

С. Ф. КИБИРЕВ, С. И. КОНЯЕВ, С. И. НАЙМАРК

(Новосибирск)

ФОТОМАТРИЧНЫЙ АССОЦИАТИВНЫЙ НАКОПИТЕЛЬ

Наиболее реальный путь создания относительно недорогой памяти большой емкости (10^8 – 10^{10} бит) со свойствами ассоциативной выборки связан с использованием в адресном ЗУ буферного полупроводникового ЗУ [1]. Такая ассоциативная память получила название двухуровневой или блочно-ориентированной. В частности, двухуровневая ассоциативная память может быть создана на основе магнитного диска и МДП-интегрального ассоциативного ЗУ [2]. Поисковые операции в этом случае выполняются последовательно-параллельным способом путем записи и обработки в ассоциативном буфере отдельных частей массива данных. Указанный путь имеет существенное ограничение: большая доля времени затрачивается на операцию последовательной записи данных в ассоциативное ЗУ (АЗУ). В связи с этим выигрыш в быстродействии достигается лишь при решении сложных задач ассоциативной обработки данных.

Операция последовательной записи данных устраняется в структуре «странично организованная голографическая память — оптоэлектронное АЗУ» (последнее представляет собой полупроводниковое АЗУ с оптическим входом). Запись данных в этом случае проводится параллельно во все ячейки оптоэлектронного АЗУ путем проецирования на фоточувствительные входы страниц данных из голографической памяти. В рассматриваемой структуре двухуровневой ассоциативной памяти сочетается высокая скорость выдачи данных из странично организованной голографической памяти (1000 Мбит/с) с параллельностью записи и обработки страниц данных в оптоэлектронном АЗУ. Это обуславливает потенциально высокую производительность структуры в целом.

Основной отличительной особенностью оптоэлектронного АЗУ является конструкция ассоциативного накопителя, который представляет собой однородную матрицу из $L \times N$ ассоциативных ячеек, совмещенных с соответствующей матрицей фотоприемников. Такой накопитель назван нами фотоматричным ассоциативным накопителем (ФМАН).

Данная работа посвящена вопросам разработки ФМАН в виде оптоэлектронной БИС, фотоприемная часть которой по своим геометрическим и оптоэлектрическим параметрам удовлетворяет требованиям постоянной голографической памяти [3]. В работе рассматриваются структура оптоэлектронного АЗУ, содержащего ФМАН; конструкция и схемотехника ФМАН, выполненного по МДП-интегральной технологии; результаты функциональных испытаний и измерения оптоэлектрических параметров экспериментальных образцов ФМАН.

ФМАН в структуре оптоэлектронного АЗУ. Массивы цифровой информации в голограммном ЗУ со страничной организацией представлены в виде последовательности голограмм, в каждой из которых записана страница данных K , состоящая из L N -разрядных двоичных слов $(k_{l1} \dots k_{lN} \dots k_{lN})$ ($l = \overline{1, L}$). Эти слова в зависимости от вида обработки представляют собой файл данных или набор признаков, проецируемых при восстановлении на фоточувствительную поверхность ФМАН в виде темных и светлых пятен.

Оптоэлектронное ЗУ имеет в общих чертах традиционную структуру [4], изображенную на рис. 1, а: 1 — ФМАН, представляющий собой матрицу ячеек памяти, каждая из которых содержит оптический вход и схему ассоциативной обработки; 2 — L -разрядный регистр адреса; 3 — N -разрядный выходной регистр; 4 — N -разрядный регистр поискового ар-

