

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 681.325.5 : 535

Л. А. ГИБИНА, М. А. ГОФМАН, Е. С. НЕЖЕВЕНКО, В. И. ФЕЛЬДБУШ
(Новосибирск)

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИГНАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОРОВ
В РЕЖИМЕ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ И СИГНАЛОВ**

В [1] показано, что новый класс вычислительных устройств — оптико-электронные сигнальные процессоры (ОСП) — позволяет при одной и той же базовой структуре настраиваться на решение различных задач обработки сигналов и изображений, что осуществляется путем изменения связей в блоках переадресации. Там же приведены примеры такой настройки, однако рассмотрены лишь функциональные схемы ОСП. Целью настоящего сообщения, представляющего собой фактически продолжение работы [1], является доказательство того, что базовая структура ОСП и блоки адресации могут быть реализованы с использованием имеющейся в настоящее время элементной базы, а экспериментальные исследования подтверждают, что на ее основе могут быть построены ОСП высокой производительности. Следует, однако, отметить, что эксперименты имели, скорее, качественный характер, поскольку в них не были исследованы вопросы точности вычислений.

Рассмотрим три из пяти задач обработки изображений и сигналов, описанных в [1]: вычисление двумерной корреляционной функции; обработка сигналов, передаваемых с помощью распространяющихся в пространстве волн; матричное умножение.

ОСП для вычисления двумерной корреляционной функции в системе распознавания изображений. Двумерная корреляционная функция описывается выражением

$$R(\xi, \eta) = \iint S(x, y) g(\xi - x, \eta - y) dx dy,$$

где $S(x, y)$ и $g(x, y)$ — коррелируемые изображения; $R(\xi, \eta)$ — функция взаимной корреляции.

Оптическая схема настройки ОСП на двумерную корреляцию приведена на рис. 1.

Если $S(x, y)$ представлено в виде телевизионного изображения, то входным сигналом ОСП является вектор — часть строки телевизионного кадра, состоящая из $n = 32$ отсчетов. Декремент номера строки осуществляется путем построчного сканирования кадра. Заметим, что входным сигналом может быть и любой другой вектор, получающийся при сканировании двумерного массива информации тем или иным способом: движущейся линейкой фотоприемников, одномерным сканером и т. д. Вектор электрических сигналов подается на блок ввода — светодиодную матрицу (СДМ). Световая энергия, высвечиваемая светодиодом в течение одного такта, пропорциональна соответствующей составляющей вектора (такт определяется периодом дискретизации сигнала). Первый блок адресации — свободное пространство + коллиматор. Они создают набор квазипараллельных пучков, каждый из которых освещает всю плоскость модулятора M , на котором записано изображение $g(x, y)$. Световой поток после модулятора, несущий информацию о произведении $S(x, y)$ и $g(x, y)$, преобразуется вторым блоком адресации следующим образом. Световой поток от светодиода с номером n переносит в выходную плоскость изображение $g(x, y)$ со сдвигом по одной координате, пропорциональным n .

Таким образом, N светодиодов формируют сумму N изображений $g(x, y)$, сдвинутых по одной координате. Легко показать, что результат есть не что иное, как функция корреляции одной строки телевизионного кадра со вторым коррелируемым изображением. Технически такая процедура делается следующим образом. Объектив O_2 формирует промежуточное изображение источников света, проецирующееся в плоскость блока зеркального растра (БЗР). Зеркала этого растра развернуты по одной координате, за счет чего объектив O_3 формирует в плоскости ПЗС-матрицы сумму сдвинутых изображений.

Получившаяся в результате частная функция корреляции запоминается в виде зарядового рельефа на ПЗС-матрице. На следующем такте производится декре-

