

БИБЛИОТЕЧКА

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА
И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ



Издательство
"Транс"

ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ЭВМ



ВЫПУСК

6

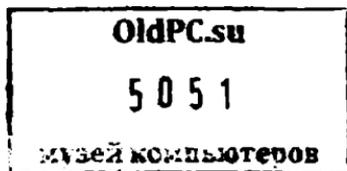
БИБЛИОТЕЧКА
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА
И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ

В помощь
лектору

ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ЭВМ

ВЫПУСК **6**

Под общей редакцией
академика К.А.Валиева



Издательство "Знание"
Москва 1987

ББК 32—97

Э 45

Составитель -- Рудзицкий Б. М., кандидат технических наук.

Э 45 Элементная база ЭВМ. — М.: Знание. 1987. — 64 с. — (В помощь лектору. Библиотечка «Вычислительная техника и ее применение»).
20 к.

Достижения в разработке элементной базы — это определяющий фактор в современных и перспективных электронных устройствах, это и микропроцессоры, и вычислительные устройства, и системы от микро-ЭВМ до супер-ЭВМ.

В брошюре уделено особое внимание развитию функциональной электроники. Обсуждены проблемы создания перспективной элементной базы.

Э $\frac{240500000-078}{073(02)-87}$

ББК 32—97

© Издательство «Знание», 1987 г.

Тенденции развития (обзор и выводы)	4
Носители информации в приборах функциональной электроники Я. А. Федотов	16
Устройства вычислительной техники на элементах функциональной электроники А. А. Ерофеев	37
Новая ЭВМ Марки, типы, характеристики П. И. Пархоменко, В. Н. Беляев, М. С. Гуревич	58

Тенденции развития (обзор и выводы)

Прежде чем перейти к перспективам развития элементной базы вычислительных систем, имеет смысл изложить некоторые общеизвестные сведения, в том числе и исторического характера.

Роль электроники как катализатора научно-технического прогресса общепризнана. Только с использованием последних достижений электроники человечество покоряет космос, исследует недра земли и глубины океана, создает атомную энергетику и вычислительную технику, проводит автоматизацию производства и т. д.

Электроника — это область науки, техники и производства, охватывающая исследования и разработку электронных приборов и принципов их использования. Микроэлектроника — раздел электроники, подразделом которого являются интегральные микросхемы (ИС). Все достижения и перспективы микроэлектроники определяются прежде всего технологией, что сейчас общепризнано и для других отраслей науки и техники. Интегральная схема — это совокупность различных компонентов, изготовленных в едином технологическом цикле и выполняющих определенную функцию преобразования информации (сигнала).

Особенно результативно и наглядно развитие электроники прослеживается на создании средств вычислительной техники.

Первые электронно-вычислительные машины (ЭВМ) были созданы в 40-х годах на электровакуумных лампах, имели внушительные размеры, а быстродействие — всего $1 \div 5$ тыс. операций в секунду.

Второе поколение ЭВМ на дискретных полупроводниковых приборах (диодах и транзисторах) позволило поднять производительность вычислений до 100—500 тыс. операций в секунду и существенно снизить габариты и потребляемую мощность.

Применение ИС позволило создать третье поколение ЭВМ с производительностью 1—20 млн. операций в секунду, при этом была резко повышена надежность вычислительных систем.

Дальнейшее повышение степени интеграции и скорости действия ИС позволило создать самые высокопроизводительные в настоящее время вычислительные комплексы на основе супер-ЭВМ со скоростью выполнения вычислений от 100 млн. до 10 млрд. операций в секунду. Следует отметить, что это далеко не предел достижений микроэлектроники, а следовательно, вычислительной техники и других направлений науки с использованием электроники.

По мнению ряда ученых, развитие и применение микроэлектроники только началось, и сегодня используется только 5% тех возможностей, которые микроэлектроника в действительности способна предложить промышленности. И только примерно через два десятилетия станет возможным почти полное использование огромного потенциала микроэлектроники.

Элементную базу вычислительной техники по функциональному назначению можно разделить очень укрупненно на следующие большие группы: логические интегральные схемы, включая микропроцессоры, интегральные схемы оперативной и постоянной памяти, электронные устройства систем связи, ИС управления магнитными запоминающими устройствами, операционные усилители, преобразователи и т. д.

Существуют также еще некоторые чрезвычайно интересные и оригинальные направления работ по созданию устройств вычислительной техники с использованием оптоэлектроники, функциональной электроники, квантовой микросхемотехники и др.

Чтобы представить, с чем связаны перспективы развития микроэлектроники, остановимся на некоторых наиболее сложных проблемах, стоящих перед разработчиками изделий электронной техники.

Наиболее употребляемыми исходными полупроводниковыми материалами являются в настоящее время кремний, арсенид галлия, фосфид индия и др. Например, требования к одному из основных используемых материалов — кремнию следующие: по чистоте — не более одного атома примеси на 10 млн. атомов кремния, по монокристалличности — плотность дислокаций (наруше-

ний кристаллической решетки) менее 10^7 см⁻³, по однородности удельного сопротивления — менее 1—2% и т. д. Для получения материала с подобными характеристиками требуется дорогостоящее сложнейшее оборудование, управляемое вычислительной техникой. В настоящее время даже выполняются программы по методам получения высококачественных полупроводниковых материалов в космических лабораториях в условиях сверхвысокого вакуума и невесомости, чтобы получить материалы, уникальные по чистоте и монокристалличности.

Сложнейшим вопросом повышения степени интеграции в микроэлектронике является проблема создания на поверхности полупроводникового материала областей субмикронных размеров — проблема так называемой литографии. Реализован ряд методов осуществления процессов литографии, задача которых сводится к созданию на поверхности полупроводниковой пластины прецизионного определенной конфигурации отверстия в нанесенной на полупроводниковую пластину диэлектрической или металлической пленки.

В. И. Никишин,
доктор технических наук

Рассматривая основные характеристики элементной базы современных компьютеров и перспективы ее ближайшего развития, прежде всего отметим, что совершенствование технологии производства в области элементной базы компьютеров пятого поколения и суперкомпьютеров включает в себя: дальнейшую миниатюризацию кристалла (чипа); увеличение числа компонентов на чипе; уменьшение размеров проводников; увеличение скоростей переключения; внедрение новых физических процессов; разработку новой технологии графировки и литографии компонентов на чипе; разработку новых конструкций соединений чипов в блоки; поиски новых перспективных материалов для чипов или их аналогов в будущем.

Кремниевые чипы на ближайшее десятилетие останутся основой элементной базы. Новые альтернативные материалы (например, арсенид галлия) получат более широкое распространение, особенно в связи с развитием биотехнологии, к концу следующего десятилетия. При этом цены на чипы будут падать. Отмечается, что меж-

ду 1972—1981 гг. количество транзисторов, размещаемых на чипе, удваивалось каждый год (11 тыс. — в 1972 г., 600 тыс. — в 1982 г.). Стоимость производства чипа упала за период с 1972 по 1982 г. в 1000 раз [1]. Одна из особенностей современной микроэлектронной промышленности состоит в том, что увеличение плотности компонентов на чипе не связано с увеличением технологических затрат и, следовательно, ведет к удешевлению единицы компонента. Это одна из экономических предпосылок, позволяющая делать современные компьютеры экономически доступными все более широкому кругу пользователей [2].

Современное состояние и тенденции развития элементной базы связаны также с уменьшением ширины проводящих линий между транзисторами на чипе. Ширина проводящих линий уменьшалась в 2 раза каждые 6—7 лет: с 25 мкм в 1972 г. до 1,5 мкм в настоящее время. Эта тенденция в недалеком будущем может привести к достижению физических пределов ширины линий, которая равна 0,5 мкм. В связи с этим уже сейчас стоит вопрос об изменении технологии конструирования сверхбольших интегральных схем. Уже сейчас разрабатывается новая технология, основанная на применении литографирования электронным пучком и на ионной имплантации. Ионная технология в настоящее время находится в стадии разработки, но она является единственной возможностью производства многомерных чипов. По теоретическим расчетам это может привести к созданию чипов, насчитывающих до 1 млрд. компонентов на 1 см².

