

11. Fischer R. A., Feldman B. J. Generation of single ultrashort CO₂ laser pulses in a Fabry — Perot interferometer.— Opt. Lett., 1977, vol. 1, p. 161.
12. Суханов И. И., Троицкий Ю. В. Особенности фазовых характеристик многолучевых интерферометров.— Опт. и спектр., 1981, т. 50, № 5, с. 952—959.
13. Розенберг Г. В. Оптика тонкослойных покрытий.— М.: ГИФМЛ, 1958.
14. Захаров М. И., Троицкий Ю. В. Расчет оптического резонатора с селекцией мод за счет поглощения и рассеяния света.— Опт. и спектр., 1971, т. 30, № 3, с. 490—495.
15. Бельтюгов В. Н. Новые формулы для расчета двухзеркального многолучевого отражающего интерферометра.— Опт. и спектр., 1979, т. 46, № 6, с. 1030—1032.
16. Herbelin J. M., McCay J. A. Development of laser mirrors of very high reflectivity using the cavity-attenuated phase-shift method.— Appl. Opt., 1981, vol. 20, N 19, p. 3341—3344.
17. Андрияхин В. М., Баснев А. Г., Лебедева В. В., Одинцов А. И. Регенеративный оптический квантовый усилитель мощности.— Радиотехника и электроника, 1968, т. 13, № 4, с. 743—746.
18. Троицкий Ю. В. Тепловые ограничения на чувствительность многолучевых интерферометров с лазерным освещением.— Квант. электроника, 1983, т. 10, с. 2039—2044.
19. Hänsch T. W., Couillaud B. Laser-frequency stabilization by polarization spectroscopy of reflecting reference cavity.— Opt. Comm., 1980, vol. 35, N 3, p. 441—444.
20. Wiemann C. E., Gilbert S. L. Laser-frequency stabilization using mode interference from a reference interferometer.— Opt. Lett., 1982, vol. 7, N 10, p. 480—482.
21. Горелик Г. С. О применении модуляционного метода в оптической интерферометрии.— ДАН СССР, 1952, т. 83, № 4, с. 549.
22. Берштейн И. Л. Об измерении весьма малых изменений разности хода двух световых колебаний.— ДАН СССР, 1954, т. 94, № 4, с. 655.
23. Hough J. et al. Dye-laser frequency stabilization using optical resonators.— Appl. Phys., 1984, vol. B33, N 3, p. 179—185.
24. Троицкий Ю. В. Управление профилем интерференционных полос в многолучевом отражающем интерферометре.— Опт. и спектр., 1979, т. 46, № 4, с. 738—749.
25. Троицкий Ю. В. Расчет многолучевого отражающего интерферометра с согласованным передним зеркалом.— Опт. и спектр., 1971, т. 30, № 3, с. 544—549.
26. Голдина Н. Д., Захаров М. И., Троицкий Ю. В. Синтез характеристик многолучевого отражательного интерферометра.— Автометрия, 1975, № 3, с. 107—118.
27. Троицкий Ю. В. Особенности техники изготовления зеркал многолучевого отражающего интерферометра с «необращенными» полосами.— Новосибирск, 1980. (Препринт/АН СССР, Сиб. отд-ние, ИАиЭ; 119).
28. Камнев Н. Н., Троицкий Ю. В. Металлодиэлектрические зеркала с односторонним отражением света.— Опт. и спектр., 1983, т. 54, № 4, с. 725—730.
29. Троицкий Ю. В. Использование многолучевого фазового интерферометра для получения одночастотной генерации в лазерах.— Квант. электроника, 1975, т. 2, № 11, с. 2444—2451.
30. Бельтюгов В. Н. Дифракционные методы селекции мод в газовых ОКГ: Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. физ.-мат. наук.— Новосибирск: ИАиЭ СО АН СССР, 1982.
31. Автономов В. П. и др. Селекция линий CO₂-лазера при помощи дифракционного отражающего интерферометра.— Квант. электроника, 1980, т. 7, № 6, с. 1242—1251.
32. Троицкий Ю. В. Оптический резонатор с тонкой поглощающей пленкой в качестве селектора типов колебаний.— Опт. и спектр., 1968, т. 25, № 4, с. 557—564.

Поступила в редакцию 14 июня 1984 г.

УДК 621.382

В. М. ЕГОРОВ, Э. Г. КОЦОВ

(Новосибирск)

ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ЦИФРОВЫХ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Современная микроэлектроника, основной движущей силой развития которой всегда были потребности вычислительной техники, достигла за последнее десятилетие значительных успехов. Достаточно указать на следующие цифры: величина энергии, рассеиваемой элементом при вы-

полнении элементарной логической операции, снизилась до 10^{-12} — 10^{-13} Дж [1], время переключения отдельных схем — до 30 пс для n -МОП (схем с субмикрометровым каналом [2]) и до 12,8 пс для 1,4 мкм ВПЭТ-схем при 77 К [3], а уровень интеграции приблизился к 10^6 эл./крист. [1].

Одновременно возросла производительность больших ЭВМ до 10^9 опер./с, причем в основном за счет повышения быстродействия отдельных элементов и уменьшения длительности такта, которая для современных крупных машин имеет значение ~ 10 нс [4], а к 1990 г. по прогнозам снизится до 1—2,5 нс.

Однако потребности в дальнейшем качественном повышении производительности превышают реально достигнутые результаты, причем эти потребности растут опережающими темпами. К числу крупномасштабных задач, решение которых требует создания «суперЭВМ», можно отнести, например, ряд экономических задач, задачи из области космических исследований, математической физики и т. п.

Указанные выше времена переключения отдельных элементов дают, казалось бы, основание рассчитывать на дальнейший резкий рост производительности ЭВМ. Однако, несмотря на продолжающийся прогресс элементной базы, в настоящее время имеет место качественно иная ситуация, чем та, которая была характерна для предшествующего периода развития вычислительной техники. Изменение ситуации обусловлено следующими причинами.