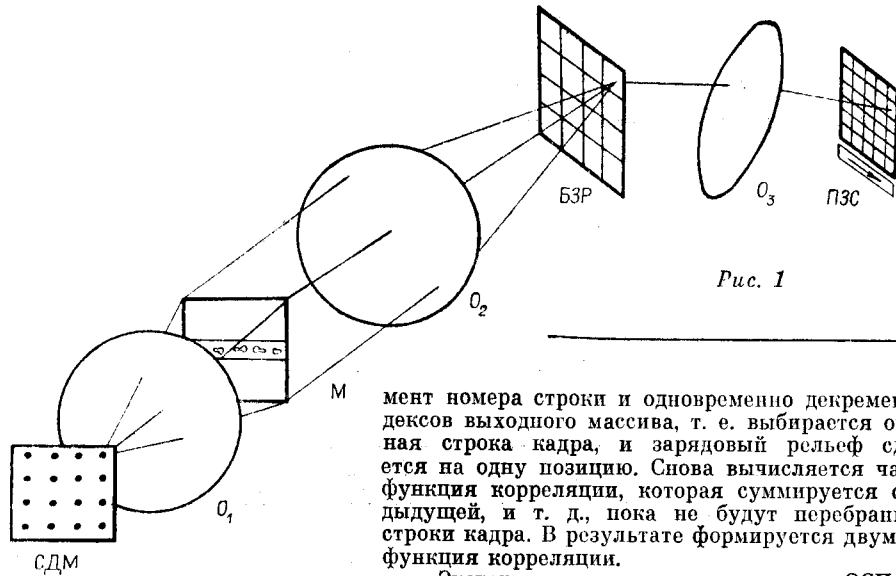


Рис. 1

мент номера строки и одновременно декремент индексов выходного массива, т. е. выбирается очередная строка кадра, и зарядовый рельеф сдвигается на одну позицию. Снова вычисляется частная функция корреляции, которая суммируется с предыдущей, и т. д., пока не будут перебраны все строки кадра. В результате формируется двумерная функция корреляции.

Экспериментальное исследование ОСП проводилось в составе комплекса (рис. 2), который помимо собственно ОСП включал блок выделения фрагмента из телевизионного кадра, блок предобработки (оконтуривания) телевизионного изображения, средства представления информации оператору, систему синтеза изображения, позволяющую исследовать ОСП при подаче на него изображений с заданными статистическими характеристиками.

Результаты экспериментального исследования ОСП в составе описанного комплекса, предназначенного для решения задач распознавания изображений, приведены на рис. 3. Первое коррелируемое изображение представляло собой полосу телевизионного кадра, перпендикулярную строчной развертке (рис. 3, а) и оконтуренную в блоке предобработки (рис. 3, б), а второе — несколько эталонов, вытянутых в линейку, перпендикулярную полосе с первым изображением (рис. 3, в). Результат корреляции в ОСП — взаимная функция корреляции — представлен на рис. 3, г, а сечения функции корреляции через точки, соответствующие совпадению коррелируемых изображений, — на рис. 3, д.