Одним из мощных резервов увеличения быстродействия в современных компьютерах является повышение скоростей переключения. Тенденции технологических разработок в этой области и их ближайшие перспективы характеризуются следующим: в середине 60-х годов скорость одного переключения равнялась 1⁻¹ млн. с, в 1977 г. она равнялась 1⁻¹ млрд. с, к 1990 г. одно переключение будет совершаться за 1⁻¹ трлн. с [1].

То обстоятельство, что современная информационная технология в целом ряде производств подходит к физическим пределам, связанным отчасти с характеристиками веществ, используемых для производства чипов, заставляет исследователей искать новые материалы. Например, высокая скорость переключения и низкий

уровень потребления энергии делают использование арсенида галлия все более привлекательным. В США объявлено о намерении финансировать производство чипов памяти и логических чипов на основе арсенида галлия, содержащих 6000—10000 программируемых логических компонентов.

Перспективные компьютеры, к конструированию которых приступят в ближайшем будущем, будут основаны на элементной базе, опирающейся не на традиционные проводники и полупроводники, а на сверхпроводники. Уйдут транзисторы, уйдет кремниевый чип, исчезнут медные проволочки, соединяющие чип с чипом. Физическую основу компьютеров будут составлять джозефсоновские переходы.

Охлажденные до температуры, близкой к абсолютному нулю, материалы приобретут особое свойство электрической сверхпроводимости, благодаря чему почти не происходит потери электроэнергии за счет превращения ее в тепло. Сверхкомпьютер, построенный с применением сверхпроводящих материалов, будет потреблять в 1000 раз меньше электроэнергии, чем равный ему по мощности современный полупроводниковый суперкомпьютер. При этом он сможет осуществлять до 5 млрд. операций в секунду, а размером будет с сигаретную коробку. Одновременно резко возрастут скорости переключения. Если скорость переключения современных суперкомпьютеров, например компьютера «Крей-1», достигает 12 нс, то скорость переключения суперкомпьютера, основанного на сверхпроводящих чипах, будет в 2000 раз большей и составит 6 пс [3].

Литература

1. Information technology R&D: Grit. trends a. iss. — Wash.; Gov. print. off., 1985. — X, 342 p.
2. Mitsuharu I. Jobs lost and gained through microelectronics//Japan echo. — Tokyo, 1985. — Vol. 12, № 3.
3. Berry A. The super-intelligent machine: An electronic odyssey. — L.: Cape, 1983. — IX.
4. Исследования и разработки в области информационной технологии: основные проблемы и тенденции. — М., ИНИ по общественным наукам АН СССР, 1987.

Время жизни микроэлектроники ограничено пока четвертью века, но, несмотря на свою молодость, темпы развития этой отрасли техники не имеют себе равных.

В электронике мы давно уже пережили этап дискретной техники, позади процессы освоения интегральной технологии, достижения средней и большой степени интеграции. Малые размеры транзисторов микроэлектронных схем позволили перейти к так называемому групповому технологическому процессу: в ряде технологических процессов одновременно можно обрабатывать 10^8 — 10^{10} транзисторов. Именно высокие коэффициенты групповой обработки обеспечивают огромную экономическую эффективность микроэлектронного производства.

Высокие темпы развития микроэлектроники стали возможны благодаря успехам в получении чистых и сверхчистых кристаллов. Среди технических кристаллов высший уровень степени очистки от примесей и совершенство кристаллической решетки получены в монокристаллах кремния. Видимо, по этой причине сегодняшний этап развития микроэлектроники часто называют кремниевым.

В микроэлектронике в настоящее время четко обозначились два направления: в интегральных схемах на полевых транзисторах стремятся достичь максимальной степени интеграции при умеренном быстродействии и малой потребляемой мощности (сверхбольшие ИС), тогда как на биполярных транзисторах строятся сверхскоростные ИС, которые можно использовать как элементную базу сверхбыстродействующих ЭВМ.

Весьма интересной ветвью развития интегральных схем на полевых транзисторах является ИС на кремнии на сапфире, в которых транзисторы изготовлены в пленке монокристаллического кремния, выращенной на диэлектрической подложке из монокристаллического сапфира. Практика показала, что время задержки и потребляемая мощность в таких ИС уменьшаются в 2 раза по сравнению с ИС на полупроводниковой подложке.

Проблемы получения минимальной потребляемой мощности, минимальных задержек обрабатываемого сигнала, получения быстрой, энергонезависимой, информационно емкой машинной памяти, разрешение проблемы «тирании соединений», а также достижения минимальных стоимостных показателей микроэлектронной продукции — на все это направлены усилия ученых и производственников во всем мире. Только программные средства оказались не в состоянии полностью устранить противоречие между вынужденной специализаци-

ей БИС и их экономичностью. Встала проблема создания универсальной микроэлектронной продукции. Начало этому положено созданием микропроцессора, а в настоящее время — микропроцессорных комплектов. Но, несмотря на огромные успехи в развитии микропроцессорной техники, разнообразие применяемых в ней конструкторских и архитектурных решений, микропроцессорные комплекты не предоставили достаточной универсальности во всех классах цифровой аппаратуры. Общеизвестна невозможность создания на их основе супер-ЭВМ и больших машин.

Даже в области создания малых устройств обработки информации разнообразие требований столь велико, что все имеющиеся типы микропроцессорных комплектов БИС не покрывают этих потребностей. Стала очевидной необходимость разработки более гибкого архитектурного типа логических БИС, позволяющего быстро удовлетворять потребности в новых типах. Таким архитектурным типом оказались полузаказные и заказные БИС. Полузаказные БИС привлекают к себе особое внимание как перспективное направление в развитии элементной базы малых ЭВМ и систем автоматического проектирования (САПР).

Естественным развитием идей полузаказных логических БИС на матрице логических элементов или библиотеке стандартных ячеек является предложение о создании субсистем на целой пластине. Интерес к этой идее объясняется просто — возможно сокращение длины связей между ячейками (блоками) системы, т. е. увеличение быстродействия.

Субсистема, состоящая из 100 или более параллельно работающих процессоров, может иметь производительность при обработке информации порядка 1 млрд. команд/с.

Другая область плодотворного применения субсистем на целой кремниевой пластине состоит в создании гигантских БИС (ГБИС) полупроводниковой памяти. В таких конструкциях достижимы минимальные задержки сигналов.

В 80-х годах родилась и активно разрабатывается идея о трехмерных интегральных схемах. Это схема, в которой активные элементы (транзисторы) конструктивно скомпонованы в несколько слоев. Для таких схем создаются пластины, состоящие из нескольких слоев по-

лупроводникового материала, разделенных диэлектрическими прослойками.

На нынешнем этапе можно высказать много аргументов за и против такой конструкции интегральной схемы. В пользу их создания можно высказать следующие убедительные доводы:

1. Возможен дальнейший рост степени интеграции.

2. Многоэтажная конструкция может эффективно использоваться для изготовления на разных этажах схемы приборов разных типов и интеграции их в составе БИС — это даст выигрыш в качестве интегральной схемы. Например, объединение в составе ИС n -канальных и p -канальных транзисторов позволило создать так называемую комплементарную (КМОП) схему, практически не потребляющую энергии в статическом состоянии. Аналогичные свойства приобретают схемы, построенные на n - p - n и p - n - p биполярных транзисторах.

3. Возможно упрощение схемы соединений — вспомните проблему «тирании соединений».

4. Физическая структура может быть упрощена благодаря размещению приборов разных типов в разных слоях.

