

В. М. ЕГОРОВ, Э. Г. КОЦОВ

(Новосибирск)

## МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЦИФРОВЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Качественное увеличение производительности вычислительных устройств, поднятие ее до уровня  $10^{13}$  —  $10^{15}$  и более элементарных операций в секунду — основная задача современной микроэлектроники.

Из истории развития вычислительной техники следует, что резкое повышение производительности всегда определялось появлением новой элементной базы. Анализ состояния элементной базы микроэлектроники показывает, что главным препятствием на пути дальнейшего роста производительности вычислительных устройств является проблема соединений как на поверхности отдельных подложек, так и между ними.

Кроме того, к настоящему времени практически исчерпан основной резерв повышения производительности — увеличение тактовой частоты работы логических схем, поскольку время переключения отдельных элементов уже становится соизмеримым со временем передачи сигнала между различными блоками устройства, включая блок управления. Отметим также, что скорость распространения сигнала в интегральных схемах значительно меньше скорости света (в 5—50 раз в зависимости от степени интеграции).

Таким образом, можно утверждать, что тактовую частоту вычислительных устройств уже определяют не физико-технологические, а схемотехнические ограничения. В такой ситуации главным направлением дальнейшего повышения производительности вычислительных машин представляется путь на увеличение степени распараллеливания процедуры на всех уровнях вплоть до элементарных операций. Этот путь должен сопровождаться соответствующей организацией структуры соединений при одновременном увеличении числа логических элементов. Однако технология создания современных микросхем не может решить возникающую при этом еще более сложную проблему соединений.

Одна из возможностей решения этой проблемы — введение в структуру логических СБИС оптических каналов связи. Можно отметить, что создание оптических цифровых устройств на новых физических принципах, но без учета достижений микроэлектроники потребует очень крупных капитальных вложений, соизмеримых с теми, которые были затрачены на формирование технологической базы микроэлектроники. Кроме того, в силу дифракционного характера распространения светового потока, накладывающего жесткие ограничения на соотношение протяженности канала связи  $h$  и размера источника света  $b$  (окна модулятора):  $b > \sqrt{h\lambda}$ ,  $\lambda$  — длина световой волны, немикроэлектронное исполнение логических элементов приведет к неприемлемо большим габаритам устройства. Нетрудно показать, например, что в том случае, когда обмен информацией осуществляется с помощью свободных световых лучей между  $N$  произвольными однородными элементами, находящимися на двух различных подложках с размерами  $L$ , должны выполняться соотношения  $b > \sqrt{N\lambda}$ ,  $L > N\lambda$ , и тогда устройство с  $N = 10^7$  элементов будет занимать объем  $> 100$  м<sup>3</sup>. Указанные физические ограничения приводят к необходимости преимущественного использования в оптических логических структурах алгоритмов, основанных на принципах обработки информации в ограниченной окрестности каждого элемента. Отметим, что к настоящему времени уже известны эффективные алгоритмы параллельной обработки информации, базирующиеся на принципах окрестности, например алгоритмы обобщенных подстановок [1].

модулятора света (выход элемента), фотоэлектрического преобразователя (вход элемента) и накопителя энергии. На указанной элементной базе была осуществлена разработка конструкции функционального элемента матричного процессора [3] и показано, что введение оптических каналов в конструкции логических схем позволяет уменьшить (на два порядка и более) общее число компонент устройства по сравнению с чисто электронными устройствами с эквивалентной функциональной мощностью, одновременно снизить почти на порядок площадь, занимаемую соединениями, и поднять производительность (применительно к задачам обработки изображения) в  $m$  раз,  $m$  — размерность массива информации.

Можно отметить, что в последние годы такая идеология построения вычислительных устройств получила поддержку в ряде работ и других авторов [4, 5].

Целью настоящей работы является рассмотрение специфических особенностей, которыми будет характеризоваться создание интегральных вычислительных устройств на основе принципов электрооптической модуляции светового потока, а также описание оптического коммутационного элемента, составляющего один из важнейших блоков вычислительных структур — коммутатор каналов связи.