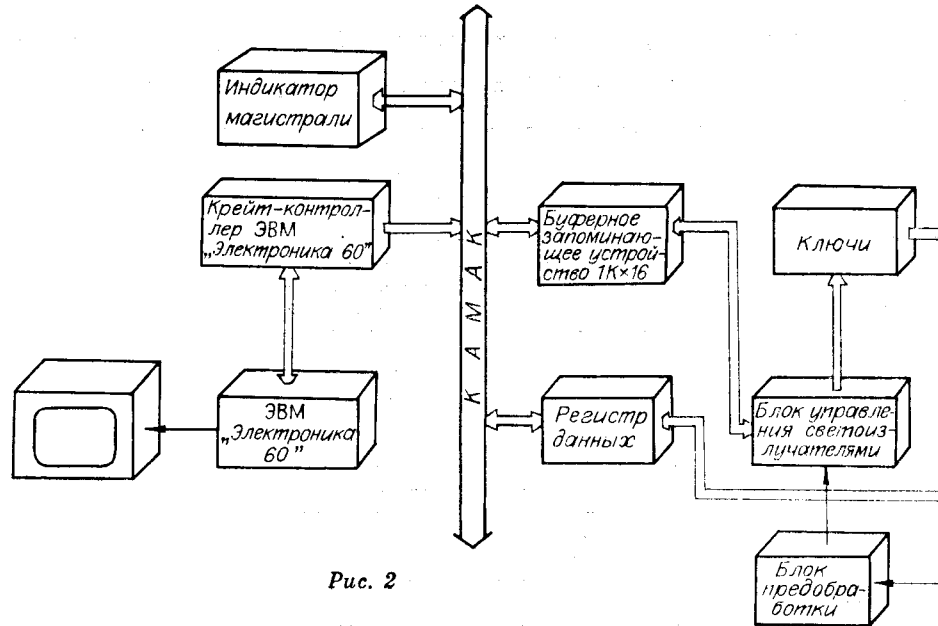


Рис. 2

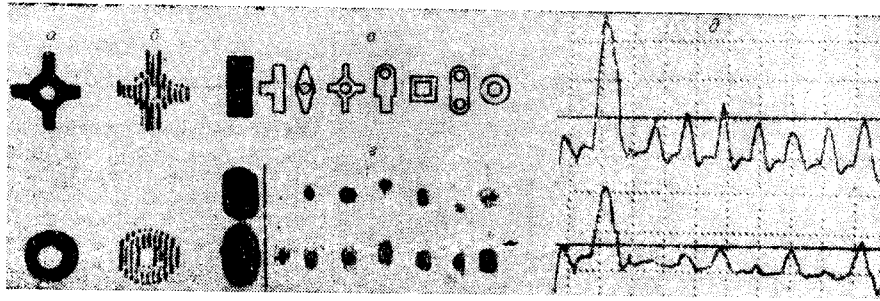


Рис. 3

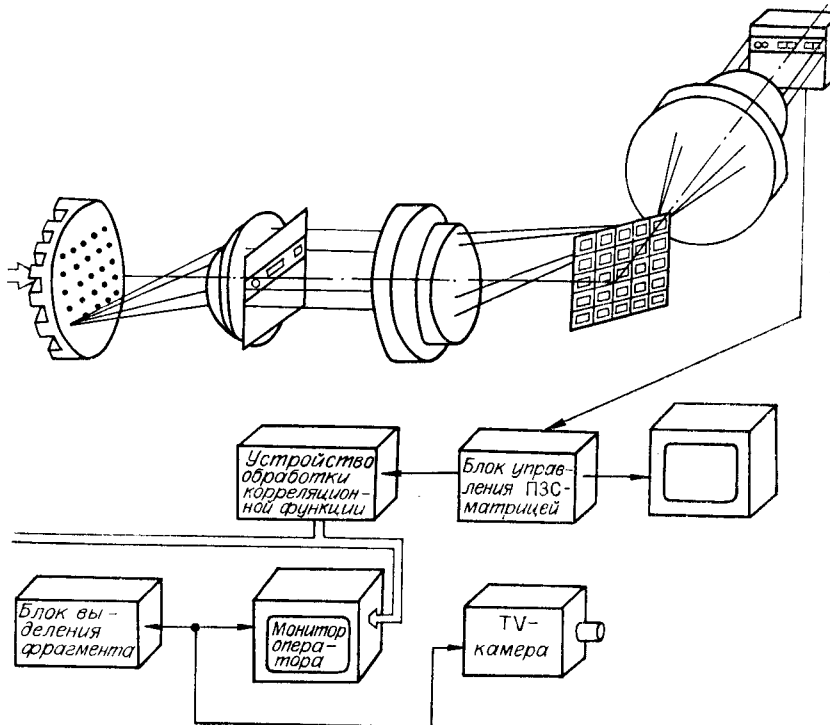
ОСП для обработки сигналов, передаваемых с помощью распространяющихся в пространстве волн. Такая обработка во временной области описывается выражением

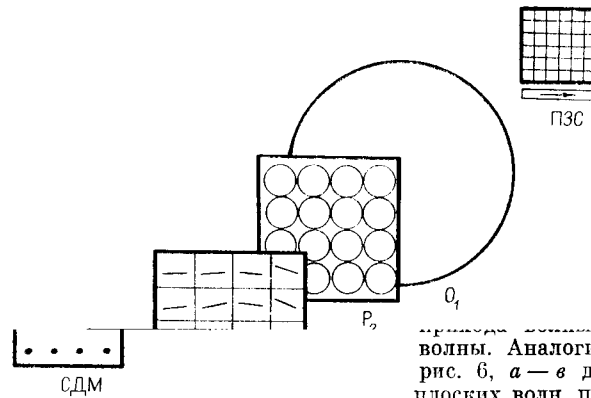
$$Y_m(t) = \sum_{n=1}^N X_n(t - \tau_n(m)),$$

где $\tau_n(m)$ — функции задержек, определяемые конфигурацией размещения приемников волн.