Оценивая современное состояние микроэлектронной техники, можно сделать вывод о том, что к настоящему времени научная база для изготовления трехмерных интегральных схем создана, и можно ожидать, что в относительно близком будущем такие интегральные схемы станут реальностью.

В основе развития твердотельной технологии (в историческом плане) лежал кремний. Первые опыты по замене германия на кремний были сделаны при переходе от сплавной технологии к диффузионной. Далее кремний завоевывает твердые позиции в планарной технологии. На сегодняшний день в конкурентной борьбе кремний недосягаем. Однако и кремниевая технология имеет свои недостатки, они хорошо известны (например, небольшая скорость в нем основных и неосновных носителей — электронов и дырок), и потому идет активный поиск других полупроводниковых материалов для создания интегральных схем.

Арсенид галлия — основной конкурент кремния в производстве быстродействующих приборов. Большой класс приборов создан на основе арсенида галлия — это приборы с гетеропереходами (например, полевой

транзистор на электронах с высокой подвижностью), или гетеропереходный туннельный транзистор на горячих электронах, или сверхрешетки (синтетические полупроводники).

Сверхрешетки относятся к наиболее ярким достижениям физики полупроводников последнего времени. Это структуры с туннельно-тонкими слоями, т. е. искусственные («синтетические») полупроводники, в которых чередуются слои полупроводников двух и более типов. Толщина слоев от 1 до 10 нм. Движение электронов перпендикулярно слоям имеет характер туннелирования сквозь энергетические барьеры. Напротив, движение электронов вдоль слоев сверхрешетки не сопряжено с преодолением барьеров. При движении вдоль слоя электроны обладают особенно высокой подвижностью. Транзистор, в котором используются эти механизмы движения электронов, получил название НЕМТ (high electron mobility transistor).

Не задерживая внимания на очень интересных приборах на эффекте Джозефсона (к сожалению, приходится считаться с вечной издательской проблемой — «тирании объемов»), коротко познакомим читателей с очень плодотворной идеей создания электронных приборов с молекулярными размерами, создаваемых методами биотехнологии.

Это направление еще находится в стадии становления. Здесь пока нет практических результатов, которые оправдали бы равноправное с полупроводниковой электроникой существование термина «молекулярная электроника».

Молекулярная электроника — это область исследований, сочетающая идеи твердотельной электроники (микроэлектроники) и молекулярной биологии. Простая мысль о том, что отдельная молекула может обладать свойствами электронного прибора и в качестве электронного прибора может быть включена в состав ЭВМ, породила этот новый и модный термин.

Субсистемы или системы, построенные методами биотехнологии из молекулярных электронных приборов, могут быть названы биочипами и био-ЭВМ (биокомпьютерами). Современное состояние этого научного направления позволяет высказать следующее положение: биологические молекулы (в пределах уже известного) не могут стать молекулярными электронными ключами и

соединениями между ними. Предстоит синтезировать молекулы, обладающие необходимым набором свойств молекулярных ключей, их соединений, матричных молекул, пригодных для построения молекулярного компьютера методами биотехнологии. Важнейшим шагом на этом пути будет разработка методов выделения отдельных молекул и исследования их «электронных» свойств.

В настоящее время молекулярная электроника стремится опираться на групповые технологические методы при сборке молекулярных ключей, биочипов из ключей и био-ЭВМ из биочипов.

К. А. Валиев,
академик

(расширенная аннотация книги
Микроэлектроника: достижения и пути
развития. — М.: Наука, 1986).

Двадцать лет прошло с начала разработки голографической памяти, а реальных, конкурентоспособных устройств, которые можно было бы отнести к промышленным, а не к лабораторным, до сих пор нет. В чем же дело? Все тот же извечный диссонанс идейных концепций и «элементной базы». Мы ставим здесь кавычки, так как в наш технологический век именно то, что иногда высокомерно, по старинке называют элементной базой, составляет физико-техническую основу, вернее, сущность новых направлений. Транзистор, интегральная схема, микропроцессор — эти элементы, каждый в свое время, определяли лицо вычислительной техники и не только параметры конкретных ЭВМ, но и всю идеологию этого научно-технического направления. Появился лазер — и возникли квантовая радиофизика, голография, нелинейная оптика. Хотя, строго говоря, идейные основы этих направлений были известны намного раньше. Но только лазер дал каждому из них жизнь.

Элементная база оптических дисковых накопителей сложилась к концу 1970-х годов, и, конечно же, не случайно именно в начале 1980-х годов начался «бум» в развитии этого направления — многочисленные прогнозы предсказывают, что оптические средства будут доминировать в архивной памяти начала XXI века.

С голографическими ЗУ ситуация, увы, иная. Используемые в лабораторных проработках элементы — газовые лазеры, разнообразные оптические затворы, дефлекторы, транспаранты — еще очень несовершенны. Как правило, они громоздки, недолговечны, сложны в изготовлении и эксплуатации, обладают недостаточно высокими значениями определяющих параметров. В элементах используются разнородные материалы, они не всегда хорошо согласуются друг с другом. Реверсивные голографические среды, структуры для многослойной объемной записи вообще далеки еще от практического применения. Приходится констатировать, что элементная база голографической памяти — если оценивать ее с позиций промышленного производства — еще не создана.

Правда, в последнее десятилетие в развитии ряда направлений оптоэлектроники достигнуты значительные успехи, которые косвенно, а иногда и прямо способствуют решению рассматриваемой проблемы. Созданы полупроводниковые лазеры с высокой степенью когерентности излучения, позволяющие записывать качественные голограммы. Развивается интегральная оптика, в рамках которой традиционные объемные оптические элементы заменяют тонкопленочными. Тонкопленочные оптические затворы могут переключаться напряжением всего в несколько вольт, при этом время переключения может быть менее 1 нс. Непрерывно улучшаются характеристики пленочных акустооптических дефлекторов, заметны сдвиги в совершенствовании оптических транспарантов. Все это вселяет оптимизм, хочется верить, что недалеко пачало свершений.

Ю. Р. Носов

доктор технических наук

**Интегральные схемы
для средств
вычислительной техники**

Н. В. Воробьев

В статье рассмотрены базовые схемы цифровых логических элементов, используемых в современных интегральных схемах малой и средней степени интеграции, выполненных по биполярной и МОП технологиям. Об-

суждаются особенности схемотехники БИС, микропроцессоров, схем памяти, универсальных вентиляльных матриц и т. д. Приведены краткие сведения о схемотехнических параметрах и характеристиках интегральных схем. Проведен анализ номенклатуры интегральных схем различного функционального назначения, в том числе цифровых, цифроаналоговых, аналоговых, пленочных и оптоэлектронных. Приведены примеры их применения в системах вычислительной техники, системах контроля и управления.

Эта статья будет опубликована в восьмом выпуске Библиотечки Вычислительная техника и ее применение.

ВЫЙДЕТ В СВЕТ В 1987 ГОДУ

Гвоздев В. И., Нефедов Е. И. Объемные интегральные схемы СВЧ — элементная база аналоговой и цифровой радиоэлектроники. М.: Наука.

Изложены новые идеи разработки базовых элементов функциональных устройств на основе объемных интегральных схем, открывающих широкие возможности для улучшения параметров радиоэлектронной аппаратуры СВЧ диапазона, развития систем цифровой обработки информации, перспективы создания элементной базы для сверхбыстродействующих ЭВМ.

СБИС для распознавания образов и обработки изображений. Пер. с англ. М.: Мир.

Обсуждаются возможности различных вычислительных структур и алгоритмов, обеспечивающих решение проблем распознавания и обработки изображений. Предлагается новая технология СБИС для построения сверхбыстродействующих процессоров и многомашинных вычислителей.