К настоящему времени есть смысл рассматривать три физических эффекта, которые могут быть использованы при изготовлении методами интегральной технологии быстродействующих тонкопленочных модуляторов света: эффект Франца — Келдыша [6], эффект полевого сдвига линий экситонного поглощения, в том числе в многослойных структурах-сверхрешетках [7, 8]; электрооптический эффект в сегнетоэлектрических материалах [9]. Специфичная черта первых двух модуляторов — необходимость применения источника света с узким спектральным диапазоном излучения, а также значительное увеличение проводимости электрооптического слоя в момент его освещения (из-за сильного поглощения света). Последнее обстоятельство приводит к усложнению конструкции логического элемента и увеличению количества составляющих его компонент.

Использование модуляторов света, в основе которых лежит эффект Погкельса, исключает жесткие ограничения на выбор длины волны светового потока, а энергия светового потока поглощается вне электрооптического слоя, в анализаторе. Специфика этого модулятора — необходимость изготовления дополнительного слоя-анализатора. Технология электронной литографии допускает возможность создания анализатора (металлическая пленка на поверхности фотоприемника) в виде поляризатора-решетки с шагом  $d \approx 0,3 - 0,35$  мкм при прозрачности в диапазоне длин волн  $\lambda = 0,6 - 0,7$  мкм. При  $\lambda > 2d$  поляризаторы-решетки обеспечивают степень поляризации световой волны, близкую к 100 %, и пропускание 60—90 % [10], толщина металлической пленки 0,1—0,15 мкм.

Быстродействие вышеуказанных модуляторов света дает возможность поддержания тактовой частоты  $\omega$  работы логических схем в диапазоне 10—100 МГц и более. Ограничивающим фактором в увеличении  $\omega$  является значение теплоотовода: оно не может быть больше чем  $10^5$  Вт/м<sup>2</sup> (при перегреве элемента выше 300 К на 20—30 К). Анализ особенностей работы логического элемента показывает, что из двух потоков энергии, поступающих на логический элемент (энергия светового потока и энергия перезарядки емкости модулятора  $C$ ), последняя при  $\omega \geq 10$  МГц преобладает. Поэтому основным резервом увеличения  $\omega$  является путь на снижение напряжений питания элемента  $V_0$ . Один из способов снижения  $V_0$  — применение на входе логического элемента пороговых фотоприемников при соответствующем выборе рабочей точки режима работы модулятора света.

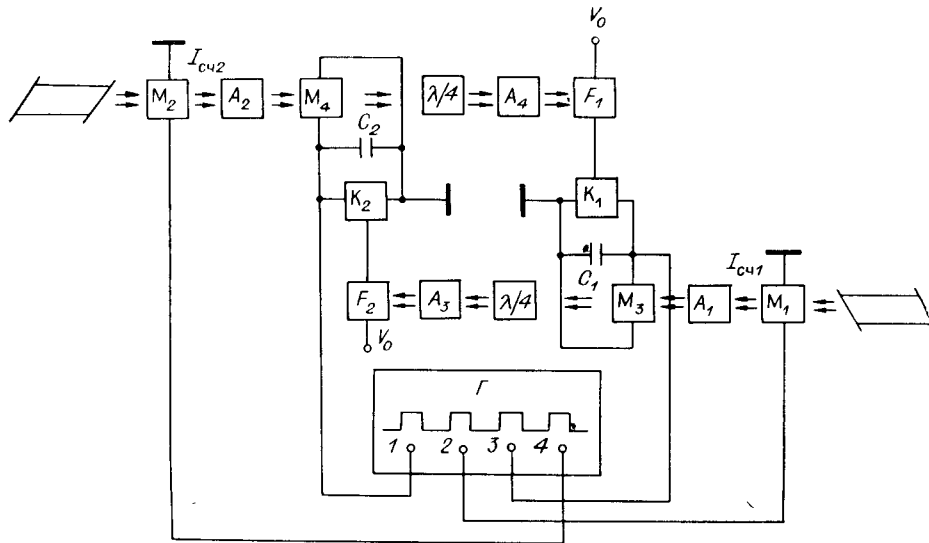


Рис. 1

Для демонстрации такой возможности был создан на базе электрооптических кристаллов с полуволновым напряжением 180 В макет динамической памяти (его блок-схема приведена на рис. 1). Он состоит из двух элементов, обозначенных соответственно четными и нечетными индексами. Модуляторы света  $M_1$  и  $M_2$  предназначены для формирования оптических сигналов считывания  $I_{сч}$ , четвертьволновые элементы  $\lambda/4$  и анализаторы  $A$  выделяют фазу оптических сигналов, поступающих на фотоприемники  $F$ , являющиеся входами ключевых схем  $K$ .