Оптическая схема ОСП, настроенного на реализацию этого алгоритма, приведена на рис. 4. Сигналы $X_n(t)$, преобразованные в электрические импульсы с длительностью, пропорциональной мгновенному значению $X(t)$, поступают на светодиоды, объединенные в матрицу СДМ. Декремент индексов входных сигналов осуществляется путем их дискретизации и последовательного ввода временных сечений сигналов. Первый блок переадресации — линзовый растр P_1 , трансформирующий энергию светодиодов в множество квазипараллельных пучков, каждый из которых освещает свою область модулятора M . На модуляторе записана маска в виде набора линий, форма которых определяется функцией задержек $\tau_n(m)$. Потoki, промодулированные маской, с помощью второго блока адресации, состоящего из растра P_2 и объектива O_1 , совмещаются на ПЗС-матрице.

Экспериментальные результаты по обработке сигналов, передаваемых с помощью распространяющихся в пространстве волн, представлены на рис. 5. Имитация волн производилась с помощью программной модели генератора, позволяющей имитировать волны с заданной фазой, частотой и амплитудой по 32 каналам. На рис. 5, а показано изображение плоской наклонной волны, принимаемой решеткой





датчиков. Горизонтальная координата — время, вертикальная — номер датчика. На рис. 5, б приведен результат обработки этих волн в ОСП, представленный в виде двумерной функции-изображения, считанного с ПЗС-матрицы. Хорошо видна дорожка, на которой волны сфазированы с

волны. Аналогичные результаты приведены на рис. 6, а — в для случая детектирования двух плоских волн, падающих на решетку под разными углами.

ОСП для перемножения матриц. Умножение матриц описывается выражением

$$\|C\| = \|A\| \times \|B\|, \text{ где } c_{mk} = \sum_{n=1}^N a_{mn} b_{nk}.$$

Оптическая схема ОСП для перемножения матриц представлена на рис. 7. Входными сигналами ОСП являются векторы — диагональные сечения матрицы $\|A\|$ [4]. Декремент индексов входного вектора осуществляется путем последовательного перебора сечений. Ввод производится через светодиодную линейку (СДЛ). Первый блок переадресации, состоящий из аноморфной оптической системы O_1 — O_2 , трансформирует точечный источник в линию, перпендикулярную линейке. На модуляторе M записана матрица-множитель в виде прямоугольной маски, разделенной на квадраты, пропускание каждого из которых пропорционально значению элемента матрицы. Второй блок адресации проецирует световое распределение после модулятора на ПЗС-матрицу, осуществляющую детектирование световых потоков и одновременно декремент индекса выходных данных, обеспечивающий процедуру суммирования перемноженных элементов обеих матриц, необходимую при реализации умножения матриц.

Результаты экспериментов по умножению матриц представлены на рис. 8. Перемножались матрицы размерностью 16×16 элементов. Бинарная матрица-множимое $\|A\|$ (рис. 8, а) синтезировалась на ЭВМ и вводилась в ОСП через систему, изображенную на рис. 2. На рис. 8, а также показаны диагональные сечения этой матрицы, выделяющие векторы, которые параллельно вводились в ОСП. Матрица-множитель $\|B\|$ представляла собой инвертированную и транспонированную матрицу $\|A\|$. Она изображена на рис. 8, б, в ОСП $\|B\|$ вводилась в виде фототранспаранта. Очевидно, что результатом умножения таких матриц является матрица произве-

