

2. Петров В. И., Прохоров В. А., Юнович А. Э. Исследование локальных неоднородностей фоточувствительности и люминесценции пленок халькогенидов свинца в растровом электронном микроскопе // ФТП.— 1984.— 18, вып. 3.
3. Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г. Физика полупроводников.— М.: Наука, 1977.

Поступило в редакцию 20 апреля 1989 г.

УДК 681.33 : 681.34

В. А. ЛАБУСОВ, С. В. МИХЛЯЕВ, П. Е. ТВЕРДОХЛЕБ
(Новосибирск)

ОПЫТ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВЫЧИСЛЕНИЯ ЛОГИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ НЕРАВНОЗНАЧНОСТИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫМ СПОСОБОМ

В работе [1] предложено новое схмотехническое решение оптической системы, осуществляющей параллельное вычисление произведения трех матриц, рассмотрен принцип ее работы, приведены оценки дифракционных ограничений. В настоящем сообщении дано описание макета оптико-электронного процессора, созданного на основе этой системы, и приведены полученные с его помощью экспериментальные результаты параллельного вычисления логических функций неравнозначности многозарядных двоичных слов гибридным оптико-электронным способом.

Преобразование, выполняемое оптической системой, описывается выражением $D = BAC$, где B , A и C — вещественные матрицы, а D — результат преобразования, формируемый на выходе системы в виде интенсивности светового распределения. Ввод элементов строки матрицы A реализован с помощью линейки светодиодов, регистрация интенсивностей света, соответствующих элементам матрицы D , — с помощью фотодиодной линейки.

Схема оптической системы процессора показана на рис. 1. Линейка светодиодов I изготовлена из 16 отдельных светодиодов АЛ1107Б (средняя длина волны излучения $\lambda = 0,95$ мкм, мощность непрерывного излучения $P = 10$ мВт при токе $I = 0,1$ А). Режим работы светодиодов импульсный, при этом регулируемая длительность импульса засветки не превышала 160 мкс, а ток через диод составлял 0,4 А. Элементы матриц B и C принимали значения 1 («прозрачен») или 0 («непрозрачен») и задавались с помощью транспарантов $3, 5$ со целевыми апертурами или фототранспарантов. Используемая линейка светодиодов могла освещать только один j -й столбец матрицы B . В связи с этим в выходной плоскости системы формировалось световое распределение — содержимое тех строк матрицы D , номера которых определялись номерами прозрачных элементов в j -м столбце матрицы B . Изменение номера освещаемого столбца матрицы B осуществлялось путем перемещения светодиодной линейки или транспаранта 3 вдоль координаты X , что эквивалентно последовательному вводу различных столбцов матриц A и B . В свою очередь, путем перемещения фотодиодной линейки 8 по координате Y могло осуществляться последовательное считывание всех строк матрицы D .

В оптической системе использованы две цилиндрические линзы $2, 6$ с фокусным расстоянием $F = 80$ мм и два сферических объектива 4 («Гелиос-40», $F = 85$ мм) и 7 («Гелиос-44-2», $F = 58$ мм). Считывание световых распределений осуществлялось фотодиодной линейкой, содержащей 1024 фотоприемных элемента размерами 16×350 мкм при шаге 25 мкм. Размер элемента матрицы C на транспаранте 5 по координате X составлял 0,1 мм и выбирался таким образом, чтобы при проецировании изображения этой матрицы в плоскость фотодиодной линейки изображение каждого столбца матрицы занимало четыре фотоприемных элемента. По координате Y размеры элемента матрицы C составляли 0,49 мм и определялись размерами изображений светодиодов, проецирующихся в плоскость этой матрицы по координате Y . Расстояния между строками матрицы C на транспаранте не были эквидистантными и изменялись от 0,075 до 0,18 мм из-за разброса расстояний между соседними светодиодами.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 2. Управляющая ЭВМ СМ-3 через магистраль КАМАК взаимодействует с устройствами управления светодиодной (СДЛ) и фотодиодной (ФДЛ) линейками. Управление режимом работы СДЛ осуществляется с помощью блока управления (БУ), обеспечивающего параллельное включение произвольной комбинации светодиодов. Время засветки при этом устанавливается таймером T_1 с точностью 0,1 мкс и задается значением в диапазоне 0—160 мкс. Работа СДЛ с помощью устройства синхронизации (УС) согласуется с работой БУ ФДЛ, обеспечивающего периодическое считывание сигнала с ФДЛ. Минимальное время опроса ФДЛ составляет 1,5 мс, а общее время накопления устанавливается программируемым таймером T_2 и может меняться в широких пределах. Таймеры T_1 и T_2 подключены к генератору синхроимпульсов (ГСИ), работающему с тактовой частотой 1 МГц. Сигнал с ФДЛ поступает на вход 10-разрядного АЦП