В нечетные такты производится попеременно заряд емкостей  $C_1$  и  $C_2$  (стирание информации), в четные — считывание информации с выходов модуляторов  $M_4$  и  $M_3$  на входы  $F_1$ ,  $F_2$  соответствующих элементов, осуществляя, таким образом, хранение в ячейке единицы информации. Информация может быть выражена как в виде световых сигналов, так и в виде напряжений на электродах модуляторов света (емкостей  $C_1$ ,  $C_2$ ).

Экспериментально установлено, что устойчивая работа динамической памяти возможна при  $V_0 = 5$  В, а дальнейшему снижению  $V_0$  препятствуют шумы используемого в качестве источника света He — Ne-лазера. На рис. 2 представлены типичные осциллограммы, характеризующие распределение во времени напряжений на различных компонентах устройства. Первый и третий лучи описывают поведение во времени напряжения на «четных» и «нечетных» транспарантах (соответственно таким будет поведение интенсивности «считывающего» светового потока). Второго и четвертого лучи показывают изменение потенциала на электродах модуляторов света «четного» и «нечетного» логических элементов.

На рис. 2, а отражено распределение напряжений, когда запись логической единицы первоначально производилась в «четный» элемент памяти, а рис. 2, б — в «нечетный», при этом элементы выполняли инвертирование сигнала. Первоначально заданное распределение потенциалов сохраняется неопределенно долгое время: оно соответствует незатухающему распространению информации по неограниченной цепочке элементов. Квантование сигнала, осуществляемое каждым из логических элементов, обеспечивало сохранение информации и при определенных вариациях уровня подсветки фотоприемника, длительности такта  $\tau$  и амплитуды управляющего напряжения  $V_0$ .

Проведем оценку возможных параметров логического элемента, исходя из достигнутых к настоящему времени значений параметров составляющих его компонент. Фотоприемник — одна из структур на основе гетеропереходов с крутизной  $S = 100 - 500$  А/Вт при размерах приемной