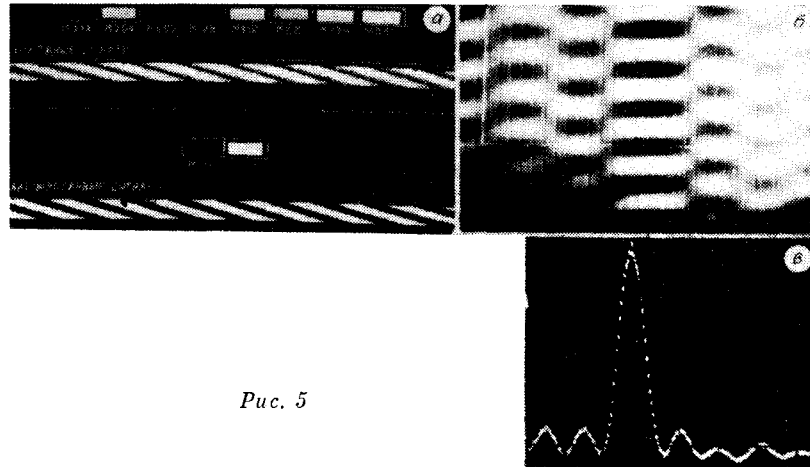


Рис. 5

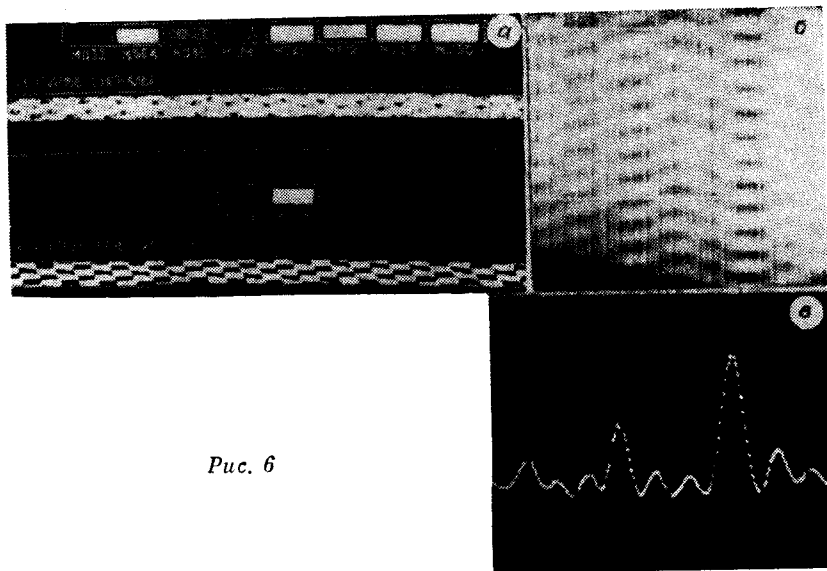


Рис. 6

дение с нулевой диагональю. Эта матрица, считанная с ПЗС и выведенная на TV-монитор, представлена на рис. 8, а. Хорошо видна диагональ темных элементов, соответствующая нулевым значениям произведений. Темп вывода матрицы-произведения соответствует темпу ввода матрицы-множителя, что позволяет замкнуть систему. Эта операция необходима, например, при обращении матриц.

Оценивая техническое решение матричного умножителя на основе ОСП, заметим, что по сравнению с другими подобного рода устройствами [2, 3] его оптическая схема предельно проста. Это связано с тем, что все суммирования, необходимые при матричном умножении, осуществляются не оптическим путем, а за счет декремента индекса выходных данных. Простота оптической схемы влечет за собой и потенциальную повышенную точность вычислений: практически она определяется точностью ввода матриц множимого и множителя, а также точностью считывания информации ПЗС-матрицей. Заметим, что эту точность можно существенно повысить, если одну или обе перемножаемые матрицы представить в разрядно-аналоговом (или даже в двоичном) виде. Методы умножения, основанные на свертке двоичных кодов, разработаны сейчас достаточно хорошо [4], а объединение матричного умножителя в ОСП со сверткой [1] не составляет труда.

Говоря об элементной базе ОСП, заметим, что ни в одном из описанных макетов не были использованы специализированные элементы. Матрица светоизлучателей состояла из дискретных светодиодов. В качестве модуляторов использовались транспаранты. Применялись стандартные ПЗС-матрицы, разработанные для формирования телевизионных изображений. В качестве блоков переадресации использовалась стандартная оптика. Поэтому образцы ОСП (рис. 9 — ОСП для корреляции изображений, рис. 10 — ОСП для обработки сигналов, передаваемых с помощью распространяющихся в пространстве волн) имели значительные габариты, но, несмотря на неспециализированную элементную базу, обеспечивали достаточно высокую вычислительную производительность ($\sim 10^9$ опер./с). Практика работы с ОСП показала, что они просты в юстировке, требуют минимальных затрат времени и труда при настройке на решение различных задач. Дальнейшее совершенствование ОСП должно идти по пути применения специализированных элементов, которые позволят существенно сократить габариты ОСП, а при использовании соответствующей технологии — изготовить ОСП в СВИС-вариантах по аналогии с однокристалльными цифровыми сигнальными процессорами.