1. В современных СБИС площадь, занимаемая проводниками, почти равна площади кристалла [5], общая длина проводников более чем в 10^3 раз превышает линейные размеры кристалла [6], энергия, затрачиваемая на перезарядку проводников, составляет уже 70—75% от всех энергетических потерь, при этом практически достигнута предельная величина погонной емкости проводника 10^{-14} Ф/м [1]. В то же время для современных логических схем характерно значительно большее число соединений по сравнению с числом функциональных элементов, т. е. структура и надежность больших вычислительных устройств определяются структурой и надежностью соединений, а с увеличением плотности упаковки и повышением быстродействия элементов возрастает роль соединений, а также уровня переходных помех.

Кроме того, при создании СБИС практически невозможна реализация соединений только в одной плоскости, необходим многослойный монтаж с числом уровней, по крайней мере, больше трех [7].

Еще более сложные проблемы возникают при обмене информацией между подложками. Применительно к вычислительным устройствам выполняется эмпирическое правило Рента [8, 9], указывающее на пропорциональность числа выводов с подложки числу логических элементов, находящихся на ней: снижение числа выводов приводит к снижению технических характеристик устройства [10]. В то же время с увеличением размеров кристаллов их периметр, допускающий только заданное число внешних выводов, растет линейно, тогда как площадь, используемая под элементами, — квадратично, но еще быстрее растет число соединений.

Соединения между кристаллами уже сегодня снижают тактовую частоту практически на порядок. В дальнейшем с уменьшением длительности такта связи между кристаллами будут играть все более существенную роль, приводя в итоге к ограничению тактовой частоты работы устройства. Кроме того, операция создания соединений между кристаллами с помощью проводников явно не совместима с технологией создания самих СБИС, что и определяет высокий процент брака и относительно низкий уровень надежности устройства.

В работе [1] справедливо отмечается, что сложность устройств ограничит степень интеграции кристаллов уровнями, существенно более низкими, чем могла бы позволить в пределе полупроводниковая технология. В частности, оценки показывают, что в логических устройствах

предельная степень интеграции на три порядка меньше по сравнению со степенью интеграции в матрицах памяти [11]. Причина — более сложный характер соединений.

2. Качественное изменение ситуации связано и с другим фактором, который также не следует из специфики использования конкретного физического явления, лежащего в основе работы логических элементов. Речь идет о том, что для больших устройств, имеющих достаточно протяженные геометрические размеры, дальнейшее уменьшение длительности такта теряет смысл из-за ограниченной скорости распространения сигнала.

Максимальная протяженность канала связи в устройстве равна $L = c\tau$ (c — скорость света в вакууме, τ — длительность такта, ψ — коэффициент, учитывающий фазовые сдвиги, задержку в линиях передачи сигнала). Полагая $\tau = 10^{-9}$ с, $\psi = 0,4$ (эту величину можно считать даже завышенной в несколько раз; кроме того, она уменьшается с увеличением степени интеграции), имеем $L < 3 \cdot 10^{-2}$ м. Для современной техники обмена информацией между кристаллами характерно, что только одни проводники в больших ЭВМ занимают больший, чем L^3 , объем.

Таким образом, основной резерв повышения производительности ЭВМ предыдущего периода развития ВТ (увеличение быстродействия отдельного элемента) практически исчерпан.

За последние годы более ясно обозначились основные направления повышения производительности ЭВМ — за счет распараллеливания процесса обработки информации вплоть до элементарных операций (предельная глубина распараллеливания) и децентрализации функций памяти, управления и преобразования информации.

Такое распараллеливание, естественно, должно обеспечиваться соответствующим прогрессом в производстве микросхем и в первую очередь в изготовлении соединений.

Но технология современной микроэлектроники не может, как отмечалось выше, обеспечить значительный прогресс в проблеме соединений. Поэтому настало время серьезной постановки задачи по созданию новой элементной базы вычислительной техники, причем только решение проблемы связей и соответственно резкое повышение производительности могут привести к появлению экономически жизнеспособной новой технологии производства электронных схем. Ясно также, что разрабатываемые устройства должны допускать интегральное исполнение с плотностью размещения элементов, соизмеримой с плотностью элементов в современных СБИС, а технология изготовления этих устройств должна базироваться на достижениях современной микроэлектроники. Такой подход, естественно, исключает использование отдельных макроскопических элементов, таких, например, как линзы, призмы, зеркала.

При создании нового элемента нужно руководствоваться совокупностью требований, предъявляемых к логическим элементам [12], соблюдать принцип физической однородности, когда функционирование элемента основывается на минимальном числе физических эффектов (не более двух), как в современных логических структурах. Однако основным требованием является решение проблемы соединений. В этом плане, например, применение элементов, основанных на явлениях сверхпроводимости, неизбежно приведет к тем же трудностям при организации связей, которые имеют место и в настоящее время.

Из общефизических соображений следует, что введение в структуру связей «третьего измерения» наиболее просто осуществить, используя оптические каналы связи. Но оптический канал связи отличается от электронного проводника рядом недостатков, среди которых можно отметить следующие: изменение направления распространения сигнала сложно и неэффективно, минимальные размеры (диаметр) оптического канала ограничиваются волновой природой света. Отсутствие непосредственного взаимодействия световых потоков приводит к необходимости преобразования энергии с соответствующими потерями энергии. В то

же время наличие твердотельного преобразователя энергии сразу дает ответ на вопрос о таких параметрах, как предельные размеры элементов, их быстродействие и плотность размещения: они не могут превзойти соответствующие параметры, характерные для современной микроэлектроники.

Поэтому применение оптического канала связи в вычислительной технике целесообразно лишь в том случае, если будет разработана идеология эффективного использования преимуществ трехмерной структуры связей и одновременного обмена информацией между множеством элементов, находящихся на различных подложках. Отметим, что использование элементов волоконной оптики [13] при создании крупных ЭВМ не решает указанных проблем соединений, наоборот, добавляет к ним ряд специфических технологических задач.