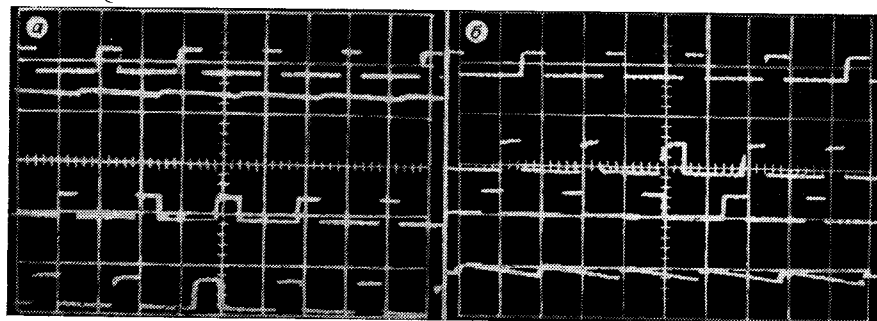


Рис. 2

площадки  $30 \times 30$  мкм, чувствительности  $10^{-5} - 10^{-8}$  Вт и с рабочим диапазоном частот до 200 МГц [11]; тонкопленочный модулятор света на основе одного из лучших электрооптических материалов — ниобата бария-стронция с толщиной пленки 5 мкм, диэлектрической проницаемостью  $\epsilon \approx 1000$  [12, 13] — имеет емкость  $C \sim 4$  пФ при площади окна  $\sim 20 \times 20$  мкм. Тогда, выбирая предельные значения поверхностного теплоотода  $10^5$  Вт/м<sup>2</sup>, легко оценить длительность такта  $\tau > 10^{-7}$  с, энергию переключения  $10^{-10}$  Дж при  $V_0 = 5$  В. Эта энергия, как видно, значительно больше энергии светового потока, необходимого для обеспечения чувствительности фотоприемника. Таким образом, основным резервом снижения энергоемкости указанных элементов является снижение  $V_0$  и уменьшение  $\epsilon$ . Одним из вариантов снижения  $V_0$  может быть применение модуляторов-сверхрешеток, когда возможно уменьшение емкости отдельного модулятора до  $\sim 0,1$  пФ и менее,  $V_0$  — до 1,5–2 В (с учетом нелинейности характеристик фотоприемника) и энергии переключения  $W$  до  $10^{-12}$  Дж. На рис. 3 представлена передаточная характеристика логического элемента, работающего в режиме инвертора, построенного на основе модулятора-сверхрешетки и порогового фотоприемника, имеющего энергию переключения  $10^{-12}$  Дж, при  $\tau = 10^{-8}$  с,  $C = 6 \cdot 10^{-14}$  Ф,  $S = 500$  А/Вт,  $V_0 = 5$  В, интенсивности светового потока на входе элемента  $\sim 10^{-6}$  Вт и светового фона  $\sim 2 \cdot 10^{-7}$  Вт. Элемент с такой характеристикой способен обеспечить незатухающее распространение информации по бесконечной цепочке элементов.

Оценки предельных параметров указанных логических элементов показывают, что свойство квантования сигнала может быть сохранено до  $W = 10^{-13}$  Дж и  $\tau \approx 10^{-9}$  с. Дальнейшее уменьшение длительности такта до  $10^{-10}$  с и менее при построении больших вычислительных систем встретит серьезные схемотехнические трудности, на наш взгляд неразрешимые.

В этой связи можно отметить, что при решении вышеуказанной задачи перспективы использования оптических бистабильных элементов, основанных на проявлениях нелинейных свойств ряда полупроводниковых материалов [14], внимание к которым привлечено в последнее время из-за их малых времен переключения ( $10^{-10} - 10^{-12}$  с), до сих пор находятся под вопросом не только в силу упомянутых трудностей, но также и из-за отсутствия практических доказательств возможности создания на их основе функционально полного логического элемента, сочетающего в себе свойства квантования сигнала и его запоминания, объединения по входу и разветвления по выходу, технологичности при массовом производстве.

Рассмотрим коммутационный элемент, имеющий четыре оптических входа и выхода [15],

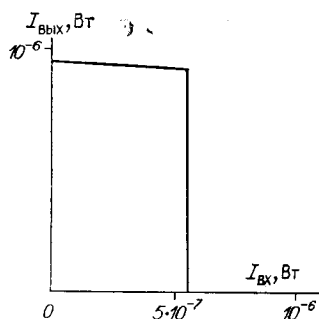


Рис. 3

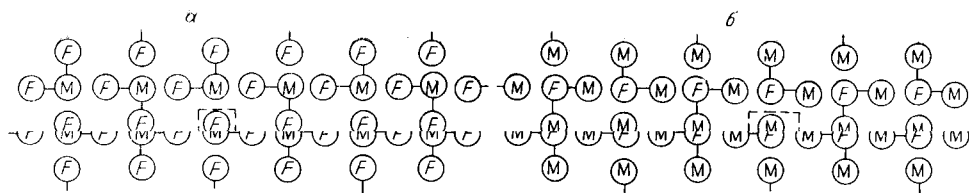


Рис. 4

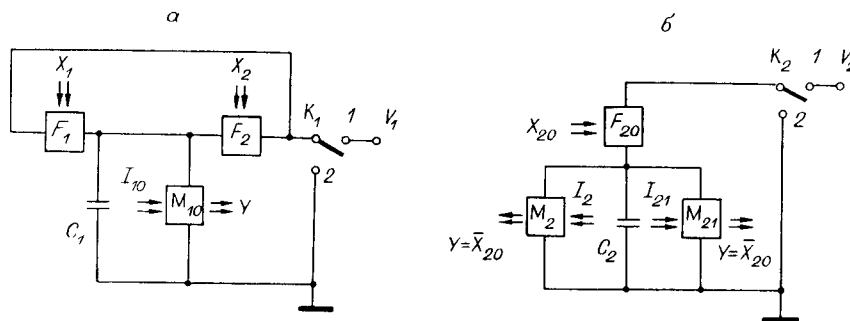


Рис. 5

построенный на описанной элементной базе и предназначенный для коммутации в цифровой форме четырех оптических информационных каналов.