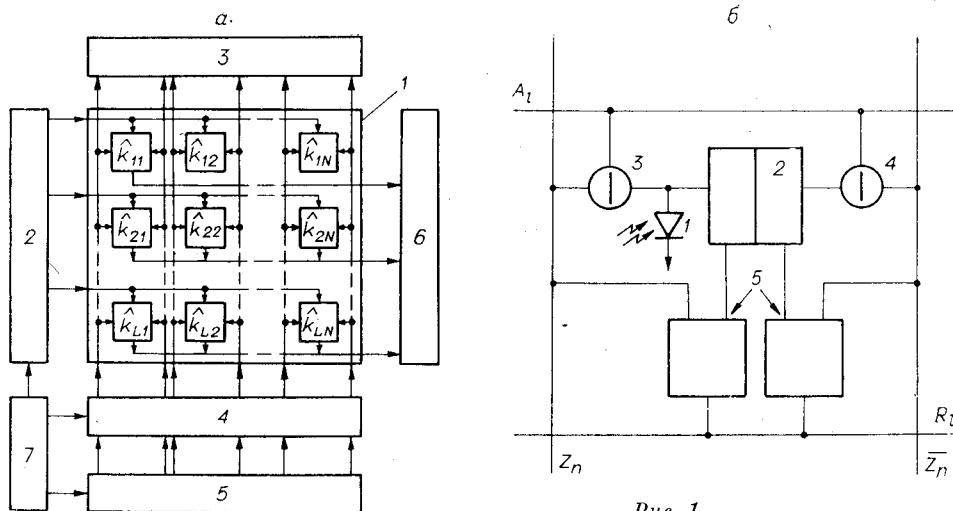


Рис. 1.

гумента Z ; 5 — N -разрядный регистр маски M ; 6 — L -разрядный индикатор совпадений с входной перестраиваемой логикой; 7 — блок управления.

Базисной функцией ассоциативного процесса обработки является вектор-функция $R = \{r_l\}$, реализуемая параллельно в пределах страницы $K = \{k_{ln}\}$ и определяемая равенством

$$r_l = \sum_{n \in \{M \neq 0\}} (k_{ln} Z_n + \bar{k}_{ln} \bar{Z}_n) \quad (1)$$

либо

$$r_l = \sum_{n \in \{M \neq 0\}} (k_{ln} \bar{Z}_n + \bar{k}_{ln} Z_n), \quad (2)$$

где Z_n — n -й разряд двоичного кода поискового аргумента; k_{ln} — n -й разряд двоичного слова с номером l , записанного в ФМАН. Суммирование берется по всем незамаскированным разрядам, для которых $M_n \neq 0$.

Поскольку Z_n и k_{ln} могут принимать значения «0» или «1», можно определить суммирование в (1), (2) двойко. Если суммирование проводится в обычном смысле, то величина r_l является расстоянием Хэмминга между вектором-словом K_l и вектором-поисковым аргументом Z . Если суммирование в (1), (2) определить как конъюнкцию, то r_l индицирует совпадение (с точностью до замаскированных разрядов) поискового аргумента и слова, хранящегося в ФМАН.

В простейшем случае индикаторы совпадения, представляющие собой пороговые устройства, регистрируют значение, превышающее порог нуля, формируя тем самым вектор-функцию R , адекватную позиционному адресу совпавшего с кодом Z слова. С помощью регистра адреса это слово может быть переписано в выходной регистр и передано по каналу связи.

На рис. 1, б приведена функциональная схема ячейки ФМАН, в которой реализуются следующие необходимые для работы в составе оптоэлектронного АЗУ микрооперации: параллельная электрическая запись N -разрядного входного слова по заданным адресам («Электрическая запись»), параллельная оптическая запись L N -разрядных двоичных слов («Оптическая запись»), параллельное считывание двоичного N -разрядного слова по заданному адресу («Считывание»), параллельная реализация функции R в $L \times N$ -странице («Опрос»).

Каждая ячейка ФМАН состоит из фотоприемника 1, элементов памяти 2, записи/считывания 3, 4 и сравнения 5. Ячейки в матрице объединены двумя ортогональными системами шин. Первая из них состоит из N пар разрядных шин Z_n, \bar{Z}_n запроса/считывания, объединяющих столб-