В настоящее время известен ряд элементов, в которых логические сигналы передаются с помощью световых потоков. Наиболее крупные и серьезные разработки в этом плане относятся к области классической оптоэлектроники (базовый элемент — оптрон) [14]. Это направление, однако, не оказало значительного влияния на развитие вычислительной техники в основном из-за таких физических ограничений, как двойное преобразование энергии (электрический сигнал — оптический сигнал и обратно), обуславливающее низкую добротность элементов; необходимость согласования различных характеристик каждой пары «источник света — фотоприемник» с учетом диаграммы направленности излучателя. Кроме того, общее количество индивидуально управляемых источников света, изготавливаемых в интегральном исполнении, должно быть соизмеримо с количеством логических элементов (10^7 — 10^9), а источник света, как известно, — один из наименее надежных элементов и отличается низким КПД.

Известны также логические элементы на основе полупроводниковых лазерных источников света с использованием эффекта Костера [15]. Интерес к ним обусловлен тем, что на их основе возможно создание элементов памяти с временем переключения 10^{-10} — 10^{-11} с, при этом вся коммутация и основные логические операции выполняются в оптическом плече схемы. Называя недостатки подобных устройств, обычно отмечают необходимость применения мощных цепей управления (10^{-2} Дж/бит) и низкую надежность лазеров. Но основной недостаток этих элементов в другом: остается нерешенной проблема соединений между подложками. Кроме того, технология производства логических схем на лазерных ключах не дает явных принципиальных преимуществ перед технологией СБИС, наоборот, добавляет к ней ряд своих, достаточно сложных вопросов.

В работе [16] описан логический элемент, состоящий из интерферометра Фабри — Перо, между зеркалами которого размещен узкозонный полупроводник (например, InSb), обладающий способностью нелинейно изменять коэффициент преломления n под действием светового потока, начиная с некоторого значения интенсивности последнего. Укажем те недостатки этого класса элементов, которые, на наш взгляд, не позволяют рассчитывать на их применение при построении больших ЭВМ.

Изменение величины n , вплоть до выхода на участок насыщения, под действием светового потока возможно только при его достаточно высокой интенсивности, что обуславливает низкую добротность элемента. Вследствие того что степень нелинейности n возрастает обратно пропорционально квадрату ширины запрещенной зоны полупроводника, при создании элемента эффективно используются только материалы с шириной зоны 0,2 эВ и менее, при этом длина волны λ светового потока должна составлять 5 мкм и более. Этот факт с учетом явления дифракции указывает на невозможность создания устройств с плотностью элементов, соизмеримой с плотностью элементов в СБИС.

Принцип интерференции света требует высокой прецизионности в поддержании параметров каждого из элементов, что при массовом их

производстве является задачей более сложной (на два порядка по точности воспроизводимости толщины слоя), чем при изготовлении элементов современных логических схем.

Для рассматриваемого элемента характерно совмещение местоположения входа и выхода, и поэтому не ясно, как конструктивно обеспечить связь между множеством элементов, находящихся на различных подложках. При применении зеркал расстояние h между подложками становится соизмеримым с размерами подложек, что приводит к увеличению диаметра светового луча до величины $\sqrt{\lambda h}$ и исключению возможности интегрального исполнения устройства.

Для снижения уровня шумов рекомендуется глубокое охлаждение устройства. Не установлено также, обладает ли элемент передаточной характеристикой, обеспечивающей незатухающее распространение сигнала по цепочке последовательно включенных логических элементов.

Вышеизложенное относится в значительной мере и к другим подобным элементам, также основанным на принципе интерференции [17, 18].

Ранее нами [19] были разработаны физические принципы построения базового логического элемента, свободного от указанных выше недостатков. Его функционирование основано на модуляции светового потока электрическим полем. При этом используется только одно преобразование энергии (свет — электрический сигнал), а источник светового потока — общий для множества элементов. Проведенный в [20] анализ физических эффектов, которые могут быть положены в основу функционирования элемента, показал, что наиболее оптимальный вариант следующий: электрооптический модулятор света, фотоэлектрический преобразователь энергии, электростатический накопитель энергии. Применение магнито- и акустооптических модуляторов света ограничено как высокими энергетическими затратами, так и сложностью непосредственного преобразования (фотомагнитного или фотоакустического) энергии.

На рис. 1, а представлена схема базового оптического логического элемента. Он состоит из модулятора света M , преобразователя энергии F и накопителя энергии, например конденсатора C для динамических схем или резистора R — для потенциальных.

Состояние элемента определяется интенсивностью $I_{\text{вых}}$ светового потока на выходе модулятора света (или разностью потенциалов на его электродах), которое однозначно связано с интенсивностью $I_{\text{вх}}$ светового сигнала, поступающего на вход — фотоэлектрический преобразователь энергии. Работа логического элемента заключается в управлении интенсивностью светового потока, пропускаемого модулятором света, световым потоком, поступающим на вход элемента.

На рис. 1, б—и представлены потенциальные схемы оптических элементов, реализующих основные логические функции: б — повторителя, в — инвертора, г — элемента И, д — элемента И—НЕ, е — элемента ИЛИ, ж — элемента ИЛИ—НЕ, з — элемента «сумма по mod 2», и — элемента «импликация $X_1 \rightarrow X_2$ ». При этом предполагается, что модулятор пропускает свет, если разность потенциалов на его электродах имеет высокий уровень («1»), и не пропускает свет, если эта разность имеет низкий уровень («0»).

Большой интерес представляют динамические схемы, поскольку наряду с логическими функциями они позволяют реализовать и функции памяти. Рассмотрим принцип работы динамических схем на примере ячейки памяти (рис. 2). Допустим, что единица информации записана в элементе 1, при этом переключатель K_1 замкнут на заземленный контакт 2.

Такт 1. «Стирание» информации в элементе 2. Переключатель K_2 замыкается на контакт 1 источника питания V , при этом заряжается емкость C_2 .

