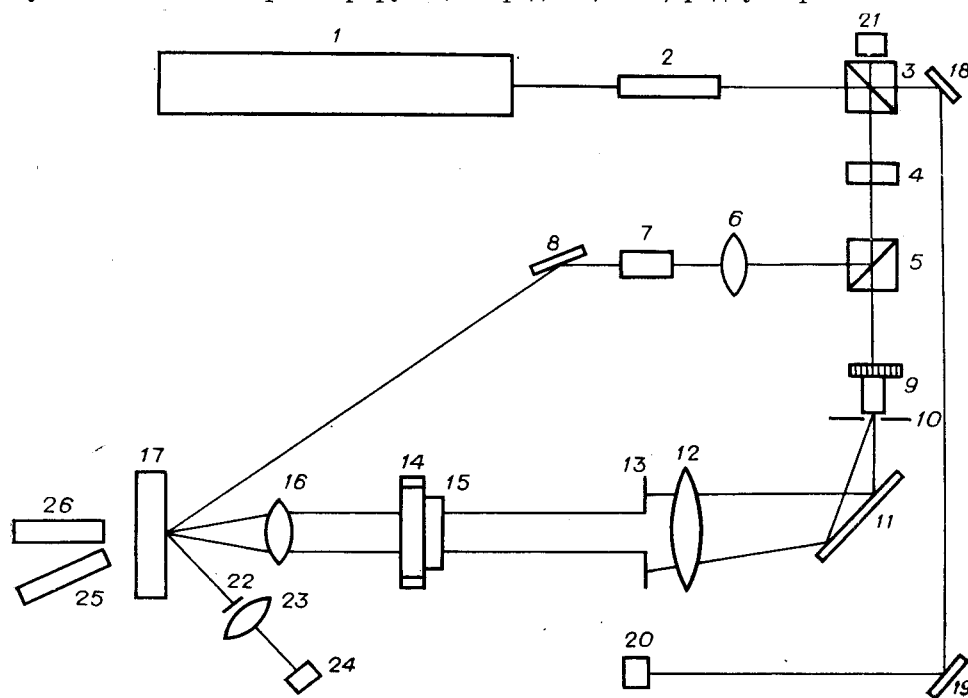


Рис. 1.

нового фронта более 2 м. Узел регулировки мощности состоит из двух полярироидов; первый из них неподвижен (определяет поляризацию пучка), второй — вращается (с его помощью устанавливается необходимое соотношение мощностей опорного и предметного пучков). Зеркало 8 позволяет получить требуемый угол падения опорного пучка на модуль памяти и совместить его с предметным пучком.

Подсистема формирования предметного пучка содержит микробиъектив 9 ( $20\times$ ), фильтрующую диафрагму 10 ( $d = 15$  мкм), зеркало 11, коллимирующую линзу 12 ( $f = 250$  мм) и диафрагму 13. Для освещения ЭУЦТ 14 на выходе коллиматора формируется плоский пучок света размером  $10 \times 10$  мм.

Подсистема оптического преобразования изображения страницы данных представляет ЭУЦТ 14, в котором формируется изображение страницы данных, при совмещении которого с опорным пучком образуется интерференционная картина (голограмма).

Подсистема контроля углового положения и мощности лазерного пучка состоит из зеркал 18, 19, четырехсекторного фотоприемника 20 и фотодиода 21. Пучок лазера, прошедший через светоделительный кубик 3, отражается зеркалами 18, 19 и попадает на фотоприемник 20. При смещении лазерного пучка относительно центра фотоприемника на его выходе формируется электрический сигнал, применяемый в качестве сигнала обратной связи. Измерение мощности лазерного пучка проводится с помощью фотодиода 21, на который попадает рассеянный свет (от матовой грани светоделительного кубика 3).