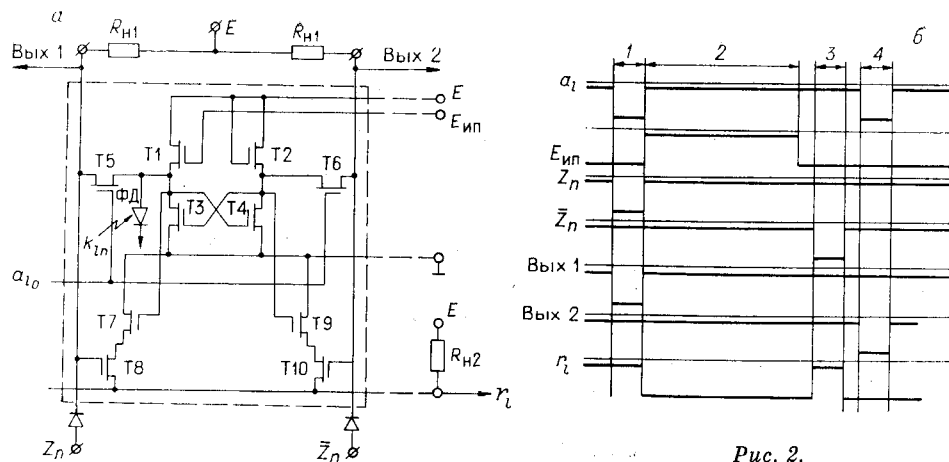


Рис. 2.

цы матрицы, вторая — из L адресных шин A_i и L шин совпадения R_i , объединяющих строки матрицы. Система адресных шин $\{A_i\}$ обеспечивает словарный доступ в матрицу накопителя при электрических записи/чтении. Шины совпадения $\{R_i\}$ обеспечивают выполнение функции r_i для каждого слова, хранящегося в накопителе, и как частный случай функции r_i — считывание разрядных срезов слов. Фотоприемник может рассматриваться как дополнительный доступ по записи информации в каждую ячейку. В общем случае функционирование ячейки ФМАН описывается с помощью системы уравнений

$$\begin{cases} \hat{k}_{in}(t+1) = Z_n(t)a_i(t) + k_{in}(t) + k_{in}(t+1), \\ \tilde{k}_{in}(t+1) = \hat{k}_{in}(t+1)a_i(t+1), \\ r_{in}(t+1) = [\hat{k}_{in}(t+1)Z_n(t+1) + \overline{\tilde{k}_{in}(t+1)}\overline{Z_n(t+1)}]M_n, \end{cases} \quad (3)$$

где $\hat{k}_{in}(t+1)$ — состояние триггера 2 в момент времени $(t+1)$; $\tilde{k}_{in}(t+1)$ — n -й разряд слова, считываемый по Z -, \bar{Z} -шинам в момент времени $(t+1)$; $r_{in}(t+1)$ — значение функции «Равнозначность», реализуемое в схеме сравнения 5 на шинах $\{R_i\}$ для каждой фотоячейки; M_n — значение n -го разряда маски; a_i — сигнал по адресной шине A_i .

Электрическая схема и конструкция ФМАН. Электрическая схема ячейки ФМАН, изображенная на рис. 2, а, содержит модифицированный относительно [5] фототриггер на МДП-транзисторах Т1—Т4 и фотодиод ФД. МДП-транзисторы Т5, Т6 работают как проходные ключи для записи и чтения информации. Логическая схема на транзисторах Т7, Т8 и Т9, Т10 представляет собой две схемы И, входы которых подключены соответственно к плечам триггера и шинам запроса, как показано на рис. 2, а. Выходы схем И объединены в шинное ИЛИ, реализуемое по шинам совпадения $\{R_i\}$.

Функционирование ячейки рассмотрим на примере следующей последовательности микроопераций: электрическая запись «0», оптическая запись «1», опрос аргументом $Z = \langle 1 \rangle$, считывание «1». Импульсная диаграмма управляющих (a_i и $E_{ин}$), входных (Z_n , \bar{Z}_n , k_{in}) и выходных (Вых 1, Вых 2, r_i) информационных сигналов показана на рис. 2, б, где 1 — электрическая запись, 2 — оптическая запись, 3 — опрос, 4 — считывание.