Такт 2. Считывание информации в инверсном коде с элемента 1 световым сигналом $I_{\text{сч}}$. Переключатели K_1, K_2 находятся в положении 2

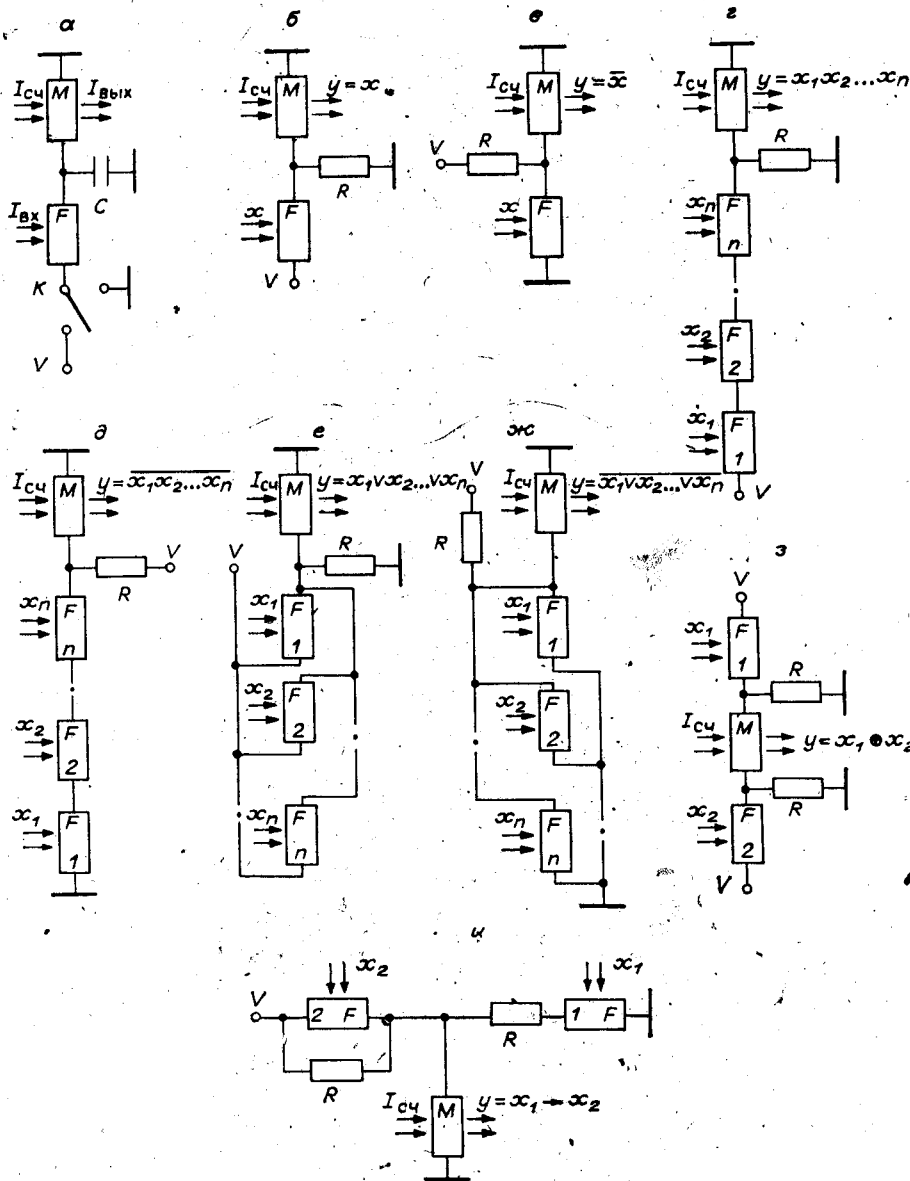


Рис. 1.

(заземлены), при этом выходной сигнал с $M1$ является входным сигналом записи для элемента 2.

Такт 3. «Стирание» информации в элементе 1. Переключатель $K1$ находится в положении 1 и емкость $C1$ заряжается.

Такт 4. Считывание информации в прямом коде с элемента 2 световым сигналом I_{cy2} . Переключатели $K1, K2$ заземлены. Выходной сигнал с модулятора 2 является входным для элемента 1.

В результате выполнения тактов 1—4 и повторения циклов информация в ячейке может храниться как угодно долго.

В электронных вычислительных устройствах параллельные алгоритмы реализуются посредством электрических параллельных цепей, связывающих отдельные элементы и структуры. Очевидно, что число цепей, вентиляльных и переключающих элементов, регулирующих распространение электрического сигнала в требуемом направлении и обеспечивающих необходимую функциональную гибкость и эффективность, возрастает с повышением уровня распараллеливания вычислительного процесса и

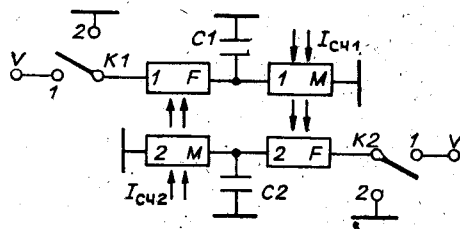


Рис. 2.

универсальности устройства. Описанная элементная база позволяет создавать функционально гибкие вычислительные устройства с большой производительностью без увеличения числа указанных цепей и элементов — за счет замены электрических связей оптическими.

Конструкция вычислительного устройства будет содержать наименьшее количество элементов и электрических соединений, если она соответствует следующим принципам: 1) параллельные электрические цепи используются для питания элементов; 2) параллельные функциональные связи осуществляются по оптическим каналам; 3) функциональные связи между структурами и отдельными элементами, реализованные посредством электрических цепей, являются последовательными.

Для иллюстрации возможностей указанной элементной базы рассмотрим конструкцию и работу элемента матричного процессора, отвечающего перечисленным принципам.

Элемент имеет 6 ячеек (рис. 3): четыре инвертора, содержащих фотоэлектрические преобразователи (фотоприемники) $F1-F4$, модуляторы света $M12-M15$, конденсаторы $C1-C4$ и две ячейки функционального преобразователя: $F5-F8$, $M16-M18$, $C5-C7$ и $F9-F11$, $M19-M22$, $C8-C11$, способного также хранить информацию в динамическом режиме. Электрические входы $F1-F11$ соединены с контактами переключателей $K1-K6$ для подключения к источникам питания $V1-V6$ или к шине низкого потенциала.