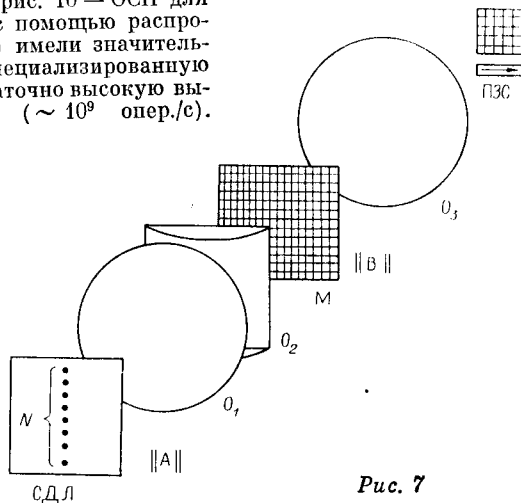
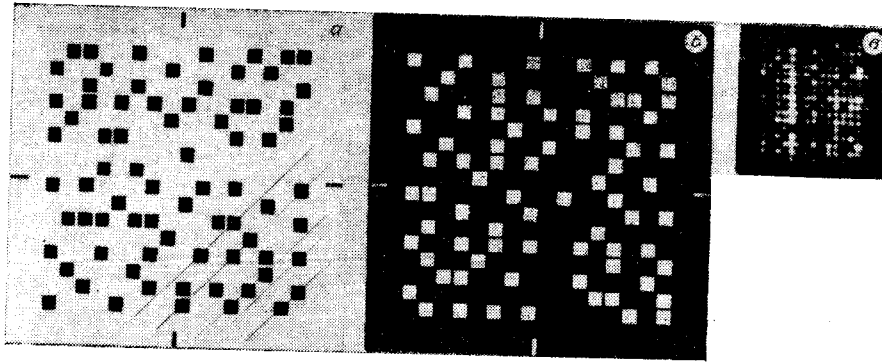
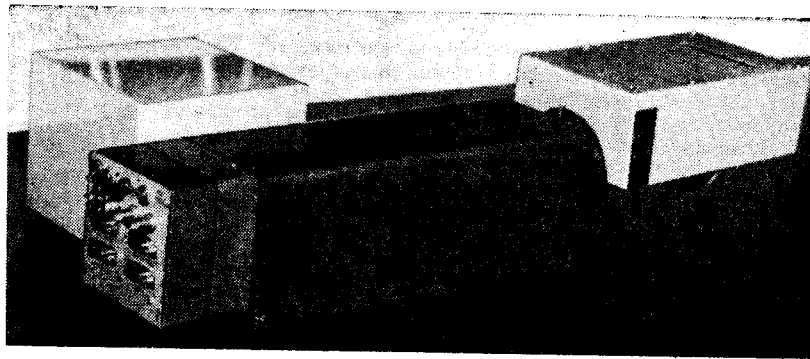


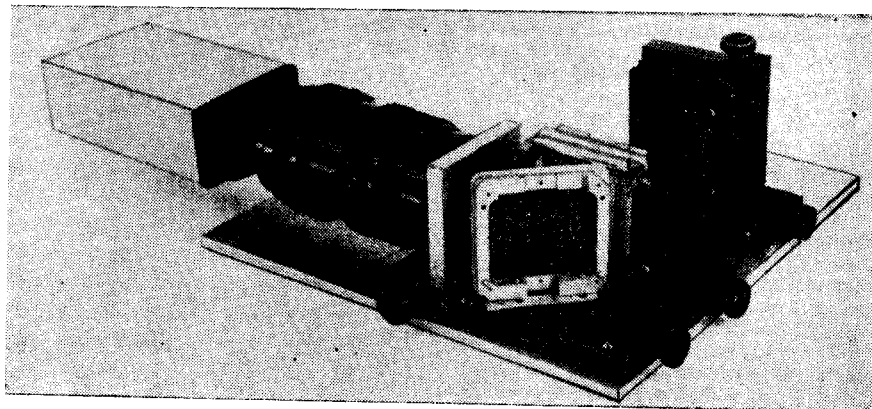
Рис. 7



Puc. 8



Puc. 9



Puc. 10

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гофман М. А., Нежевенко Е. С., Фельдбуш В. И. Оптико-электронные сигнальные процессоры // Автометрия.— 1989.— № 3.
2. Кривенков Б. Е., Михляев С. В., Твердохлеб П. Е., Чугуй Ю. В. Некогерентная оптическая система для выполнения матричных преобразований // Автометрия.— 1975.— № 3.
3. Кейссент Д. Акустооптические процессоры для операций линейной алгебры. Архитектура, алгоритмы, применения // ТИИЭР.— 1984.— 72, № 7.
4. Li J., Eichmann G., Aleano R. Fast parallel optical digital multiplication // Opt. Commun.— 1987.— 64, N 2.