Носители информации в приборах функциональной электроники

Я. А. Федотов

Первые ЭВМ на транзисторах появились за рубежом в 1958—1959 гг. В Советском Союзе первые триггеры на плоскостных транзисторах начали создаваться в Энергетическом институте АН СССР (Н. Я. Матюхин, А. Б. Залкинд) около 1956 г.

Транзисторная электроника использовала в основном традиционные для ламповой электроники принципы: носителем информации и здесь являлось электрическое состояние некоторой схмотехнической ячейки, представляющей собой совокупность активных и пассивных элементов (транзисторов, конденсаторов, резисторов) и соединений (проводников) между ними.

В 1959 г. появилась планарная технология и первые интегральные схемы (ИС), которые были изготовлены на более освоенном полупроводниковом материале — германии. Однако кремний очень быстро вытеснил германий, и в первую очередь за счет преимуществ планарной технологии. Немалую роль сыграл и более широкий температурный диапазон работы кремниевых ИС.

Надо сказать, что и первые ИС были встречены довольно скептически: ставился вопрос о воспроизводимости параметров, об идентичности параметров отдельных транзисторов, о возможности изготовления на одном кристалле транзисторов с различными характеристиками и т. п.

Однако и эти трудности были вскоре преодолены, и психологический барьер был сломлен. Начался период бурного развития микроэлектроники. За относительно

короткий срок число активных элементов на одном кристалле выросло с 10—20 штук до десятков и даже сотен тысяч штук. За рубежом получил распространение так называемый закон Мура, по которому уровень (или степень) интеграции ежегодно возрастал приблизительно вдвое. В настоящее время эти темпы замедлились, и рост уровня интеграции происходит несколько медленнее. Так, за последнее десятилетие уровень интеграции повысился примерно в 100 раз, что дает удвоение приблизительно за 1,5 года.

Развитие техники интегральных схем за рубежом было в значительной степени стимулировано необходимостью усовершенствования ракеты «Минитмен». Фирма Texas Instruments приняла подряд на разработку ряда типономиналов ИС с поставкой по 4000 ИС в месяц, что вывело эту фирму на ведущее в области ИС место. Следом за фирмой Texas Instruments аналогичный контракт с НАСА заключила фирма Fairchild. Произошло это в 1961—1962 гг.

Быстрое развитие микроэлектроники было связано с ее огромными перспективами для вычислительной техники, где многократно повторяются аналогичные логические ячейки или ячейки памяти.

Нельзя не отметить, что, несмотря на некоторые специфические особенности по сравнению с техникой дискретных элементов, в микроэлектронике носителем информации оставалось электрическое состояние некоторой схемотехнической ячейки, все составляющие элементы которой формировались в приповерхностном слое кремниевого кристалла. Такую ячейку уже только мысленно было возможно разделить на элементы. Элементарные ячейки — носители информации в микроэлектронике — стали представлять собой совокупность большого количества сформированных технологически областей с различными электрофизическими свойствами. С точки зрения выполняемых функций это могут быть эмиттерные, базовые и коллекторные области биполярных транзисторов, исток, сток, затвор и подзатворный окисел МДП-транзисторов, электронно-дырочные переходы, выполняющие самые различные функции, диэлектрические изолирующие слои, межсоединения между различными областями и контактные области.

По своим электрофизическим характеристикам это могут быть полупроводниковые области, легированные

в различной степени, диэлектрические или металлические области.

Границы этих областей жестко заданы и строго соблюдаются в технологическом процессе. С этой точки зрения говорят о технологической интеграции в современной микроэлектронике. В равновесном состоянии и границы этих областей, и их электрофизические параметры не должны претерпевать никаких изменений, ибо это будет рассматриваться как деградация, как дефект, ведущий к отказу. С этой точки зрения такие области получили название статистических неоднородностей.

Таким образом, основным традиционным носителем информации в современной микроэлектронике является электрическое состояние некоторого, довольно большого количества статических неоднородностей, созданных технологически в кристалле кремния или другого полупроводникового материала, например арсенида галлия.

Традиционным для микроэлектроники остался и основной принцип обработки информации: двоичная система с последовательной передачей информации типа «1» или «0» от одной ячейки к другой.

Увеличение объемов информации, требования «быстрой реакции» вычислительных и управляющих систем на вводимую информацию поставили на повестку дня проблему повышения быстродействия систем.

Вполне естественным путем в этом направлении явилось требование повышения быстродействия активных элементов ИС. Однако наряду с этим путем в 1951 г. была сформулирована и еще одна идея, еще один путь повышения быстродействия — распараллеливание. Было предложено передавать группу бит одновременно. По мнению некоторых специалистов, метод распараллеливания должен быть дешевле метода повышения быстродействия активных элементов.

Практически развитие микроэлектроники и вычислительной техники шло и идет одновременно по двум этим путям.

В то же время нельзя не отметить, что каждая из проблем имеет свои трудности. С одной стороны, распараллеливание не представляет беспредельных возможностей: десятки, сотни каналов. С другой стороны, и повышение быстродействия активных элементов сталкивается с серьезными технологическими сложностями и физическими ограничениями.

Не рассматривая подробно всех сложностей и ограничений на пути повышения быстродействия активных элементов, мы обратим внимание лишь на то, что «внутри» каждого из каналов имеет место последовательное прохождение информации от ячейки к ячейке на уровне «элементарных функций низшего порядка», т. е. основных функций типа «И», «ИЛИ» и «НЕ». При этом передача информации от ячейки к ячейке происходит через межсоединения. На всех этапах развития электроники межсоединения имели самый различный вид: провода, фольга на печатных платах, толстые и тонкие пленки.

На современном уровне техники интегральных схем как внутриячеечные, так и межъячеечные соединения выполняются тонкими узкими металлическими токоведущими дорожками.

С ростом уровня интеграции размеры этих дорожек постоянно уменьшались до пределов разрешающей способности основного технологического процесса — фотолитографии. Фотолитография в технике ИС начала развиваться с 1959 г. В начале 70-х годов минимальная ширина линии на поверхности кристалла (минимальный топологический размер — МТР) составляла около 20 мкм. К середине 70-х годов она достигла 10 мкм, к концу составляла уже 3—4 мкм и стали появляться опытные образцы с шириной линии в 1—2 мкм.

Тем не менее в массовом производстве ИС в настоящее время преобладает МТР в 2—3 мкм. Размер в 1 мкм продолжает оставаться в стадии опытных разработок. Интегральных схем с субмикронными размерами пока еще практически не получено, хотя уже и создаются методы и оборудование, позволяющее получать отдельные линии шириной в десятки ангстрем.

Эти успехи вызваны разработкой новых видов оборудования и новых технологических процессов: переходом в фотолитографии от экспонирования УФ-облучением с длиной волны в 0,4 мкм к длине волны 0,2 мкм, развитием техники электро- и рентгенолитографии и т. п.

Такие обнадеживающие результаты приводят многих системотехников к мысли о том, что процесс повышения уровня интеграции будет продолжаться чуть ли не бесконечно, что весь вопрос сводится к технике уменьшения МТР и повышения быстродействия активных эле-

ментов схемотехнических ячеек (будь то биполярные или полевые транзисторы, туннельные или квазибаллистические транзисторы или какой-либо еще новый сверхбыстродействующий тип активного элемента).

К сожалению, проблема оказывается значительно сложнее.

Тенденцию к повышению уровня интеграции, помимо технико-экономических соображений, в значительной мере стимулировали две проблемы: проблема надежности и проблема быстродействия. Обе эти проблемы были связаны с внешними межсоединениями между ИС на плате.

Паяные соединения выводов ИС с соединениями на плате оказались самым уязвимым местом устройств — основной причиной отказов. Паразитные параметры соединений на плате — основным фактором, ограничивающим быстродействие.

Повышение уровня интеграции позволило резко уменьшить число паяных соединений, сократить число внешних соединений, уменьшить паразитные параметры за счет перехода от внешних соединений к меньшим по размерам внутренним соединениям.