Электрическая запись в ячейку ФМАН осуществляется путем подачи на соответствующую адресную шину A_i высокого потенциала, который открывает ключи Т5, Т6 и коммутирует разрядные шины Z_n и \bar{Z}_n ко входам триггеров. На эту пару разрядных шин подаются потенциалы, соответствующие значению разряда записываемого слова в парафазном коде. При этом в случае замаскированного разряда на разрядные шины

через нагрузку подается высокий потенциал, значение которого соответствует условию неразрушающего считывания. При записи либо подтверждается состояние триггера, либо плечо триггера с высоким потенциалом разряжается через заземленную разрядную шину, а противоположное плечо заряжается через нагрузочный транзистор до высокого потенциала. Так, запись нуля в триггер соответствует высокому потенциалу на стоке транзистора Т4.

При оптической записи нагрузочный транзистор Т1 запирается потоком энергии оптической «1», приводит к срабатыванию обратной связи, и емкость фотодиода оказывается разряженной через транзистор обратной связи Т3. При этом напряжение на противоположном плече триггера увеличивается до уровня логической «1».

Процесс оптической записи заканчивается подачей на затвор Т1 отпирающего потенциала. При этом информация, введенная оптически, статически запоминается и хранится вплоть до отключения источника питания. Фототриггер в этом режиме приблизительно в 10^2 раз менее чувствителен к мощности светового потока, так как фототок должен значительно превысить ток, протекающий через нагрузочный транзистор.

При выполнении микрооперации «Опрос» на пары разрядных шин подаются потенциалы, соответствующие инверсному (по отношению к слову при записи) слову-аргументу опроса в парафазном коде. Замаскированным разрядам соответствует нулевой потенциал на обеих шинах. Если парафазный код аргумента опроса на шинах совпадает с состоянием элемента памяти, то схема сравнения на транзисторах Т7—Т10 оказывается в проводящем состоянии, и по шине R_i через нагрузку R_{n2} протекает ток. Если совпадения нет, то ток в нагрузке R_{n2} отсутствует. Считывание слов из ФМАН можно реализовать подачей адресного сигнала по шине A_i (см. a_i на рис. 2, б). При этом информация считывается из триггера по шинам Z_n, \bar{Z}_n на нагрузочных сопротивлениях в парафазном коде. Для того чтобы выходные сопротивления регистра опроса (см. рис. 1, а) не шунтировали выходные сигналы ячейки, необходимы развязки, выполненные в виде ключей или диодов Д1, Д2 (см. рис. 2, а). Микрооперации электрической и оптической записей, опроса и считывания могут следовать в произвольной последовательности в соответствии с микропрограммой управления ФМАН. Это обеспечивает достаточную функциональную полноту, гибкость и перестраиваемость оптоэлектронного АЗУ для обеспечения вычислительного алгоритма решения конкретной задачи ассоциативного поиска.

Экспериментальные образцы ФМАН размерностью 12×12 фотоячеек изготавливались в виде интегральной схемы по p -канальной МДП-технологии с кремниевым затвором. На рис. 3, а приведена фотография кристалла микросхемы. Размеры кристалла ФМАН составляли 5×5 мм, шаг между фотоприемниками 0,3 мм, размер фотоприемной площадки $0,1 \times 0,1$ мм. Фоточувствительным элементом схемы служил p - n -переход, представляющий собой специально увеличенную сток-истокую область в одном из плеч триггерной схемы. Фоточувствительный элемент работал как фотодиод, смещенный в обратном направлении, причем для записи оптической информации использовался режим накопления фотозаряда [6]. Кристаллы ФМАН помещались в планарный 48-выводной корпус с прозрачным окном (см. рис. 3, б).