В подсистему контроля дефектов регистрирующей среды входят непрозрачный экран 22, линза 23 и фотодиод 24. При наличии дефекта опорный пучок рассеивается. Отраженный рассеянный свет с помощью линзы 23 собирается на входе фотодиода 24. Экран 22 препятствует попаданию на фотодиод 24 прямого отраженного пучка. Отбраковка дефектных участков регистрирующей среды проводится по величине выходного сигнала фотодиода.

Интерференционная картина, получаемая при совмещении пучков, контролируется с помощью микроскопа 25, оптическая ось которого рас-

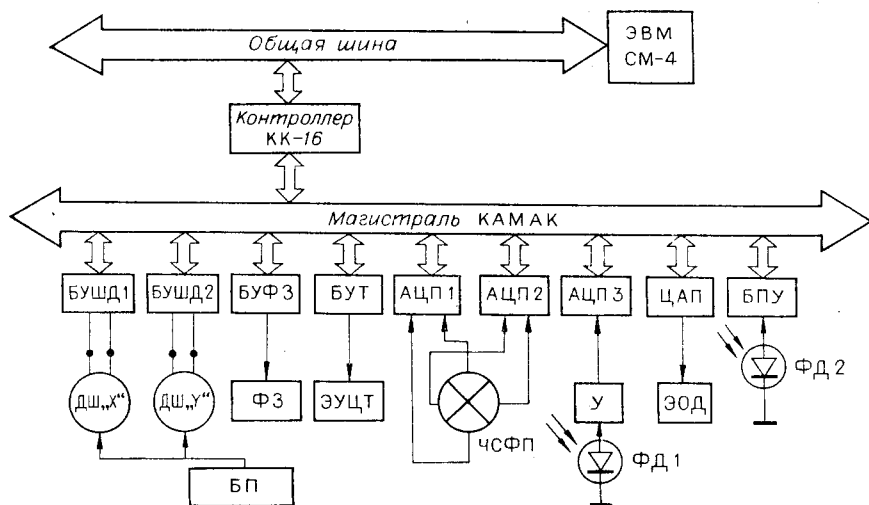


Рис. 2.

положена на биссектрисе угла между опорным и предметным пучками. Контроль совмещения ЭУЦТ с амплитудно-фазовой маской проводится при помощи телескопической трубки 26, настроенной на бесконечность.

Электронная система управления УЗГ обеспечивает автоматический (от ЭВМ) и ручной режимы работы. Схема системы изображена на рис. 2, где БУШД1, БУШД2 — блоки управления шаговыми двигателями; БУФЗ — блок управления фотозатвором; БУТ — блок управления транспарантом ЭУЦТ; АЦП1, АЦП2, АЦП3 — аналого-цифровые преобразователи; ЦАП — высоковольтный цифроаналоговый преобразователь; БПУ — блок порогового устройства; БП — блок питания; ФД1, ФД2 — фотодиоды; ЧСФП — четырехсекторный фотоприемник.

С помощью БУШД1 и БУШД2 осуществляется перемещение двухкоординатного прецизионного стола. Возможное количество шагов по координатам  $x$ ,  $y$  составляет 512. В автономном режиме однократным нажатием кнопок обеспечиваются установка стола в положение, соответствующее началу отсчета, или его перемещение в одном из двух противоположных направлений на размер шага матрицы голограмм. В автоматическом режиме блоки управляются 10-разрядным двоичным кодом, поступающим от ЭВМ. Девять первых разрядов этого кода используются для задания координаты текущего положения стола, десятый разряд — для установки начала отсчета.

Длительность экспозиции в пределах 10—10240 мс задается БУФЗ аппаратным (с клавишного регистра на передней панели модуля) или программным (от ЭВМ 10-разрядным двоичным кодом) способом. Дискретность установки 10 мс. Кроме того, в автономном режиме фотозатвор может быть постоянно открытым. БУТ управляет ЭУЦТ путем выработки в соответствии с записываемой информацией определенной последовательности напряжений на его шинах. Работа блока осуществляется в два этапа: 1 — запись информации в буферное запоминающее устройство (БЗУ) емкостью  $32 \times 32$  бит; 2 — выдача содержимого БЗУ на ЭУЦТ.