Можно предположить три основных пути повышения уровня интеграции:

- оптимизация размещения элементов на кристалле;
- увеличение размеров кристалла;
- уменьшение размеров топологических элементов.

Оптимизация размещения элементов на кристалле — наиболее простой, особенно в условиях применения САПР, способ. Однако он может дать лишь весьма ограниченные результаты.

Увеличение размеров кристалла связано с весьма большими сложностями.

Во-первых, с увеличением «поля зрения» оптики падает ее разрешающая способность. Увеличивать же размеры кристалла с одновременным увеличением МТР нет смысла.

Во-вторых, с увеличением размера кристалла в значительной степени возрастает вероятность поражения его дефектом в ходе многочисленных технологических операций. Да и сама исходная пластина при увеличении размера кристалла должна иметь меньшую плотность дефектов. Эти факторы неизменно скажутся на технико-

экономических показателей, т. е. на проценте выхода годных кристаллов.

В-третьих, число активных элементов на кристалле возрастет отнюдь не пропорционально росту площади кристалла. С ростом числа активных элементов резко возрастает площадь, занимаемая внутренними межсоединениями.

В связи с этими ограничениями повышение уровня интеграции происходит в значительной степени не за счет роста площади кристалла, а за счет уменьшения МТР.

Если линейные размеры кристаллов ИС, находящихся в серийном производстве, возросли примерно в 3 раза (с 2 до 6 мм), то линейные размеры элементов топологии уменьшились приблизительно в 10 раз (с 20 до 2 мкм).

Аналогичные цифры заложены и в перспективах исследования и разработок. Так, в основу объявленной в 1978 г. в США военной программы разработок сверхскоростных интегральных схем (ССИС или С²ИС) заложены площадь кристалла 10×10 мм² и МТР на первом этапе порядка 1 мкм, а на втором — в 0,5 мкм. При увеличении стороны кристалла всего в 5 раз размер линии (МТР) должен уменьшиться более чем в 30—40 раз.

В результате, по данным фирмы Texas Instruments, за период с 1959 по 1983 г. минимальный размер ширины линии уменьшался по 11% в год, что дало увеличение числа элементов на 1 см² кристалла в 8,7 раза. Площадь кристалла возрастала на 19% в год (что соответствует увеличению линейных размеров кристалла примерно на 9% в год). Это дало увеличение числа активных элементов на единицу площади всего в 5,7 раза. Рациональное проектирование дало возможность повысить число элементов в 2,1 раза. В итоге рост числа элементов на единицу площади за десятилетие составил около 100 раз.

Есть еще один возможный путь повышения уровня интеграции: переход к многослойным ИС. Однако в этой области не опубликовано сколь-нибудь обнадеживающих результатов. Это связано в первую очередь с тем, что при высоких уровнях интеграции и малых размерах элементов обеспечение совмещения ячеек, расположенных на разных уровнях, и соединений между ними пред-

ставляет собой серьезную техническую трудность. Не разрешена пока и проблема теплоотвода. Если сегодня мощность, рассеиваемая на кристалле, составляет 2—4 Вт и тепло отводится в основном через подложку, то в многослойных структурах следует ожидать существенного перегрева.

Итак, в проблеме повышения уровня интеграции на первом месте оказалась проблема уменьшения МТР, на втором — увеличение площади кристалла.

Однако на пути повышения степени интеграции при приближении к МТР в 1 мкм и менее встала серьезная проблема, которую мы позволили себе назвать тиранией межсоединений.

Прежде всего пришлось убедиться, что при увеличении числа активных элементов на кристалле резко возрастает площадь, занимаемая межсоединениями. При типовой трехслойной разводке она может составить более 80% площади кристалла. Для 12-слойной разводки эта площадь может быть сокращена до 50%. Однако нетрудно себе представить, что при ширине токоведущих дорожек (и зазоров между ними) порядка одного микрона и менее толщина этих дорожек и изолирующих слоев между ними должна быть значительно меньше их ширины.

Соответственно малой должна быть и толщина диэлектрических слоев, разделяющих уровни разводки. В результате при высоких уровнях интеграции многоуровневая разводка представляется не реальной. Достаточно указать, что в той же программе ССИС ставится задача доведения «полезной» площади кристалла до 30%, что по расчетам той же фирмы Texas Instruments может быть обеспечено 5—6-уровневой разводкой.

Однако это препятствие можно считать технологически преодолимым, хотя и потребуются значительные усилия.

Гораздо большие неприятности с позиций обеспечения высокой надежности и быстродействия ожидают нас при высоких уровнях интеграции.

В области надежности мы сталкиваемся прежде всего с проблемой электропереноса. Безопасной плотностью тока для внутренних межсоединений ИС можно считать величину порядка 10^5 А/см². Локальное увеличение плотности тока в 2—3 раза, вызванное неравномер-

ностью сечения, приводит к резкому, на 4—5 порядков, возрастанию интенсивности отказов.

Когда-то надежность электронных ламп определялась сроком службы, т. е. периодом естественного износа, после которого интенсивность отказов резко возрастала.

Появление полупроводниковых приборов практически исключило из обращения понятие срока службы, ибо срок ресурсного износа если и существовал, то был настолько велик, что не исследовался и не подвергался рассмотрению.

При малых сечениях и относительно большой длине внутренних межсоединений ИС проблема ресурсного износа межсоединений возникает вновь. Большой неприятностью является и то, что этот вид дефектов — скрытый, их трудно выявить в ходе технологических процессов и контрольно-поверочных испытаний. Прогнозирование надежности ИС при высоких уровнях интеграции становится весьма затруднительным, а технологические мероприятия по обеспечению надежности — дорогостоящими.

Мы не рассматриваем здесь подробно и такую серьезную проблему, как проблема электрического пробоя между токоведущими дорожками по поверхности и через слой диэлектрика.

В настоящее время стандартным напряжением источников питания для ИС является 5 В.

Один из ведущих специалистов США в области интегральной электроники Гордон Мур сказал однажды: «Это пятивольтовый мир. И чтобы перейти к 1,5 В, потребуется повернуть весь этот мир целиком».

С Гордоном Муром нельзя не согласиться. С одной стороны, достаточно убедительно показано, что для надежного срабатывания ячеек — носителей информации на их вход необходимо подавать напряжение порядка 0,3 В.

При высоком быстродействии нам естественно придется работать при плотностях тока, приближающихся к критическим. Нетрудно подсчитать для различных значений МТР, какие падения напряжения это будет вызывать на межсоединениях достаточно большой (порядка величины стороны кристалла) длины, какие напряжения необходимы на выходе предшествующей ячейки и какие напряженности электрического поля могут

при этом возникать между соседними межсоединениями.

Более того, при высоких быстродействиях и малых размерах межсоединений меняется и характер распространения сигнала по ним. Они начинают работать как волноводные линии с высоким декрементом затухания. Потери в них возрастают, их температура повышается, критическое значение плотности тока с позиций электропереноса падает. А это значит, что обеспечить достаточную мощность на входе ячейки можно только повышением напряжения на выходе предыдущей ячейки.

Но и это еще не все неприятности, связанные с «тиранией межсоединений». Как когда-то «внешние» межсоединения были главным ограничивающим фактором быстродействия систем, так теперь таким ограничивающим фактором стали внутренние межсоединения. Быстродействие, определяемое межсоединениями, становится не только сравнимым, но и значительно худшим по сравнению с быстродействием активных элементов. Уменьшая размеры активных элементов и повышая их быстродействие, мы вынуждены уменьшать размеры межсоединений (ширина, сечение) и ухудшать при этом быстродействие. При МТР в 1,0—0,5 мкм быстродействие будет определяться уже не быстродействием активных элементов, а возможностями межсоединений.

При переходе к высоким уровням интеграции падает и процент выхода годных, т. е. существенно ухудшаются и экономические показатели.