Экспериментальные результаты. Обсуждение результатов. Измерения фотоэлектрических и функциональных параметров ФМАН проводились с помощью аппаратуры [7], состоящей из программируемого много-

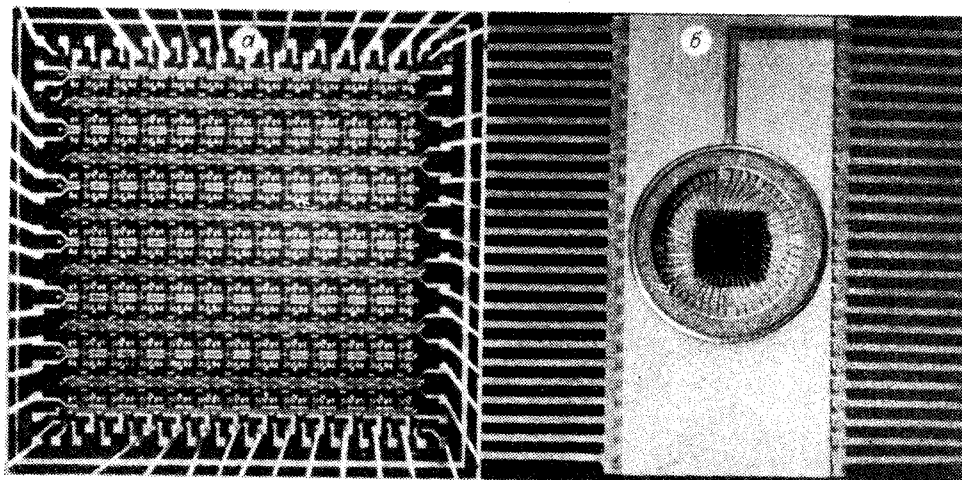


Рис. 3.

капельного генератора, регулируемых источников питания E_1 , E_2 , когерентного источника света ($\lambda = 0,63$ мкм), фокусирующей оптики и юстировочных приспособлений.

Многоканальный программируемый генератор использовался для задания диаграммы управления фотоячейкой ФМАН, которая контролировалась пятиканальным осциллографом. Сфокусированный в пятно $\varnothing = 50$ мкм световой поток регистрировался калиброванным фотодиодом и направлялся на фоточувствительную площадку ячейки ФМАН одновременно с подачей диаграммы управления на соответствующие шины.

Для удобства наблюдения сигналов на осциллографе применялись тесты, содержащие пары микроопераций: «Электрическая запись — считывание»; «Оптическая запись — считывание»; «Электрическая запись — опрос» (рис. 4–6).

На рис. 4, *a* представлена осциллограмма управляющих напряжений для теста «Электрическая запись — считывание», на рис. 4, *б* — осциллограмма реакции ячейки, считываемой с нагрузочных сопротивлений $R_{н1}$. Первая группа импульсов на шинах A_i , Z_n , \bar{Z}_n означает запись в триггер информации $Z = 1$, $\bar{Z}_n = 0$, при этом напряжение на нагрузочных сопротивлениях $R_{н1}$ отслеживает записываемую информацию (рис. 4, *б*). Второй импульс по адресной шине A_i (см. рис. 4, *a*) опрашивает состояние триггера. Третья группа импульсов на рис. 4, *a* определяет запись

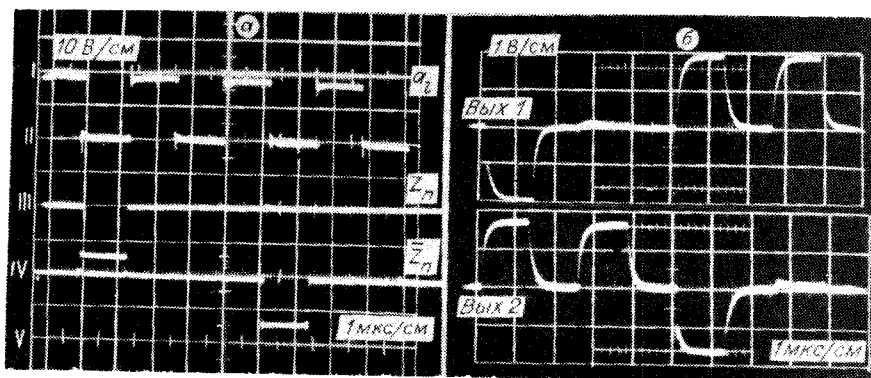


Рис. 4.