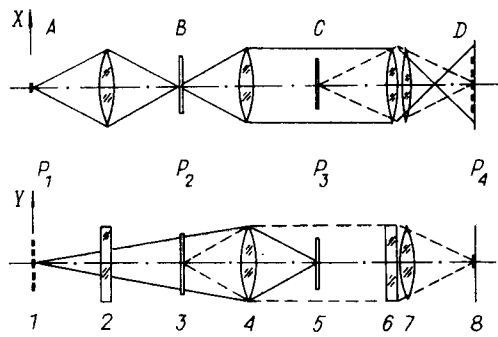


Рис. 1

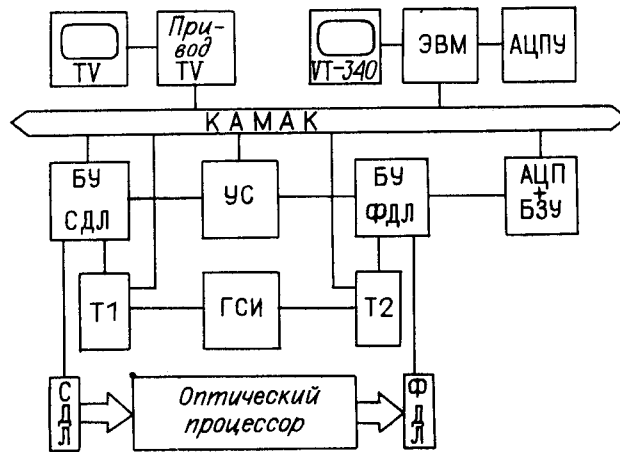


Рис. 2

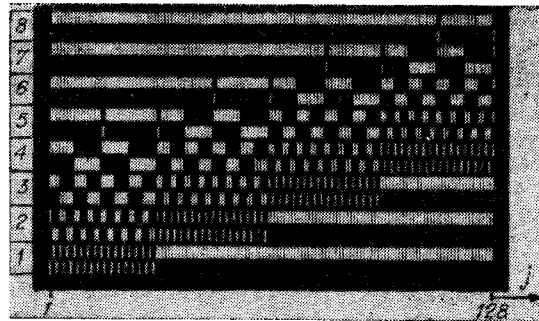


Рис. 3

(время выборки 0,2 мкс, время преобразования 0,9 мкс) со встроенным буферным запоминающим устройством (БЗУ). Управление работой процессора и обработка выходных данных осуществляются с помощью ЭВМ. Предусмотрена возможность вывода результатов на АЦПУ и TV-монитор.

Созданные программные средства обеспечивают тестирование отдельных устройств и всей установки в целом, юстировку оптической системы, калибровку ФДЛ и коррекцию выходного сигнала, работу процессора в различных режимах, а также обработку результатов и их графическое отображение.