При подключении к элементу соседних элементов электрические входы всех фотоприемников соответствующих ячеек соединяются параллельно с контактами соответствующих переключателей $K1-K6$. Функциональный преобразователь содержит контакты $23-30$ для соединения с контактами соседних по матрице элементов слева, справа, снизу и сверху. Функциональная мощность элемента обеспечивается оптическими связями между ячейками. Они таковы (рис. 4), что две любые ячейки имеют взаимно связанные оптические входы и выходы, причем первый и третий инверторы оптически связаны со вторым и четвертым инверторами соседнего по матрице слева элемента, компоненты которого обозначены буквой «I» в центре блока, а второй и четвертый — с первым и третьим инверторами соседнего по матрице справа элемента, компоненты которого обозначены буквой «II». Кроме того, $M12$, $M14$ и $M13$, $M15$ имеют конъюнктивную оптическую связь и все модуляторы света одной ячейки функционального преобразователя оптически связаны с соответствующими фотоприемниками другой. С этой целью фотоприемники $F1-F4$ содержат по шесть входов; $F5$, $F6$, $F9$ — по два; $F7$, $F8$ — по пять; $F10$, $F11$ —

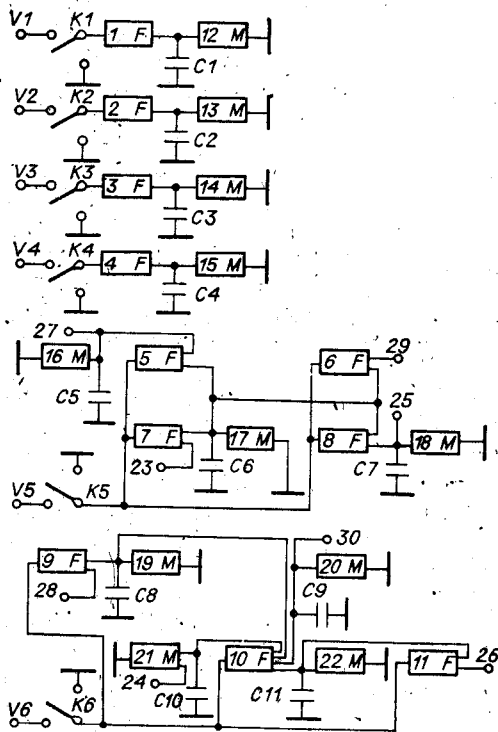


Рис. 3.

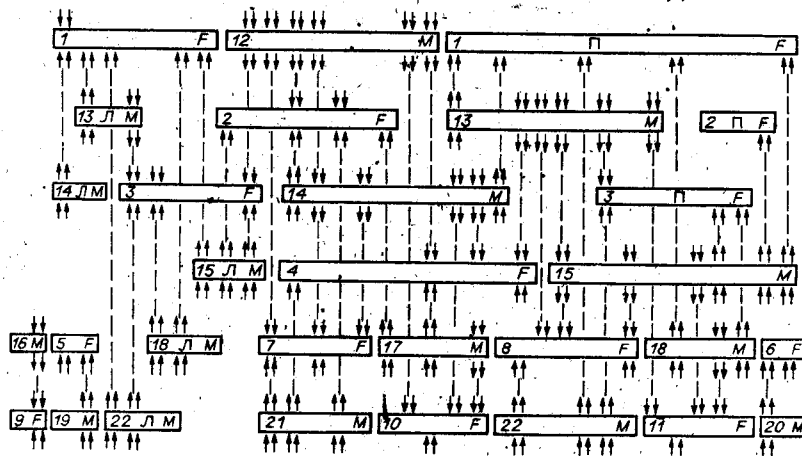


Рис. 4.

по четыре оптических входа, причем каждый из фотоприемников имеет вход и для приема сигнала от внешнего источника света. Модуляторы света $M_{12}-M_{15}$ имеют по шесть оптических каналов; M_{16}, M_{19}, M_{20} — по одному; $M_{17}, M_{18}, M_{21}, M_{22}$ — по три оптических канала.

В динамическом режиме работы соответствующие инверторы образуют ячейки динамической памяти с сдвиговой структурой, а функциональный преобразователь может хранить единицу информации со сдвигом в каждом из четырех направлений по матрице и без такового. При подаче оптических сигналов $x_1-x_7, a_1-a_7, b_1-b_7, c_1-c_7, d_1-d_7$ соответственно на входы фотоприемников F_5-F_{11} центрального элемента и его соседних по матрице слева, справа, сверху и снизу элементов с выхода модулятора света M_{16} центрального элемента можно считать оптический сигнал $y_1 = x_1 \vee d_2$, с $M_{17} - y_2 = x_1 \vee x_2 \vee x_3 \vee x_4$, с $M_{18} - y_3 = x_4 \vee b_3$, с $M_{19} - y_4 = x_5 \vee x_6$, с $M_{20} - y_5 = x_6 \vee c_5$, с $M_{21} - y_6 = x_6 \vee a_7$, с $M_{22} - y_7 = x_6 \vee x_7$.

Рассмотрим работу элемента матричного процессора на примере выполнения функций

$$p_1 = \bigwedge_k^5 [(a_k \sim b_k) \vee c_k] \text{ и } p_2 = \bigwedge_k^5 [(a_k \oplus b_k) \vee c_k],$$

где $k = 1, 2, \dots, 5$ — номер элемента из конфигурации, включающей центральный элемент и его четыре соседних по матрице элемента. Центральный элемент обозначим через ij , соседний слева — $i, j-1$, справа — $i, j+1$, сверху — $i-1, j$, снизу — $i+1, j$.

Переменная $A\{a_{ij}\}$ записывается в первой ячейке процессора, переменная $B\{b_{ij}\}$ — в третьей, переменная $C\{c_{ij}\}$ поступает в виде оптических сигналов на входы соответствующих фотоэлектрических преобразователей в процессе обработки информации. Преобразование $P\{p_{ij}\}$ выполняется одновременно для всех p_{ij} .

Алгоритмы выполнения функций p_1 и p_2 , отличающиеся только в первых нескольких тактах, приводятся ниже.

Для функции $p_1 = \bigwedge_k^5 [(a_k \sim b_k) \vee c_k]$:

Такт 1. Переключатели K_2, K_4-K_6 замыкаются на источники питания V_2, V_4-V_6 , при этом конденсаторы C_2, C_4-C_{11} заряжаются.