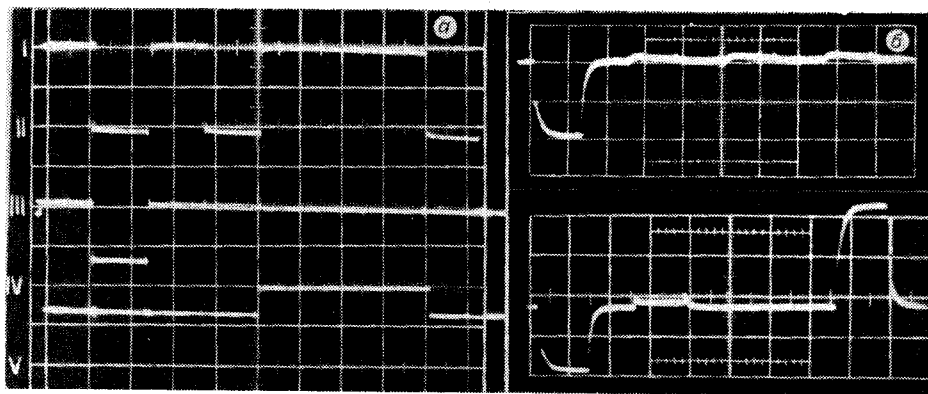


Рис. 5.

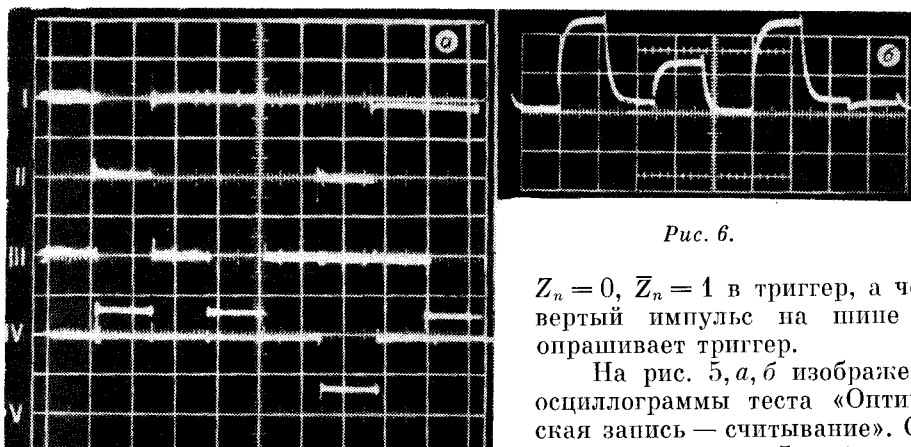


Рис. 6.

$Z_n = 0$, $\bar{Z}_n = 1$ в триггер, а четвертый импульс на шине A_1 опрашивает триггер.

На рис. 5, а, б изображены осциллограммы теста «Оптическая запись — считывание». Осциллограмма рис. 5, а иллюстрирует диаграмму управления

фотоэлемента. Первый импульс по адресной шине разрешает предустановку триггера в состояние «0». Для этого по шинам Z_n и \bar{Z}_n подается код «0», «1», такой, что емкость фотодиода (ФД) в результате предустановки оказывается заряженной. Второй импульс по адресной шине проверяет состояние триггера. На следующем такте собственно «оптической записи» нагрузочный транзистор Т1 (см. рис. 2, а) отключается сигналом $E_{ип}$ (см. рис. 5, а). При этом фотодиод работает в режиме накопления фотозаряда. Третий импульс по адресной шине A_1 проверяет результат записи. Реакция фотоэлемента на тест приведена на осциллограммах рис. 5, б и в для случаев $k_{in} = 0$ и $k_{in} = 1$.

Для иллюстрации работы ФМАН в режиме сравнения с поисковым аргументом использовался тест «Электрическая запись — опрос» (рис. 6). Первый импульс по адресной шине (см. рис. 6, а) разрешает предустановку триггера в состояние «0» потенциалами на разрядных шинах Z_n и \bar{Z}_n . На следующем такте происходит сравнение содержимого триггера с кодом Z_n и \bar{Z}_n . Третий такт — запись в триггер «1», четвертый — сравнение с тем же кодом. На рис. 6, б изображена осциллограмма выходных сигналов схемы на нагрузке $R_{н2}$. На втором и четвертом тактах отображается результат сравнения.