Решалась следующая поисковая задача. В массиве из N чисел $C = (C_1, \dots, C_N)$ требовалось найти такие из них, которые совпадают с заданным значением (ключом) a , а также определить номера (адреса) этих элементов в массиве. Исходные данные задавались на фототранспаранте в виде двоичных M -разрядных слов, поэтому массив C представлял собой бинарную матрицу размером $M \times N$. Ключ a (M -разрядное слово) задавался с помощью светодиодов. Особенностью рассматриваемой системы является то, что поиск данных может осуществляться одновременно по K различным рядам, формируемых соответствием с логической функцией неравнозначности

$$d = \sum_{i=1}^M (X_i Y_i + \bar{X}_i \bar{Y}_i) = \begin{cases} 0, & \text{если } X_i = Y_i; \\ 1, & \text{если } X_i \neq Y_i, \end{cases}$$

определяют адреса элементов исходного массива, совпадающих с заданными запросами. Заметим, что оптическая система процессора реализует умножение трех матриц. В связи с этим имеется возможность программируемой переадресации результатов вычислений на различные строки матрицы D . Это достигается путем изменения вида матрицы B . В частности, возможны перестановки, мультиплицирование, маскирование произвольных строк результирующей матрицы D , что существенно расширяет функциональные возможности процессора [3].

В экспериментах матрица C содержала массив из $N = 128$ парафазно кодированных 8-разрядных слов ($M = 8$). Ключ представлял собой 8-разрядное слово, заданное в обратном парафазном коде. На рис. 3 показан транспарант, задающий матрицу C , а в табл. 1 приведены номера столбцов этой матрицы (адреса) и содержащиеся в них данные. Поскольку каждому адресу соответствовало четыре фотоприемных элемента, то из 1024 элементов ФДЛ для получения результатов поиска использовалось только 512 элементов. На рис. 4 показан фрагмент сигнала с ФДЛ, формируемого при поиске числа 14. Положения локальных минимумов сигнала определя-

Т а б л и ц а 1

Массив исходных данных, соответствующий информационному содержанию матрицы C

Адрес	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Данные	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Адрес	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
Данные	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Адрес	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
Данные	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32
Адрес	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64
Данные	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32
Адрес	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
Данные	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48	52	56	60	64
Адрес	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96
Данные	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48	52	56	60	64
Адрес	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112
Данные	8	16	24	32	40	48	56	64	72	80	88	96	104	112	120	128
Адрес	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128
Данные	8	16	24	32	40	48	56	64	72	80	88	96	104	112	120	128

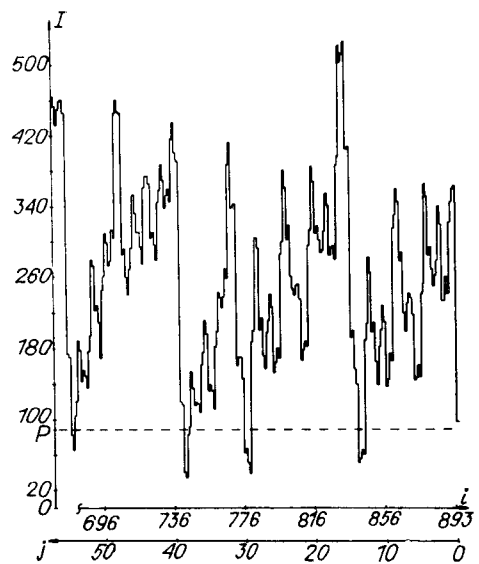


Рис. 4

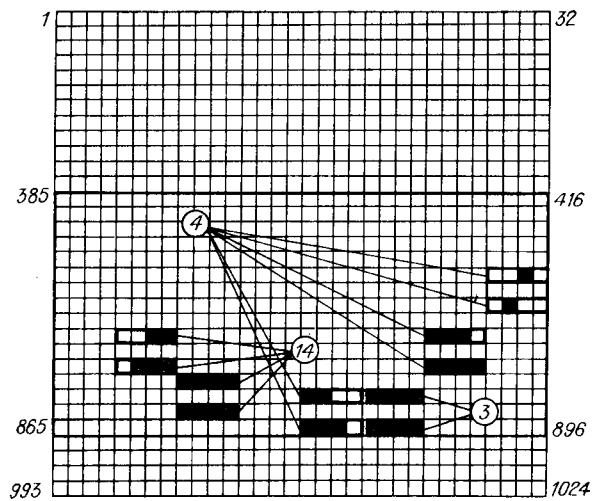


Рис. 5

Таблица 2

Экспериментальные результаты				
Значение ключа	Результат поиска (адреса)			Недостающие и неверные адреса
36	65	73	89	65
64	80	104	120	96
128	128			112