АЦП1, АЦП2, ЧСФП, ЦАП, ЭОД образуют подсистему стабилизации углового положения лазерного пучка. При работе этой подсистемы с помощью ЭОД проводится перемещение пучка лазера в плоскости ЧСФП и определяется такое его положение, при котором разность напряжений, снимаемых с противоположных секторов ЧСФП, минимальна. Коррекция положения пучка осуществляется периодически (примерно один раз в минуту).

В подсистему стабилизации экспозиции при записи голограмм входят ФД1, усилитель (У), АЦП3. Стабилизация экспозиции достигается путем коррекции времени экспозиции в зависимости от величины измеренной мощности лазерного пучка  $P$ .

Работа подсистемы обнаружения дефектных участков регистрирующей среды, состоящей из БПУ и ФД2, основана на измерении мощности рассеянного света, возникающего при отражении опорного пучка от фотопластинки, и сравнении ее с некоторым заданным пороговым значением. Если мощность рассеянного света больше порогового значения, то БПУ вырабатывает сигнал (он поступает в ЭВМ), и запись голограммы на этом участке не проводится.

Все блоки, входящие в электронную систему управления УЗГ, выполнены в стандарте КАМАК и управляются в автоматическом режиме от ЭВМ СМ-4 через крейт-контроллер КК-16.

**Программное обеспечение.** Создан пакет программ, обеспечивающих запись голографических модулей памяти, а также отладку и тестирование электронных блоков [3]. Работа осуществляется с комплексом СМ-4 под управлением операционной системы реального времени ОС-РВ 2.0. Страницы данных формируются программно чередованием двух 32-разрядных строк, задаваемых с терминала. В модуле принята следующая адресация: блок голограмм — дорожка голограмм — голограмма, причем количество блоков 5, дорожек в блоке 170, голограмм в дорожке

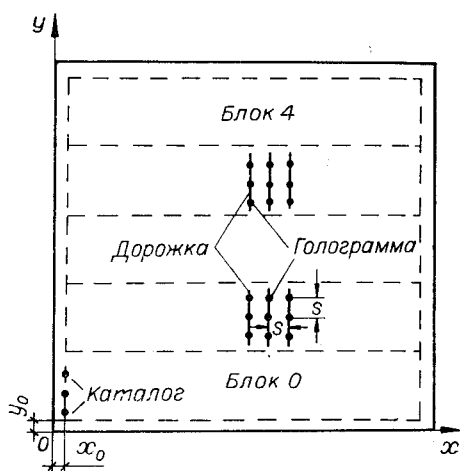


Рис. 3.

32. Дорожки располагаются по координате  $x$ , а блоки и голограммы в дорожке — по координате  $y$ . В поле модуля (рис. 3) записываемая матрица определяется начальным адресом  $x_0, y_0$ , числом блоков, числом дорожек в блоке и шагом между голограммами  $s$ , которые задаются в начальном диалоге с терминала.

Нулевая дорожка нулевого блока отводится для записи каталога дефектных голограмм модуля. Этот каталог формируется по результатам контроля дефектов регистрирующей среды во время записи. Запись данных ведется в корректирующем коде Хемминга, исправляющем одиночные ошибки каждой строки страницы данных и обнаруживающем двой-

ные ошибки. Записывается также контрольная сумма страницы данных. Операции кодирования выполняются программно.

**Конструкция оптико-механического блока.** На массивной плите размещены оптико-механические узлы устройства и прецизионный двухкоординатный стол, предназначенный для перемещения модуля памяти при записи голограмм. Перемещение осуществляется от шаговых двигателей ДШ-0,1А (число шагов на один оборот 16, скорость 100 шаг/с) через редуктор с передаточным отношением 1:5 и пару «микровинт — гайка». Винтовая пара имеет следующие характеристики: шаг 1 мм, максимальная величина хода 70 мм, абсолютная накопленная погрешность в пределах всего хода не более 2 мкм. Направляющие, заимствованные из серийного микроскопа БМИ-1, обеспечивают непрямолинейность и неперпендикулярность перемещения стола не более 5 мкм.