Такт 2. Переключатели K_2, K_4 заземляются. Оптические сигналы \bar{a}_{ij} и \bar{b}_{ij} считываются с выходов M_{12} и M_{14} на входы F_2 и F_4 .

Такт 3. Сигналы \bar{a}_{ij} и \bar{b}_{ij} считываются с выходов M_{12} и M_{13} на входы F_3 и F_4 .

Такт 4. Переключатель $K5$ заземляется. Сигналы $\overline{a_{ij}} \vee \overline{b_{ij}}$ и $a_{ij} \vee \overline{b_{ij}}$ считываются с выходов $M14$ и $M15$ на входы $F7$ и $F8$.

Такт 5. Переключатель $K5$ заземляется. Сигнал $(a_{ij} \sim b_{ij})$ считывается с выхода $M17$ на вход $F10$. Подается сигнал c_{ij} на вход $F10$.

Такт 3. Сигнал $a_{ij}b_{ij}$ считывается с выхода $M17$ на вход $F10$.

Такт 4. Переключатель $K6$ заземляется. Сигнал $(a_{ij} \oplus b_{ij})$ считывается с выхода $M17$ на вход $F10$. Подается сигнал c_{ij} на вход $F10$.

Таким образом, через 5 тактов функция $p_1 = [(a_{ij} \sim b_{ij}) \vee c_{ij}]$ формируется и записывается в шестой ячейке каждого элемента процессора, а функция $p_2 = [(a_{ij} \oplus b_{ij}) \vee c_{ij}]$ — через 4 такта.

В последующих тактах алгоритм обработки конфигурации из k элементов одинаков для обеих функций. Например, для функции p_2 .

Такт 5. Переключатель $K5$ замыкается на источник питания $V5$.

Такт 6. Переключатель $K5$ заземляется. Сигнал $\neg[(a_{ij} \oplus b_{ij}) \vee c_{ij}]$ считывается с выходов $M19$ — $M22$ на входы $F5$ — $F8$ соответственно.

Такт 7. Переключатель $K6$ замыкается на источник питания $V6$.

Такт 8. Переключатель $K6$ заземляется. Выполняется считывание сигналов $\neg(\neg[(a_{ij} \oplus b_{ij}) \vee c_{ij}] \vee \neg[(a_{i,j+1} \oplus b_{i,j+1}) \vee c_{i,j+1}])$ с выхода $M18$ на вход $F11$ и $\neg(\neg[(a_{ij} \oplus b_{ij}) \vee c_{ij}] \vee \neg[(a_{i+1,j} \oplus b_{i+1,j}) \vee c_{i+1,j}])$ с выхода $M16$ на вход $F9$.

Такт 9. Переключатель $K5$ замыкается на источник питания $V5$.

Такт 10. Переключатель $K5$ заземляется. Сигналы

$$\begin{aligned} & \neg[(a_{i+1,j} \oplus b_{i+1,j}) \vee c_{i+1,j}] \vee \neg[(a_{ij} \oplus b_{ij}) \vee c_{ij}], \\ & \neg[(a_{i-1,j} \oplus b_{i-1,j}) \vee c_{i-1,j}] \vee \neg[(a_{ij} \oplus b_{ij}) \vee c_{ij}], \\ & \neg[(a_{i,j-1} \oplus b_{i,j-1}) \vee c_{i,j-1}] \vee \neg[(a_{ij} \oplus b_{ij}) \vee c_{ij}], \\ & \neg[(a_{i,j+1} \oplus b_{i,j+1}) \vee c_{i,j+1}] \vee \neg[(a_{ij} \oplus b_{ij}) \vee c_{ij}] \end{aligned}$$

считываются с выходов $M19$ — $M22$ на входы $F5$ — $F8$ соответственно.

Такт 11. Производится считывание результата

$$\begin{aligned} p_2 = & \neg(\neg[(a_{i+1,j} \oplus b_{i+1,j}) \vee c_{i+1,j}] \vee \neg[(a_{ij} \oplus b_{ij}) \vee c_{ij}] \vee \neg[(a_{i-1,j} \oplus \\ & \oplus b_{i-1,j}) \vee c_{i-1,j}] \vee \neg[(a_{i,j-1} \oplus b_{i,j-1}) \vee c_{i,j-1}] \vee \neg[(a_{i,j+1} \oplus b_{i,j+1}) \vee \\ & \vee c_{i,j+1}]) = \bigwedge_h^5 [(a_h \oplus b_h) \vee c_h] \end{aligned}$$

с выхода $M17$ на вход, например, $F2$ для дальнейшей обработки или последующего вывода посредством сдвига на внешнее устройство.

Последовательностью преобразований типа $P\{p_{ij}\}$ осуществляется обработка бинарных изображений, причем количество и типы преобразований определяются качеством изображения и поставленной задачей и не зависят от размера изображения.

На рис. 5, a — e приведен пример обработки изображения последовательностью преобразований указанного типа: a — исходное изображение;

b — фильтрация помех, преобразование $p = \bigwedge_h^5 a_h$, время выполнения 8 тактов;

c — фильтрация помех с маскированием, преобразование $p = \bigvee_l^6 \left[\bigwedge_h^5 (a_h \vee c_{hl}) \right]$, время выполнения операции 48 тактов;

d — фильтрация помех, $p = \bigwedge_h^5 a_h$, время выполнения операции 8 тактов;

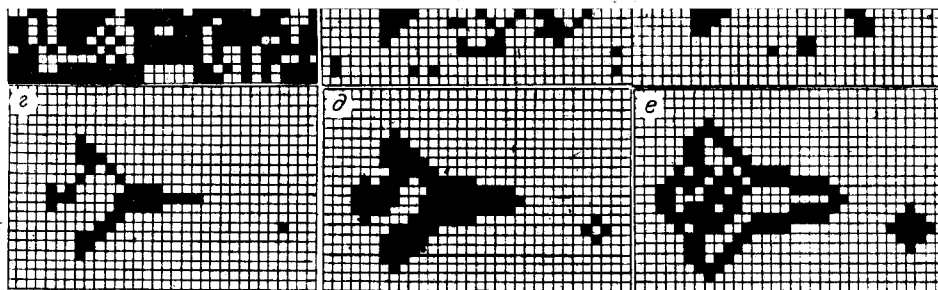


Рис. 5.