$i = 385, \dots, 896$, где скобки [] обозначают целую часть числа. Результат сравнения сигнала с пороговым значением отображается на экране монитора путем изменения цвета клеток. На рис. 5 даны результаты поиска чисел 3, 4 и 14. Сравнение их с табл. 1 показывает, что, как и следовало ожидать, таким запросом отвечают группы из двух (3, 19), шести (4, 20, 34, 50, 65, 81) и четырех (14, 30, 39, 55) адресов, определяемые положениями соответствующих групп фотоприемных элементов, изображенных на рис. 5 в виде темных клеток. Количество темных клеток в каждой группе определяется шириной соответствующего локального минимума сигнала (см. рис. 4) на заданном пороговом уровне и изменяется от 1 до 4.

На точность вычислений логической функции неравнозначности двоичных чисел оказывает влияние ряд факторов, из которых наиболее существенными являются разброс в мощностях излучения светодиодов, достигающий 70 % (светодиоды специально не подбирались), несовершенство фототранспаранта, задающего матрицу C (погрешности в размерах и расположении элементов матрицы, недостаточно высокий контраст), а также разброс параметров фотодетекторов линейки. Для компенсации разброса параметров фотодетекторов применялась коррекция выходного сигнала. Такая коррекция осуществлялась в основном с целью устранения разбросов темновых сигналов фотоприемников, поскольку информативными в выходном сигнале являлись его минимумы, близкие по своим значениям к уровням темновых сигналов.

Разброс мощностей излучения светодиодов и несовершенство фототранспаранта, задающего матрицу C , приводили к тому, что для некоторых ключей многоградационный выходной сигнал не имел достаточно четко выраженных минимумов. Это затрудняло выбор порогового уровня и приводило к ошибкам при вычислениях. В связи с этим выходной сигнал подвергался дополнительной обработке на ЭВМ, при которой использовались два пороговых уровня и осуществлялся анализ соответствующих им ширин локальных минимумов выходного сигнала. При дополнительной обработке с двумя пороговыми уровнями, отличающимися на 15 %, были проведены вычисления для всех возможных ключей, лежащих в диапазоне 1—255. Результаты вычислений хорошо согласуются с данными табл. 1. Ошибки в вычислениях имели место только при обработке трех ключей: 36, 64 и 128, для каждого из которых из-за локальных дефектов транспаранта было получено по одному неверному ответу. Результаты, соответствующие указанным ключам, представлены в табл. 2.

Проведенные экспериментальные исследования свидетельствуют о возможности параллельного вычисления логических функций неравнозначности многоградационных двоичных слов гибридным оптико-электронным способом. Повышение точности вычислений может быть обеспечено путем уменьшения разброса параметров светодиодов и фотоприемных элементов, а также путем повышения качества используемого транспаранта.

Авторы выражают благодарность Н. Н. Вьюхиной за помощь в разработке аппаратно-программных средств, подготовке и проведении экспериментальных исследований, а также Б. Н. Панкову и В. Е. Бутту за аппаратную поддержку эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михляев С. В., Твердохлеб П. Е. Оптическая система для матричных вычислений // Автометрия.— 1989.— № 2.
2. Гофман М. А., Кибирев С. Ф., Кривенков Б. Е. и др. Многоканальный поиск в некогерентной оптической системе памяти // Автометрия.— 1976.— № 6.
3. Твердохлеб П. Е. Организация системы для многоканальной параллельной обработки массивов данных // Автометрия.— 1981.— № 1.

Поступило в редакцию 8 сентября 1988 г.