Оптический коммутационный элемент (ОКЭ) состоит из 24 компонент: 12 модуляторов света и 12 фотоприемников, образующих две ячейки, расположенные в двух плоскостях (рис. 4, а, б). Первая ячейка содержит четыре схемы ИЛИ — НЕ, а вторая — четыре инвертора с разветвлением по выходу (рис. 5, а, б).

Рассмотрим принцип работы ячейки в динамическом режиме на примере схемы ИЛИ — НЕ: такт 1 — заряд конденсатора  $C$ , ключ  $K_1$  замкнут на источник питания  $V_1$ ; такт 2 — запись информации оптическими сигналами, поступающими на фотоприемники  $F_1, F_2$ , ключ  $K_1$  — в положении 2; такт 3 — считывание информации оптическим сигналом с модулятора  $M_{10}$ , ключ  $K_1$  — в положении 2. При этом, если на вход фотоприемников  $F_1, F_2$  поступают сигналы  $X_1, X_2$ , на выходе модулятора  $M_{10}$  реализуется функция  $Y = (X_1 \vee X_2)$ . Аналогично работает и вторая ячейка.

Взаимная ориентация ячеек такова, что выходные сигналы модуляторов с двойными индексами одной ячейки являются входными для соответствующих фотоприемников другой ячейки, а выходные сигналы моду-

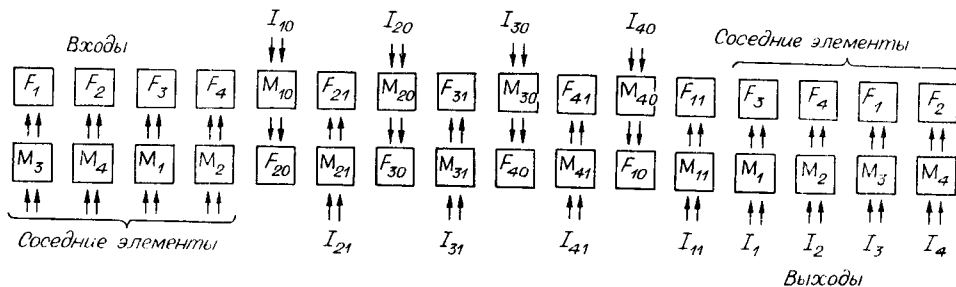


Рис. 6

Таблица 1

Номер такта	$f_{10}$	$f_{20}$	$f_{30}$	$f_{40}$	$f_{11}$	$f_{21}$	$f_{31}$	$f_{41}$
4	1	1	1	1	0	0	0	0
6	0	0	0	0	1	1	1	1
8	1	1	1	1	0	0	0	0
10	0	0	0	0	1	1	1	1
12	1	1	1	1	0	0	0	0
14	0	0	0	0	1	1	1	1
16	1	1	1	1	0	0	0	0
18	0	0	0	0	1	1	1	1

литоров  $M_1, M_2, M_3, M_4$  — входными для фотоприемников  $F_3, F_4, F_1, F_2$  соседних ОКЭ, и наоборот (рис. 6). Таким образом, ОКЭ осуществляет функцию поворота и хранения четырех единиц информации, передачи их в соседние элементы либо и то и другое одновременно в зависимости от комбинации считывающих сигналов в ОКЭ.