По опубликованным за рубежом данным фирма Motorola, работая по программе ССИС, изготовила ИС с МТР в 1,3 мкм. Из 250 кристаллов на пластине она получила один годный кристалл. Стоила эта ИС 5000 долл. при средней цене одной ИС на мировом рынке в 1 долл.

Другие данные показывают, что до последнего времени повышение уровня интеграции приводило к экспоненциальному падению стоимости одного бита информации. В последние годы с переходом к МТР в 2 мкм и менее экспоненциальный закон начинает переходить в линейный. Потребитель начинает размышлять: есть ли для него практический и экономический смысл использовать СБИС с высоким уровнем интеграции или же применить 2—3 БИС, более дешевые и более надежные?

В результате за рубежом появляются высказывания

такого рода: «Некоторые специалисты уже теперь начинают интересоваться вопросом: насколько далеко может быть продвинута техника интеграции, прежде чем плотность элементов или вычислительные возможности в пересчете на один полупроводниковый кристалл приблизятся к практически невыгодному уровню».

В декабре 1984 г. на международной конференции в Сан-Франциско по электронным приборам вице-президент фирмы Texas Instruments Дж. Хейльмаейр открыл конференцию докладом: «Микроэлектроника: конец начала или начало конца?».

Основной смысл этого доклада сводился к тому, что для массовых ИС характерным останется МТР в 1,0 мкм. Субмикронные размеры в пределах от 1,0 до 0,5 мкм будут использоваться только в «специально обоснованных и тщательно продуманных ИС».

Поскольку Дж. Хейльмаейр с 1971 по 1977 г. занимал посты помощника директора и директора по научным исследованиям и технике в Министерстве обороны США, считается в США «ветераном в области баллистических ракет» и уже в 1980 г. высказывался о «непроницаемой системе противоракетной обороны», то невольно напрашивается сравнение названных им цифр с параметрами этапов программы ССИС, и выводы о ее целях и задачах.

Анализ многих, как отечественных, так и зарубежных, публикаций в области межсоединений показывает, что практическим пределом МТР является величина порядка 0,5 мкм. И это справедливо не только для наиболее распространенных алюминиевых токоведущих дорожек. Попытки применения многослойных межсоединений с применением тугоплавких металлов (вольфрам, титан), благородных металлов, алюминия, легированного медью, не дали существенных результатов. Несколько изменяется срок службы, однако критическое с позиций электропереноса значение плотности тока практически не изменяется и предел ширины токоведущих дорожек остается на уровне 0,5 мкм.

Итак, никакие усовершенствования технологии не в состоянии избавить нас от тирании межсоединений.

Классический, традиционный путь обработки информации на базе схмотехнических ячеек «на уровне элементарных функций низшего порядка» исчерпывает свои

возможности. И это надо четко себе представить. Нас «загоняет в тупик» тирания межсоединений!

В то же время объемы информации непрерывно растут, что выдвигает все новые и новые требования по быстрдействию. Где же выход из этого положения?

Одно из возможных решений, как уже говорилось выше, это распараллеливание. Это решение лежит не в сфере микроэлектроники, а в сфере системотехники. В нашу компетенцию не входит обсуждение вопроса, в какой степени этот путь в состоянии решить создавшуюся проблему.

В сфере микроэлектроники рассматриваются также некоторые возможные пути «исключения из обращения» межсоединений. Здесь главные надежды возлагаются на оптоэлектронные принципы. В первую очередь это может избавить от задержки в межсоединениях синхронизирующих импульсов. Но это решение — только часть задачи.

Рассматривается также возможность замены металлических межсоединений оптическими. Но это тоже вряд ли можно рассматривать как кардинальное решение проблемы.

Во-первых, при высоких уровнях интеграции сечение таких оптических межсоединений должно составлять при субмикронных размерах сотые доли квадратного микрометра.

Во-вторых, в каждой ячейке должны появиться дополнительные статические неоднородности (оптоэлектронные структуры), что при субмикронной технологии вызовет определенные трудности.

В-третьих, в процесс преобразования информационного сигнала внутри ячейки добавится еще один элемент преобразования: «свет — потенциал» (или «свет — заряд»), и наоборот.

В-четвертых, топология таких световодных межсоединений будет подвергнута ряду ограничений. Если вопрос их пересечения под прямыми углами упрощается (здесь не потребуется изоляции), то вряд ли удастся изгибать их под произвольными углами, как мы это делаем с металлическими проводниками.

И что самое главное, мы и здесь продолжаем оставаться на схемотехнических принципах, на электрическом состоянии схемотехнической ячейки в качестве носителя информации, а также на последовательных

принципах обработки информации, на обработке информации «на уровне элементарных функций низшего порядка».

В то же время в информатике, в вычислительной технике, в робототехнике, в проблеме создания «искусственного интеллекта» все с большей остротой встает проблема обработки больших массивов информации с высокими скоростями, т. е. проблема распознавания образов и еще более сложная — проблема понимания образов.

Распознавание образов — это только часть общей проблемы: сличение «образа-оригинала» с «образом-эталоном» и выдача информации о совпадении или несовпадении оригинала и эталона.

Проблема понимания образов — это уже не просто проблема сопоставления, но и проблема характерных отличительных признаков, определения принадлежности этого признака эталону или оригиналу и обработка (классификация) этого признака.

С этой точки зрения поступающую информацию можно условно разделить на две большие категории:

- а) конкретная информация (образы),
- б) абстрактная информация (понятия).

Конечно, и для этих проблем информация может быть обработана последовательно, но это потребовало бы создания сложнейших устройств и значительных затрат труда и времени.

Максимальное количество информации человек получает посредством зрения. Мы не беремся подсчитать, какое количество информации поступает в глаз одновременно в битах. Однако если знать, что человеческий глаз способен различать до 18 000 цветов и оттенков, вспомнить о 1,5 млн. рецепторов и таком же количестве нервных волокон, соединяющих глаз с мозгом, если учесть относительно медленную скорость химических биологических процессов, если вспомнить, что на распознавание образа человек тратит всего около 0,05 с, то станет совершенно очевидно, что здесь о последовательной обработке информации как единственном способе не может быть и речи.

Мы обладаем способностью «отбрасывать» не менее 99% поступающей через зрение информации. Как это происходит? Трудно сказать. Однако если попробовать создать модель этого процесса, то неизбежно приходишь

к мысли о возможности параллельной «одномоментной» обработки образа, при которой одновременно происходит сравнение «образа-оригинала» с некоторым «образом-эталоном», хранящимся в памяти.

В результате такого «одномоментного» сравнения двух очень больших массивов конкретной информации выделяются значительно меньшие подмассивы информации, содержащие некоторые отличительные признаки — понятия. Понятия принадлежат уже к конкретной информации и подлежат последовательной обработке: «красный», «круглый», «хороший», «война», «мир» не могут быть представлены в виде образов.

Это доказали хотя бы «успехи» абстрактной живописи, где делались попытки именно в форме образов представить абстрактные понятия. (О символике типа олимпийской, изображающей виды спорта и т. п., мы не говорим, это «микрообразы», символизирующие абстрактные понятия...)

И «вводим» и «выводим» абстрактные понятия мы последовательно: либо как последовательность букв, либо как последовательность звуков.

Таким образом, электронная модель человеческого зрения могла бы выглядеть (в явно упрощенном виде!) таким образом:

а) параллельная «одномоментная» обработка больших массивов информации на первом этапе и выборка значительно меньших по объему подмассивов.

б) последовательная обработка информации, содержащейся в подмассивах.

Возможности последовательной обработки информации нам хорошо знакомы. Что же может представлять собой параллельная обработка информации?

С уверенностью можно сказать, что схемотехническая ячейка как носитель информации для этого совершенно непригодна.