Поступило в редакцию 8 декабря 1988 г.

УДК 535.241.13 : 534

В системах лазерной записи цифровой информации для увеличения скорости записи применяются акустооптические модуляторы (АОМ) с многочастотным управлением, выполняющие параллельную модуляцию множества лазерных световых пучков [1]. В режиме многочастотного управления в АОМ наблюдается ряд нелинейных эффектов многократной дифракции и взаимного влияния световых волн, возникающих при взаимодействии света с совокупностью N акустических волн с разными частотами [2]. Теоретический анализ этих эффектов, учитывающий особенности анизотропных АОМ с широкополосной дифракцией света, выполнен в [3].

В данном сообщении приведены результаты разработки и исследования анизотропных АОМ на кристаллах паратеелурита (TeO_2) с многочастотным режимом управления [4]. АОМ предназначены для применения в скоростном голографическом регистраторе (СГР) цифровой информации на оптическом диске [5]. Впервые проведено экспериментальное исследование влияния нелинейных эффектов дифракции света на множестве акустических волн с разными частотами на характеристики АОМ.

Основные параметры АОМ. Созданные АОМ на TeO_2 предназначены для работы с излучением полупроводниковых лазеров с длинами волн $\lambda = 0,85\text{--}0,89$ мкм или $\lambda = 0,68$ мкм. В АОМ реализована геометрия аномальной широкополосной дифракции на сдвиговых акустических волнах [6] со средней частотой ~ 96 МГц. При $\lambda = 0,85\text{--}0,89$ мкм падающая световая волна в АОМ направлена под углом $\Theta_1 = 8,6^\circ$ к оси [001] TeO_2 , а акустические волны распространяются под углом $\Theta_a = 11,4^\circ$ к оси [110]. При $\lambda = 0,68$ мкм углы распространения волн в АОМ равны $\Theta_1 = 6,9^\circ$, $\Theta_a = 9,3^\circ$. Длина взаимодействия света и звука в АОМ (длина пьезопреобразователя) равна ~ 1 мм для $\lambda = 0,85\text{--}0,89$ мкм и 1,5 мм для $\lambda = 0,68$ мкм. АОМ имеют рабочую полосу частот $\Delta f = 64$ МГц в диапазоне 64—128 МГц при неравномерности дифракционной эффективности в полосе частот не более 20%. При управляющей электрической мощности, не превышающей 1 Вт, в АОМ достигается эффективность дифракции света порядка 70%. При апертурном времени $\tau = 1$ мкс АОМ обеспечивает разрешение по критерию Рэля $N = \tau \Delta f = 64$. В СГР модулируемые световые пучки должны размещаться с двойным критерием Рэля. В этом случае АОМ на TeO_2 обеспечивает параллельную модуляцию 32 световых пучков при времени переключения $\tau = 1$ мкс.

Характеристики АОМ в режиме многочастотного управления. В экспериментах на АОМ подавался управляющий сигнал от параллельного синтезатора частот [5] в виде суммы 16 гармоник с различными частотами, одинаковыми амплитудами и случайными взаимными фазами. Частоты гармоник расположены эквидистантно с шагом 2 МГц в диапазоне 70—100 МГц. Распределение интенсивности световых пучков, наблюдаемое в частотной плоскости АОМ, схематически показано на рис. 1. В 1-м порядке дифракции образуются основные (сигнальные) световые пучки, в окрестности 0-го порядка расположены интермодуляционные (ИМ) световые пучки 2-го порядка, в области 1-го порядка возникают ИМ световые пучки 3-го порядка. Измерение интенсивностей основных и ИМ-пучков позволило определить характеристики АОМ: дифракционную эффективность η , коэффициент кроссмодуляции K , отношения сигнал/ИМ-фон 2-го и 3-го порядков S/F_2 и S/F_3 . Эти характеристики показаны на рис. 2—4 в зависимости от величины средней фазовой модуляции среды ξ . Величина ξ пропорциональна амплитуде отдельных гармоник в управляю-