В табл. 1 приведена функция хранения и полного поворота, где  $f$  — обозначение двоичной функции соответствующего светового потока 1. При этом предполагается, что информация в ОКЭ записывается во втором такте, а в каждом нечетном такте осуществляется заряд емкости соответствующей ячейки. Следовательно, вектор поворота  $f_n = \{f_{10}f_{20}f_{30}f_{40}f_{11}f_{21}f_{31}f_{41}\}$  имеет только два значения:  $f_{n_1} = (11110000)$  и  $f_{n_2} = (00001111)$ , цикл поворота на  $90^\circ$  состоит из 4 тактов, цикл полного поворота — из 16 тактов.

В табл. 2 приведены функции коммутации, где  $B_1, \dots, B_4$  (рис. 7, а—г) соответствуют информационным каналам со входом и выходом  $F_1, M_1, \dots, F_4, M_4$  ОКЭ, коммутация каналов обозначена стрелкой.

Из табл. 2 видно, что тип коммутации определяется моментом поступления на модуляторы света  $M_1, M_2, M_3, M_4$  считывающих световых потоков  $I_1 - I_4$ : в каждом  $(6 + 16n)$ -м такте ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) осуществляются коммутации указанного на рис. 7, б типа; в  $(10 + 16n)$ -м такте — коммутация типа, соответствующего рис. 7, в; в  $(14 + 16n)$ -м такте — рис. 7, г.

Вектор управления коммутацией  $f_k = \{f_1, f_2, f_3, f_4\}$  имеет в каждом случае 16 состояний, и, следовательно, реализуются 46 способов коммутации четырех каналов связи. Функции разветвления формируются комбинацией трех основных приведенных в табл. 2 типов коммутации.

Описанный оптический коммутационный элемент, в котором функциональная полнота достигается не за счет жестких электрических сое-

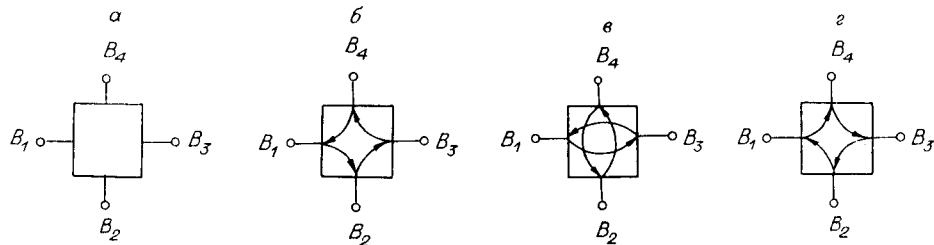


Рис. 7

Таблица 2

Номер такта	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	Тип коммутации
$6+16n$	0	0	0	0	0
	0	0	0	1	$B_3 \dashrightarrow B_4$
	0	0	1	0	$B_2 \dashrightarrow B_3$
	...	...	...	...	...
	0	1	0	0	$B_1 \dashrightarrow B_2$
	...	...	...	...	...
	1	0	0	0	$B_4 \dashrightarrow B_1$
	...	...	...	...	...
	1	1	1	1	$B_4 \dashrightarrow B_1, B_1 \dashrightarrow B_2, B_2 \dashrightarrow B_3, B_3 \dashrightarrow B_4$
$10+16n$	0	0	0	0	0
	0	0	0	1	$B_2 \dashrightarrow B_4$
	0	0	1	0	$B_1 \dashrightarrow B_3$
	...	...	...	...	...
	0	1	0	0	$B_4 \dashrightarrow B_2$
	...	...	...	...	...
	1	0	0	0	$B_3 \dashrightarrow B_1$
	...	...	...	...	...
	1	1	1	1	$B_3 \dashrightarrow B_1, B_4 \dashrightarrow B_2, B_1 \dashrightarrow B_3, B_2 \dashrightarrow B_4$
$14+16n$	0	0	0	0	0
	0	0	0	1	$B_1 \dashrightarrow B_4$
	0	0	1	0	$B_4 \dashrightarrow B_3$
	...	...	...	...	...
	0	1	0	0	$B_3 \dashrightarrow B_2$
	...	...	...	...	...
	1	0	0	0	$B_2 \dashrightarrow B_1$
	...	...	...	...	...
	1	1	1	1	$B_2 \dashrightarrow B_1, B_3 \dashrightarrow B_2, B_4 \dashrightarrow B_3, B_1 \dashrightarrow B_4$

длинений, а за счет гибких оптических связей; отсутствие в конструкции этого устройства вентилярных и переключающих элементов, характерных для чисто электронных схем, делают его значительно более компактным по сравнению с аналогичным устройством, выполненным на современной элементной базе.