Следовательно, необходим некоторый новый вид носителя информации. И такой вид в настоящее время существует — это динамическая неоднородность, локальное неравновесное состояние в некоторой однородной, протяженной (континуальной) среде.

К числу таких динамических неоднородностей можно отнести и цилиндрические магнитные домены (ЦМД), и поверхностные акустические волны (ПАВ), и «карманы», и пакеты зарядов в приборах с зарядовой связью

(ПЗС), и домены вынужденной переполаризации в сегнетоэлектриках и т. п.

Многие из них с успехом используются и в настоящее время: одни — для работы в цифровой системе, как ЦМД, другие — в аналоговой системе (ПАВ), третьи могут использоваться и в смешанной цифро-аналоговой системе (ПЗС).

Все их можно объединить в одну группу на основе следующего основного признака: носителем информации в них являются не схмотехнические ячейки, т. е. не совокупность большого количества статических неоднородностей, а динамические неоднородности.

Электроника динамических неоднородностей названа функциональной электроникой.

В докладе Дж. Хейльмайера в Сан-Франциско говорится о необходимости перехода к обработке информации «на уровне элементарных функций высшего порядка». В своем докладе он не раскрывает, как представляет себе «уровень элементарных функций высшего порядка». Он затрагивает только вопрос необходимости перехода от классических схмотехнических принципов, развитие которых будет остановлено где-то на уровне МТР порядка 0,5 мкм, к «квантовосвязанным устройствам» и размерам в 0,3—0,01 мкм.

С нашей точки зрения, параллельная обработка массивов информации с «одномоментным» сравнением и переносом массивов и должна являться базой для создания устройств обработки информации на «уровне элементарных функций высшего порядка».

Эта методика, эти принципы, лежащие в основе устройств функциональной электроники, могли бы развиваться уже на базе современного уровня технологических возможностей, на базе МТР порядка 1—3 мкм. Переход к субмикронной технологии только расширил бы возможности функциональной электроники.

В настоящее время функциональная электроника находится на первом, начальном этапе своего развития. Для нее сегодня характерны:

— использование одного эффекта и одного вида динамических неоднородностей;

— использование этих устройств в первую очередь как «вспомогательных средств» в цифровой вычислительной технике;

— недостаточная изученность различного рода фи-

зических эффектов, динамических неоднородностей и возможностей использования взаимодействия динамических неоднородностей разной природы в разных средах (а иногда и в одной среде).

На повестке дня сегодня стоит вопрос интеграции различных физических эффектов в одном устройстве, позволяющем обрабатывать большие массивы информации «одномоментно».

Однако нужно, к сожалению, отметить, что необходимость поиска путей, позволяющих развивать микроэлектронику не на классических схемотехнических принципах с постоянным уменьшением МТР и повышением быстродействия активных элементов, еще не овладела в достаточной степени умами.

Мы все еще надеемся, что «на наш век хватит» классических путей. Трудно сказать, кто и как оценивает длительность «своего века», но тот же Дж. Хейльмайер считает, что к 1995 г. устройства нового типа должны выйти на уровень промышленного производства. Если это так, то срок нам отпущен не такой уж большой.

Одним из свойств психологических барьеров является то, что всегда можно задать вопрос типа: «Какие конкретные технические решения предлагаются?»

В эпоху рождения транзистора ответить на этот вопрос было относительно легко: взяв в руки паяльник, собрать и продемонстрировать работоспособность той или иной электронной схемы. Это как раз то, чем занимался автор данной статьи в 1953—1956 гг. И в этот период можно было слышать категорические заключения довольно крупных специалистов о том, что транзисторы никогда не пойдут в серьезную аппаратуру и что единственно перспективной областью для них могут являться слуховые аппараты.

С развитием микроэлектроники, с появлением БИС и СБИС обстановка с «психологическими барьерами» стала значительно сложнее. Современная СБИС — это сложное устройство, в создании которого принимают участие большие коллективы специалистов от системотехников до технологов. В практике САПР, например, используется большое количество типовых, достаточно хорошо отработанных схемотехнических и технологических решений.

На этом уровне еще можно более или менее обосновать, что существует предел развития данного, столь

привычного направления, поставить вопрос о необходимости поиска новых путей дальнейшего развития.

Можно показать и возможности создания многослойных структур с параллельным переносом информации массивом из одного активного слоя в другой (из одной континуальной среды в другую). Можно показать, что такой метод переноса может быть осуществлен как оптическими, так и оптоэлектронными методами. Можно проводить исследования новых видов континуальных сред и новых видов динамических неоднородностей, например доменов переполаризации в тонких сегнетоэлектрических пленках. Можно изучить взаимодействие различных видов динамических неоднородностей, например взаимодействие ПАВ с доменами переполаризации в пленках сегнетопъезоэлектриков. Все эти исследования будут бесспорно расширять наши представления о динамических неоднородностях и, таким образом, ложиться в актив развития функциональной электроники.

Однако нельзя не сказать, что все эти исследования будут малозффективны, если они не будут направляться к решению конечной задачи. В то же время вряд ли можно сформулировать достаточно четко эту конечную задачу: принцип обработки информации массивами.

В функциональной электронике, как нигде, необходим системный подход к решению задачи. Задача должна решаться в комплексе: построение теории и поиски технических средств. Только так представляется нам кратчайший путь к решению вопроса.

Какие же выводы можно сделать из всего вышеизложенного?

1. Классический схемотехнический путь развития микроэлектроники как по пути увеличения размеров кристалла, так и по пути уменьшения минимального топологического размера неизбежно «упирается» в барьер МТР, лежащий в районе 0,5 мкм. Было бы неправильно представлять, что этот тезис ставит под сомнение целесообразность дальнейших работ в области БИС и СБИС и развития техники субмикронных размеров. БИС и СБИС, видимо, будут продолжать развиваться и в третьем тысячелетии, хотя бы уже и потому, что устройства функциональной электроники будут работать в одной системе с БИС и СБИС.

Не отпадает необходимость и в разработке субмикронной технологии:

повышение точности фотолитографических процессов дает возможность уменьшить неоднородность сечения межсоединений в БИС и СБИС, а следовательно, повысить их надежность;

создание специализированных БИС и СБИС в диапазоне размеров 1,0—0,5 мкм также потребует субмикронной технологии;

применение субмикронной технологии при изготовлении БИС и СБИС с шириной линии до 1 мкм должно улучшить технико-экономические показатели изделий;

субмикронная технология будет необходима в конце концов и для развития устройств функциональной электроники.

Однако пока никакие усовершенствования технологий не в состоянии избавить нас от тирании межсоединений. Поиски новых путей обработки больших массивов информации с высокими скоростями становятся сегодня одной из важнейших задач информатики.

2. Переход к новым путям обработки информации ставит задачу использования и новых видов носителя информации. С нашей точки зрения, таким новым видом носителя информации могут быть динамические неоднородности.

Поскольку одновременно с увеличением объемов поступающей информации встает вопрос о повышении быстродействия, то, по мнению автора, здесь можно пойти только по пути параллельного «одномоментного» переноса и обработки. Даже при относительной медленности такого «одномоментного» процесса может быть достигнуто достаточно высокое быстродействие, так как этот процесс представляет собой случай «предельного распараллеливания».

В первую очередь этот принцип может быть применен при решении задач распознавания и понимания образов. Вряд ли можно себе представить искусственный интеллект без зрения, без параллельного ввода больших массивов информации. Кроме того, решение этой проблемы связано и с рядом конкретных проблем, например, в робототехнике.

Такой переход к параллельным методам обработки массивов информации и будет представлять собой об-

работку информации на уровне элементарных функций высшего порядка.

3. Переход к динамическим неоднородностям, как к основному носителю информации и к новым принципам обработки информации, представляет собой одно из новых направлений в микроэлектронике — функциональную электронику.