На столе устанавливается съемная светозащищенная кассета с неэкспонированной фотопластинкой, вклеенной в специальную рамку, изготовленную из титана. Точность и повторяемость установки модулей достигнуты за счет штифтов на столе и приемного отверстия в рамке.

Плита виброизолирована от подставки с помощью цилиндрических пружин с резонансной частотой 2-3 Гц.

На рис. 4 показан внешний вид оптико-механического блока УЗГ.

**Работа УЗГ.** УЗГ обеспечивает последовательную запись фурье-голограмм в модуль памяти, перемещаемый по двум координатам относительно места совмещения опорного и предметного пучков. Пользователь в начальном диалоге с ЭВМ задает необходимую конфигурацию матрицы голограмм, информацию для записи, параметры работы ЭУЦТ и величину экспозиции. Затем модуль памяти автоматически выводится на позицию первой голограммы. С помощью подсистем стабилизации определяется текущее значение мощности лазерного пучка, проводится подстройка его углового положения и в ЭВМ вычисляется значение времени экспозиции. Далее происходит набор страницы данных на ЭУЦТ, открывается фотозатвор и записывается голограмма. Параллельно осуществляются контроль и отбраковка дефектных участков регистрирующей среды. Запись следующей голограммы происходит аналогичным образом после перемещения модуля памяти на расстояние, равное шагу между голограммами. Информация об адресах дефектных голограмм регистрируется в ЭВМ, затем записывается в специально отведенном месте модуля памяти. После завершения записи основные сведения о данном модуле (номер модуля, режим записи, количество дефектных голограмм и т. п.) выводятся на печать (паспорт модуля).

**Экспериментальные результаты.** В результате комплексных испытаний были определены характеристики наиболее важных элементов УЗГ:

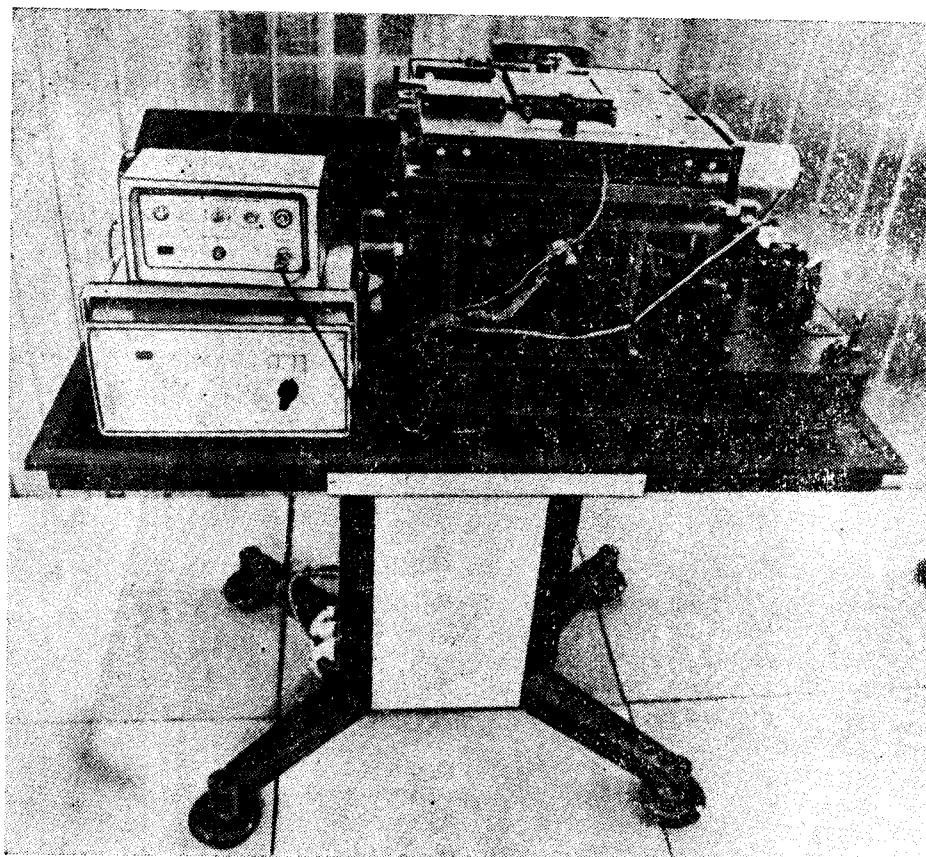


Рис. 4.

лазера, ЭУЦТ, регистрирующей среды, а также выбран оптимальный режим записи голограмм, обеспечивающий требуемые характеристики восстановленных изображений.

Относительная нестабильность мощности используемого в УЗГ лазера (ЛГ-52-1) составила  $\Delta P/P_{cp} = 25\%$ , нестабильность углового положения лазерного пучка  $\Delta\theta \sim 10^{-4}$  рад. После введения подсистем стабилизации экспозиции  $E$  и углового положения лазерного пучка обеспечено  $\Delta E/E \sim 5\%$ ,  $\Delta\theta \sim 10^{-5}$  рад. Измерения характеристик ЭУЦТ проводились с помощью специально созданной фотоматричной измерительной системы (ФМИС) [4]. Средние значения характеристик ЭУЦТ составили:  $K = 200$ ;  $\sigma'_1 = 0,1$ ;  $\sigma'_0 = 0,3$ , где  $K = \bar{P}_1/\bar{P}_0$ ,  $\sigma'_{1,0} = \sigma_{1,0}/\bar{P}_{1,0}$ , а  $\bar{P}_{1,0}$ ,  $\sigma_{1,0}$  — средние значения и среднеквадратические отклонения мощностей оптических «1» и «0». Оптимальные параметры работы ЭУЦТ: напряжение питания  $U_{пит} = 70$  В, время набора строки  $t_{стр} = 8$  мс, время стирания  $t_{ст} = 200$  мс. Общее время набора информации на транспаранте  $t_{наб} = 450$  мс.

В качестве регистрирующей среды использовались голографические фотопластинки ПЭ-2 (подложки из специального форматного стекла  $76 \times 76 \times 2,65$  мм, количество дефектов подложки размером 1,5 мкм на  $1 \text{ см}^2$  не более 3, неплоскостность не более 1 мкм/см). Чувствительность фотопластинок  $50 \text{ эрг/см}^2$ , разрешающая способность 10 000 лин./мм. На эмульсии наблюдались дефекты амплитудного и фазового характера (точки, царапины, пузыри). Дефекты эмульсии ухудшают качество изображения, восстановленного из голограммы. Например, царапина, площадь которой равна 0,08 от площади голограммы, приводит к уменьшению дифракционной эффективности в 1,08, уменьшению контраста в 2,4,

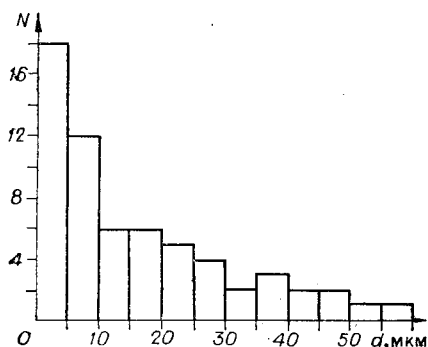


Рис. 5.

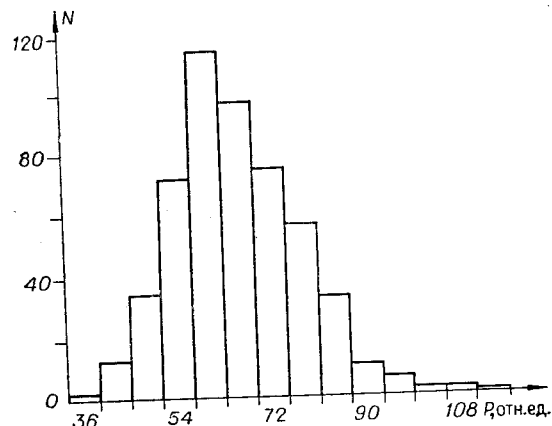


Рис. 6.