ширине линий $p = \bigvee_l^4 \left[\bigwedge_k^5 (a_k \vee c_{kl}) \right]$, время выполнения операции 32 такта; e — выделение контура, $p = \neg \left[\left(\bigwedge_k^5 a_k \right) \vee \left(\bigwedge_k^5 \bar{a}_k \right) \right]$, время выполнения 18 тактов.

Кроме осуществления указанных функций, процессор размерностью $[m \times m]$, построенный на базе описанного элемента, способен хранить 5 массивов $[m \times m]$ информации, одновременно хранить и преобразовывать три массива $[m \times m]$, сдвигать массив информации $[k \times k]$, $1 \leq k < m$, по матрице в четырех направлениях, выполнять полную систему логических функций от двух переменных и операцию одновременного попарного сложения $2m$ чисел разрядностью $m-1$ и ряд других функций.

Анализ особенностей функционирования описанного устройства, специфики его конструкции и сравнение с современными микроэлектронными устройствами, способными выполнять аналогичные функции, дает возможность сделать следующие выводы.

1. Функциональный элемент оптического процессора содержит значительно меньше элементарных компонентов (по оценкам на два порядка).

2. Общее число тактов, затрачиваемых на выполнение определенных логических операций, в данном случае по обработке изображений, также меньше, по крайней мере в N раз (N — число строк в изображении), время полной обработки изображения не зависит от его размерности.

3. Площадь, занимаемая соединениями (см. принципиальную схему (рис. 6) и топологический фрагмент (рис. 7) ячейки функционального преобразователя), составляет, как показывает проведенный анализ, 7—8% от общей площади подложки (в современных микросхемах 90% [5]).

Кроме того, описанные устройства отличаются более высокой объемной плотностью размещения элементов, надежностью сое-

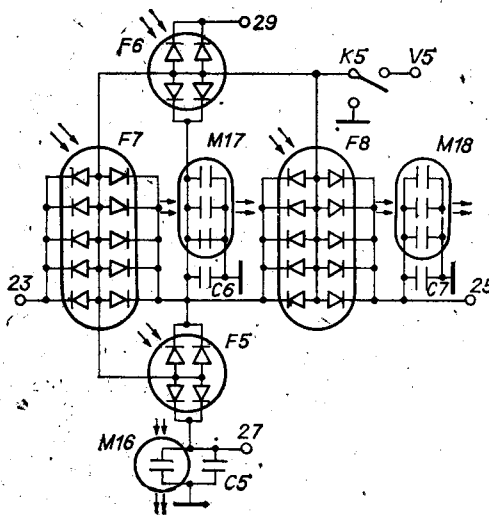


Рис. 6.

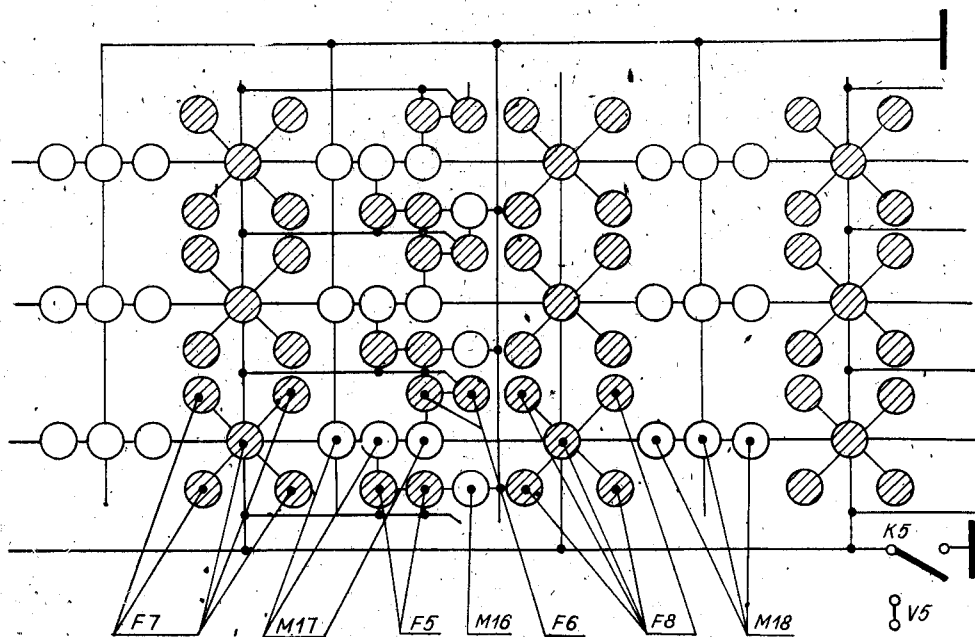


Рис. 7.

дешевизны, помехоустойчивостью и, в конечном итоге, технологичностью.

Указанные преимущества являются следствием различной природы передачи энергии по шинам питания и сигнальным каналам, отсутствия вентиляющих и переключающих элементов в логических каналах связи (что обусловлено спецификой распространения светового потока), сочетания функций памяти и логики, более эффективного выполнения вычислительной процедуры, достигаемого за счет трехмерной конструкции элемента, при которой весь массив информации обрабатывается одновременно без сортировки его на отдельные части и предварительного запоминания соответствующих групп чисел с непроизводительными затратами времени. Количественной иллюстрацией эффективности увеличения числа оптических каналов может служить сравнение описанного элемента с элементом клеточного автомата, построенного на этой же элементной базе [19]. Последний отличается также небольшим числом компонент — 210, имеет 31 оптический канал связи, выполняя при этом только одну функцию P_1 и функцию памяти. Вышеописанный элемент содержит 58 оптических каналов связи, состоит только из 119 компонент, но обладает значительно более широкими функциональными возможностями.