При питающих и управляющих напряжениях -12 В пороговая энергия переключения триггера не превышала 10^{-12} Дж/ячейку для излучения длины волны $\lambda = 0,63$ мкм гелий-неонового лазера. Увеличения чувствительности фотоэлемента можно добиться снижением питающих напряжений. В этом случае уменьшается помехоустойчивость схемы. Другой фактор, ограничивающий чувствительность схемы, заключается в не-

- симметричной паразитной импульсной помехе, имеющей место при коммутации нагрузочного МДП-транзистора. Однако возможно уменьшение
- In: 1972 Fall Joint Computer Conf., AFIPS Cont. Proc. Montvale. N. Y.: AFIPS Press, 1972, p. 681—690.
3. Гибин И. С. Расчет и выбор параметров оптических систем голограммных запоминающих устройств.— Автометрия, 1974, № 6.
 4. Прангишвили И. В., Попов Г. М., Смородинова О. Г., Чудин А. А. Однородные микроэлектронные ассоциативные процессоры.— М.: Сов. радио, 1973.
 5. Jäntsh O., Hundelshausen U. V., Feigt I., Hering W. Detector Matrix for a Holographic Memory.— Sci. Res. and Dev. Reports, 1973, vol. 2, N 1, p. 34—38.
 6. Веклер Г. Пути создания фотополупроводниковых устройств передачи изображения на основе использования режима накопления заряда.— Электроника, 1967, т. 40, № 9.
 7. Наймарк С. И., Радзюкевич В. П., Ротштейн М. Е. Некоторые методы и аппаратные решения, используемые при испытаниях фотоприемных матричных элементов.— Автометрия, 1977, № 2.

Поступила в редакцию 18 февраля 1981 г.

УДК 621.035

И. И. МОХУНЬ, В. К. ПОЛЯНСКИЙ, В. И. ПРОТАСЕВИЧ, В. В. ЯЦЕНКО

(Черновцы — Казань)

ВЛИЯНИЕ ФАЗОВЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ НА СВОЙСТВА ОПТИЧЕСКОГО ТРАКТА

Из-за наличия фазовых неоднородностей тракты оптических систем обычно обладают волновыми aberrациями, которые существенно снижают отношение сигнал — шум (ОСШ).

В данной работе на примере системы согласованной фильтрации сделана попытка оценить влияние фазовых неоднородностей на ОСШ в корреляционной плоскости и выработать практические рекомендации, касающиеся конструирования оптического тракта.

Рассмотрим оптическую схему типичной когерентной системы обработки информации (рис. 1). Для простоты проанализируем одномерный случай. Объект T с входной функцией $f(x)$ освещается плоской волной. В фокальной плоскости объектива O_1 (в идеальном случае) поле описывается преобразованием Фурье от входной функции $f(x)$. В этой плоскости записывается голограмма-фильтр H . В дальнейшем, восстанавливая голограмму-фильтр объектным пучком, исследуем корреляционную функцию, наблюдаемую в плоскости обратного фурье-преобразования P_n . В этом случае ОСШ не зависит от положения $f(x)$ в плоскости P_x (т. е. система пространственно инвариантна) [1].

Если в оптическом тракте пучка имеется фазовая неоднородность Φ (транспарант), расположенная вблизи входной плоскости P_x , то она модулирует входную функцию. Когда расстояние между P_x и транспарантом велико, то модулируется поле, определяемое дифракцией на объекте T .

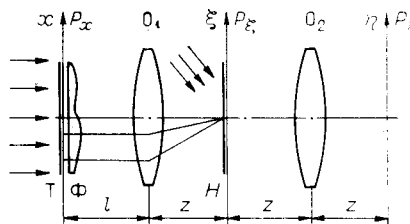


Рис. 1.