увеличению  $\sigma'_1$  в 1,24 раза. На рис. 5 показана типичная гистограмма распределения дефектов эмульсионного слоя до химико-фотографической обработки (измерения проводились на участке  $1 \text{ см}^2$ ). После обработки общее количество дефектов увеличивается примерно в 1,5 раза.

Экспериментально установлено, что в матрице  $32 \times 32$  голограммы наблюдается примерно 1% голограмм с размерами дефектов  $\sim 50 \text{ мкм}$ , 0,1% — более  $100 \text{ мкм}$ .

Проведена запись голограмм с различными значениями экспозиции  $E$  и соотношения мощностей опорного и предметного пучков  $R$ . Характеристики восстановленных изображений измерялись с помощью ФМИС. На рис. 6 показана типичная гистограмма распределения мощности изображений «1». По этим данным в соответствии с методикой, изложенной в [5], для голограмм с различными параметрами записи  $E$ ,  $R$  определялась вероятность ошибки при фотосчитывании  $N$ . Оптимизация режима записи проводилась в соответствии с критерием получения максимума дифракционной эффективности  $\eta$  при заданной величине вероятности ошибочного фотосчитывания  $N$ . Для  $N = 10^{-6}$  получен следующий режим записи:  $E = 8 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/см}^2$ ,  $R = 10 : 1$ , при этом  $\eta = 4,8\%$ ,  $K \approx 100 : 1$ ,  $\sigma'_1 \approx 0,2$ ,  $\sigma'_0 \approx 0,4$ . Усредненные характеристики восстановленных изображений для массива  $32 \times 32$  голограммы составили:  $K = 40 : 1$ ,  $K_{\text{min}} = 4 : 1$ ,  $\sigma'_1 \approx 0,22$ ,  $\sigma'_0 \approx 0,5$ . Усредненные характеристики восстановленных изображений для массива  $32 \times 32$  голограммы составили:  $K = 40 : 1$ ,  $K_{\text{min}} = 4 : 1$ ,  $\sigma'_1 \approx 0,22$ ,  $\sigma'_0 \approx 0,5$ . Усредненные характеристики восстановленных изображений для массива  $32 \times 32$  голограммы составили:  $K = 40 : 1$ ,  $K_{\text{min}} = 4 : 1$ ,  $\sigma'_1 \approx 0,22$ ,  $\sigma'_0 \approx 0,5$ . Усредненное квадратическое отклонение дифракционной эффективности  $\sigma'_\eta$  примерно равно 0,1, а мощность  $P_1$  существенно зависит от количества «1» в регистрируемом изображении страницы (при изменении  $n$  в интервале  $128 \div 1024$   $P_1$  уменьшается более чем в 2 раза). Обработка фотопластинок проводилась в проявителе ПП-2 [6].

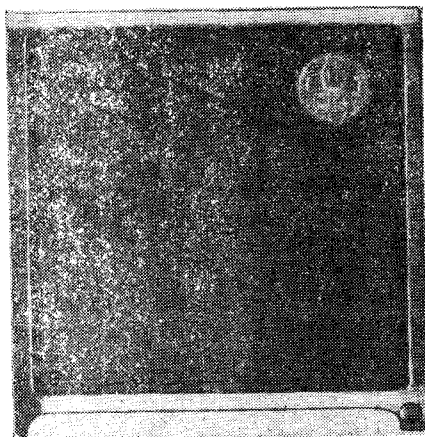


Рис. 7.

Осуществлена автоматическая запись матриц голограмм размерами  $32 \times 32$ ,  $64 \times 64$  и  $160 \times 170$  с тестовыми изображениями страниц. На рис. 7 показан внешний вид модуля памяти с записанной матрицей  $64 \times 64$  голограммы (с удвоенным шагом между голограммами).