Каковы перспективы практической реализации описанной элементной базы? Ранее сообщалось об экспериментальном исследовании макета динамической памяти, построенного на основе электрооптических кристаллов ниобата лития [21]. Было установлено количественное соответствие экспериментально полученных и теоретических передаточных характеристик при использовании подаваемого на модулятор напряжения $V_0 = 0,3V_{\lambda/2}$ ($V_{\lambda/2}$ — полуволновое напряжение). Такая величина превышает те значения напряжений, которые характерны для элементов современной микроэлектроники. Поэтому были проведены исследования по выяснению возможности дальнейшего снижения величины V_0 и экспериментально установлено, что при применении фотоэлектрического преобразователя с ключевыми характеристиками сохраняется работоспособность ячейки памяти при $V_0 = 0,03V_{\lambda/2}$ (в реальном эксперименте 5 В).

Изготовление вышеописанных вычислительных устройств с плотностью размещения элементов, соизмеримой с плотностью элементов в СВИС, требует создания тонкопленочного модулятора света, что является достаточно сложной технологической задачей. Впервые сообщение о

наблюдении продольного электрооптического эффекта в тонких сегнетоэлектрических пленках ниобата бария стронция (НБС) появилось в работе [22]. Впоследствии удалось получить величину электрооптического коэффициента r_{af} , соизмеримого со значением r в кристаллах НБС, и использовать тонкопленочные структуры (прозрачный электрод — сегнетоэлектрическая пленка — прозрачный электрод) для импульсной модуляции светового потока с глубиной модуляции 80—90% при вращении плоскости поляризации ϕ света на 2—3° [23]. Такая величина ϕ уже достаточна для практического использования (см., например, [24], где описаны магнитооптические запоминающие устройства коммерческого масштаба, в которых величина $\phi \approx 0,3-0,6^\circ$). Кроме того, как показывает анализ, имеется резерв повышения величины ϕ , по крайней мере на порядок, за счет изменения состава сегнетоэлектрика, введения в него окислов редкоземельных элементов, например окислов лантана [25].

Таким образом, можно утверждать, что технология современной микроэлектроники дает принципиальную возможность изготовления тонкопленочных электрооптических модуляторов света с управляющими напряжениями, близкими к тем, которые характерны для элементов микроэлектроники.

Из изложенного следует, что переход на новую элементную базу ЭВМ не потребует крупных капитальных вложений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соломон П. М. Сравнение полупроводниковых приборов для скоростных логических схем.— ТИИЭР, 1982, т. 70, № 5, с. 88—112.
2. Fraser D. L. et al. Gigabit logic circuits with scaled NMOS.— In: ESSARC, Dig. Techn. Paper, 1981, p. 202—204.
3. Abe M., Mimura T., Yokoyama N., Isikawa H. New technology toward GaAs LST/VLSI for computer applications.— Trans. Electron. Dev. and IEEE Trans. Microwave Theory Techn., July 1982.
4. Новая мощная модель серии суперкомпьютеров фирмы «CRAY».— Электроника, 1982, № 9, с. 6.
5. Dao T. T.— IEEE COMPCON Spring, 1981, p. 184.
6. Кинз Р. У. Фундаментальные пределы в цифровой обработке информации.— ТИИЭР, 1981, т. 69, с. 152—166.
7. Sumhey L. W.— IEEE Spectrum, 1980, vol. 17, N 4, p. 24.
8. Chiba T. Impact of the LSI on high-speed computer packaging.— IEEE Trans. Comput., 1979, vol. C-27, p. 319—325.
9. Landman B. S., Russo R. L. On a pin versus block relationship for partitions of logic graphs.— IEEE Trans. Comput., 1971, vol. C-20, p. 1469—1479.
10. Russo R. L. On the trade off between logic performance and circuit-to-pin ratio for LSI.— IEEE Trans. Comput., 1972, vol. C-21, p. 147—153.
11. Елинсон М. И., Суханов А. А. Проблемы межсоединений в современной микроэлектронике.— Микроэлектроника, 1984, т. 13, вып. 3, с. 179—195.
12. Лоу А. Физическая реализация цифровых логических схем.— В кн.: Микромощная электроника. М.: Сов. радио, 1967, с. 30—55.
13. Андрушко Л. М., Вознесенский В. А., Панфилов И. П. Современное состояние и перспективы развития оптических интегральных схем.— Зарубеж. радиоэлектроника, 1983, № 11, с. 60—71.
14. Свешников С. В. Элементы оптоэлектроники.— М.: Сов. радио, 1977.
15. Kosonocky W. F. Laser digital devices.— In: Internat. State Circuit Conf. N. Y., 1965, p. 269.
16. Эйбрэхэм А., Ситон К. Т., Смит С. Д. Оптический компьютер.— В мире науки, 1983, № 4, с. 15—25.
17. Оптический транзистор, работающий при комнатной температуре,— предвестник создания сверхбыстродействующих компьютеров.— Электроника, 1983, № 6, с. 17.
18. Важные компоненты оптических логических схем.— Электроника, 1982, № 26, с. 3.

19. Косцов Э. Г., Мишин А. И. Особенности построения оптических ЦВМ.— Микроэлектроника, 1977, т. 6, вып. 2, с. 139—151.
20. Косцов Э. Г., Малиновский В. К., Нестерихин Ю. Е., Потапов А. Н. Особенности физической реализации оперативной оптической памяти.— Автометрия, 1976, № 4, с. 3—7.
21. Косцов Э. Г., Потапов А. Н. Пороговый логический элемент.— Автометрия, 1976, № 5, с. 93.
22. Baginsky I. L. et al. Some peculiarities of strontium barium niobate films and their electrophysical properties.— Ferroelectrics, 1978, vol. 22, p. 783.
23. Анцыгин В. Д., Косцов Э. Г., Стерелюхина Л. Н. Импульсная электрооптическая модуляция света в тонких сегнетоэлектрических пленках.— Автометрия, 1983, № 5, с. 98.
24. Четырехслойный магнитооптический диск.— Электроника, 1983, т. 55, № 14, с. 16; т. 55, № 15, с. 11.
25. Lui S. T., Bhalla A. S. Some interesting properties of dislocation-free and La-modified $\text{Sr}_{0.5}\text{Ba}_{0.5}\text{Nb}_2\text{O}_6$.— Ferroelectrics, 1983, vol. 51, p. 47—51.

Поступила в редакцию 10 июля 1984 г.