Оптический коммутатор может быть создан на поверхности одной подложки, например сапфировой с толщиной 50—100 мкм, на которой с помощью технологии КНС (кремний на сапфире) сформированы пороговые фотоприемники, электрооптические слои, электроды (в том числе прозрачные для света). С учетом вышеуказанных энергетических затрат на переключение одного логического элемента можно оценить производительность структуры как  $10^{14}$  Гц · вентиль/см<sup>3</sup>.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аишев П. А., Ачасова С. М., Бандман О. Л. и др. Методы параллельного микропрограммирования.— Новосибирск: Наука, 1981.
2. Косцов Э. Г., Мишин А. И. Особенности построения оптических ЦВМ // Микроэлектроника.— 1977.— 6, вып. 2.
3. Егоров В. М., Косцов Э. Г. Перспективы создания оптических цифровых высокопроизводительных вычислительных устройств // Автометрия.— 1985.— № 4.
4. Lee S. H., Esener S. C., Title M. A., Drabik T. J. Two-dimensional silicon/PLZT spatial light modulators: design considerations and technology // Opt. Eng.— 1986.— 25, N 2.— P. 250.
5. Esener S. C., Wang J. H., Drabik T. J. e. a. One-dimensional silicon/PLZT spatial light modulators // Opt. Eng.— 1987.— 26, N 5.— P. 406.
6. Келдыш Л. В. О влиянии сильного электрического поля на оптические характеристики непроводящих кристаллов // ЖЭТФ.— 1958.— 34, № 5.
7. Wood T. H., Burrus C. A., Miller D. A. B. e. a. High-speed optical modulation with GaAs/GaAlAs quantum well in a p-i-n diode structure // Appl. Phys. Lett.— 1984.— 44(1).— P. 16.
8. Miller D. A. B., Chemla D. S., Damen T. C. e. a. The quantum well self-electrooptic effect device: optoelectronic and oscilation and self-linearized modulation // IEEE J. Quantum Electron.— 1985.— QE-21.— P. 1462.
9. Мустель Е. Р., Парыгин В. П. Методы модуляции и сканирования света.— М.: Наука, 1970.
10. Вапюрихин А. И., Герчановская В. П. Опτικο-электронные поляризационные устройства.— Киев: Техника, 1984.
11. Жук Б. В., Зленко А. А., Прохоров А. М. и др. Быстродействующий фототранзистор на гетероструктуре // ФТП.— 1988.— 22, № 8.
12. Анцыгин В. Д., Косцов Э. Г., Стерелюхина Л. П. Импульсная электрооптическая модуляция света в тонких сегнетоэлектрических пленках // Автометрия.— 1983.— № 5.
13. Antsigin V. D., Egorov V. M., Kostsov E. G. e. a. Ferroelectric properties of thin strontium barium niobate films // Ferroelectrics.— 1985.— 63.— P. 235.
14. Smith P. W. On the physical limits of digital optical switching and logic elements // The Bell Syst. Techn. J.— 1982.— 61, N 8.— P. 1975.
15. Каляев А. В. Однородные коммутационные регистровые структуры.— М.: Сов. радио, 1978.

*Поступила в редакцию 26 декабря 1988 г.*

УДК 681.325

**В. Р. ГРИГОРЬЕВ, С. М. КОЛОБАШКИН**  
(Москва)

#### РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА СБОРКИ ВЕКТОРА НА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОМ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОМ КОММУТАТОРЕ

При решении массовых задач на параллельном процессоре необходимо иметь специальное устройство, поддерживающее эффективную загрузку всех обрабатывающих элементов. Эта необходимость приводит к требованию сбора и уплотнения результатов по окончании определенного этапа выполнения программы, а также перераспределения данных по обрабатывающим элементам. Эффективное выполнение операций перестройки и преобразования структур данных становится одним из ключевых