**Заключение.** Таким образом, созданное устройство позволяет проводить автоматическую запись цифровых данных в голографические модули памяти (размером  $160 \times 170$  голограмм) и

обладает следующими характеристиками: плотность записи  $0,6 \cdot 10^4$  бит/ $\text{мм}^2$ , диаметр голограммы 0,3 мм, расстояние между голограммами 0,4 мм, емкость страницы данных  $32 \times 32$  бит, емкость модуля памяти 3,5 Мбайт, скорость записи 3000 гол./ч, габариты устройства  $100 \times 100 \times 60$  см. При достигнутом качестве изображений страниц, восстанавливаемых из массива голограмм, вероятность ошибки считывания данных находится на уровне  $10^{-6}$ — $10^{-7}$  (без применения средств коррекции ошибок) [5].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Блок А. А. и др. Устройство автоматической записи матриц голограмм.— Автометрия, 1980, № 2.
2. Блок А. А. и др. Разработка и исследование электроуправляемого транспаранта на основе жидких кристаллов.— В кн.: Труды IV Всесоюз. конф. по голографии. Ереван: ВНИИРИ, 1982.
3. Вьюхина Н. Н. и др. Программные средства для исследований, отладки и тестирования ГЗУ.— Автометрия, 1984, № 3.
4. Бутт В. Е. и др. Фотоматричная система для исследования изображений страниц информации в голограммных ЗУ.— В кн.: Тез. докл. I Всесоюз. конф. по радиооптике. Фрунзе: ФПИ, 1981.
5. Пен Е. Ф. Расчет достоверности считывания информации в ГЗУ на основе экспериментальных данных характеристик качества восстановленных изображений.— В кн.: Труды IV Всесоюз. конф. по голографии. Ереван: ВНИИРИ, 1982.
6. Усанов Ю. Е. Влияние состава проявителя на свойства голографического изображения.— В кн.: Регистрирующие среды для голографии. Л.: Наука, 1975.

*Поступила в редакцию 30 декабря 1983 г.*

УДК 681.327.68 : 778.38

**Б. В. ВАНЮШЕВ, А. В. ВОЛКОВ, И. С. ГИБИН,  
В. А. ДОМБРОВСКИЙ, С. А. ДОМБРОВСКИЙ,  
Т. Н. МАНТУШ, Е. Ф. ПЕН, В. И. ПЕЧУРКИН,  
В. А. ПОЛИВАНОВ, А. Н. ПОТАПОВ, П. Е. ТВЕРДОХЛЕБ,  
А. И. ЧЕРНЫШЕВ, Л. Ф. ЧЕРНЫШЕВ**  
(Новосибирск)

### УСТРОЙСТВО ХРАНЕНИЯ И СЧИТЫВАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДАННЫХ В ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ АРХИВНОЙ ПАМЯТИ

Цель настоящей статьи — дать краткие сведения о структуре, принципе действия, оптической и электронной системах, программном обеспечении, конструкции и результатах испытаний опытного образца архивного голографического запоминающего устройства (АГЗУ) емкостью 1000 Мбайт. Данная работа является развитием предыдущего этапа исследований и разработок [1].

Созданное АГЗУ отличается от известных устройств [1—4] более высокой емкостью памяти (до 1000 Мбайт) и надежностью работы оптико-механических систем, возможностью автоматической смены модулей памяти, а также конструктивной законченностью.

**Структура и принцип действия.** Созданное устройство имеет общий накопитель барабанного типа и две автономные системы фотосчитывания с идентичными оптико-механическими узлами и электронными блоками. Схема АГЗУ с одним каналом считывания данных приведена на рис. 1, где 1 — лазер, 2 — электрооптический дефлектор (ЭОД), 3 — оптика формирования считывающего пучка, 4 — акустооптический дефлектор (АОД), 5 — оптическая система формирования раstra считывающих