Возможно, что термин этот не очень удачен, хотя бы уже потому, что слово «функциональный» широко используется и не только в электронике. «Функциональные возможности», «функциональные узлы систем», «функциональные элементы схем» и т. п. не имеют прямого отношения к функциональной электронике.

Функциональная электроника представляет собой несхемотехническое направление в микроэлектронике, где носителем информации является не совокупность статических неоднородностей, образующих схемотехническую ячейку, выполняющую простейшие логические функции, а динамическая неоднородность.

Статические неоднородности могут и будут использоваться и в функциональной электронике, однако здесь их роль будет сводиться к функциям генерации, детектирования и продвижения динамических неоднородностей.

4. Устройства функциональной электроники будут представлять собой многослойные структуры. Ориентировочно такую структуру можно описать в следующем виде:

сенсорный слой, воспринимающий массив информации и преобразующий его в совокупность динамических неоднородностей;

активный слой, в который осуществляется «одномоментный» параллельный перенос массива информации для последующей обработки;

слой хранения «образа-эталона», с которым производится сравнение «образа-оригинала» для выделения подмассивов разностной информации;

слой выведения разностной информации, вероятнее всего в цифровой форме, на некоторое число каналов для последующей обработки традиционными последовательными методами с помощью БИС и СБИС.

Это, бесспорно, самая грубая и сугубо «прикидочная модель», но можно себе представить, что в этой модели будут использоваться такие эффекты, как ПАВ и

ПЗС, а также оптические методы переноса и обработки информации с применением поляризованных световых потоков. Такую модель можно принять лишь как отправную позицию для последующей проработки.

5. Отказ от жестких связей (межсоединений) в схемотехнической электронике и замена большого количества статических неоднородностей, создаваемых технологическими методами одной динамической неоднородностью, позволяют рассчитывать на:

определенное упрощение технологических процессов; снижение роли дефектов в исходных материалах (в частности, в тонких слоях, образующих структуру устройств функциональной электроники);

более гибкое управление динамическими неоднородностями, включая их коллективное взаимодействие и переход к самоорганизующимся системам динамических неоднородностей;

увеличение площади кристалла, с одной стороны, и более полное использование этой площади — с другой; переход к трехмерным системам микроэлектроники без проблемы совмещения ячеек в слоях и обеспечения соединений между ними;

возможность повышения устойчивости устройств функциональной электроники против внешних воздействий как за счет замены большого количества статических неоднородностей одной динамической, а также за счет отказа от многократных преобразований типа «потенциал — заряд — ток — потенциал» при передачах единицы информации от одной ячейки к другой.

Естественно, что все эти предположения носят характер гипотез и многое требует экспериментальной проверки и подтверждения. Предстоит большой объем работ как в области создания принципов обработки информации, так и в области технологии и метрологии.

В области технологии главной проблемой станет проблема гетероэпитаксии, т. е. получения (выращивания) тонких бездефектных пленок на других пленках, с другим составом и другой кристаллической или иной структурой. Важное значение при этом могут иметь характеристики границ раздела, являющиеся неидеальными гетеропереходами. Такие границы раздела будут представлять собой своеобразные мембраны между смежными активными слоями, сквозь которые будет

осуществляться взаимодействие динамических неоднородностей.

В области метрологии внимание ученых будет занимать создание методов исследования динамических неоднородностей: процессов их возникновения и уничтожения, достижения их наилучших электрофизических характеристик, характеристик их взаимодействия в одной среде и с динамическими неоднородностями другого вида через границу раздела.

6. Можно предположить, что функциональная электроника выйдет за пределы электроники твердого тела. Достаточно сказать, что в индикаторах на жидких кристаллах (ЖКИ) носителями информации являются именно динамические неоднородности.

Мишень видикона с ее потенциальным рельефом представляет собой не что иное, как континуальную среду с большим количеством динамических неоднородностей, несущих в себе как аналоговую, так и цифровую информацию. Именно такого типа слой мог бы быть использован в качестве сенсорного слоя в устройствах функциональной электроники, однако было бы желательно решить проблему «одномоментного» переноса информации вместо последовательного ее считывания электронным лучом.

Таким образом, круг технических средств, на основании которых могли бы решаться задачи функциональной электроники, достаточно широк. На сегодня в первую очередь необходимы идеи в области использования этих средств для обработки информации на уровне «элементарных функций высшего порядка».

Естественно, что можно задать вопрос: «А надо ли всем этим заниматься?». На этот вопрос может быть дан только один ответ: «Да, надо, если нет другого пути обойти те преграды, которые встают на пути дальнейшего развития микроэлектроники». Оставить эту проблему без внимания можно только в следующих случаях:

— если будет неопровержимо доказано, что проблемы «тирании межсоединений» не существует, что мы можем смело идти и дальше по проторенному пути к схемотехническим элементам с МТР в десятые, сотые и тысячные доли микрона. Пока есть все основания утверждать обратное, и практически нет никаких данных, опровергающих эту точку зрения;

— если будет предложен другой путь преодоления «тирании межсоединений», более технически обоснованный, имеющий конкретные решения и позволяющий обеспечить обработку больших массивов информации с достаточно высокими скоростями.

Нам другой такой путь неизвестен. Именно поэтому автор берет на себя смелость утверждать, что проблема развития функциональной электроники, электроники «несхемотехнической», электроники динамических неоднородностей, электроники «одномоментной» обработки больших массивов информации является сегодня одной из самых насущных проблем микроэлектроники, носящих сугубо поисковый характер.

Все, что было сказано выше о функциональной электронике, может быть распространено и на молекулярную электронику. Состояние молекулы как носителя информации в некоторой континуальной среде практически представляет собой динамическую неоднородность и не имеет принципиальных отличий от такого вида динамической неоднородности, как домены, т. е. совокупность группы молекул. Таким образом, молекулярная электроника в этом понимании может быть отнесена к функциональной, несхемотехнической электронике динамических неоднородностей. А это значит, что в молекулярной электронике мы столкнемся с теми же проблемами обработки информации, которые нам предстоит решать и в ходе развития функциональной электроники на пути поиска способов обработки больших массивов информации в реальном масштабе времени.

Литература

Федотов Я. А. Функциональная электроника — электроника четвертого поколения. — В кн.: Будущее науки. Международный ежегодник. — М.: Знание, — 1981. — С. 99—111.

Васенков А. А., Федотов Я. А. Интегральная электроника статических и динамических неоднородностей. — Электронная промышленность. — № 1(118). — С. 21—24. М.: ЦНИИ «Электроника», 1983.

Васенков А. А., Федотов Я. А. Функциональная электроника — основные направления работ. — Электронная промышленность. — № 8 (125). — С. 3—5. М.: ЦНИИ «Электроника», 1983.

Устройства вычислительной техники на элементах функциональной электроники

А. А. Ерофеев

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

В оптоэлектронных элементах ВТ используется когерентная и некогерентная (частично когерентная) обработка информации. Носителем информации является оптический сигнал (ОС); элементарный носитель информации световой квант или фотон (масса покоя его примерно равна нулю). Фотоны имеют скорость $c = 3 \cdot 10^8$ м/с и практически не взаимодействуют друг с другом (в отличие от электронов, скорость которых из-за их взаимодействия примерно $6 \cdot 10^5$ м/с, т. е. в 1000 раз меньше). Оптоэлектронные элементы ВТ характеризуются высоким быстродействием (частота $3 \cdot 10^{12}$ — $3 \cdot 10^{15}$ Гц), работой в реальном времени, высоким параллелизмом оптических преобразований.

Физические основы работы оптоэлектронных элементов ВТ базируются на использовании ряда эффектов, к главным из которых следует отнести эффект оптической упругости или акустооптическое взаимодействие, электрооптические эффекты (Поккельса, Керра), магнитооптический эффект Фарадея. Суть акустооптического эффекта заключается в изменении показателя преломления рабочей среды при деформациях, вызванных механическим воздействием, например, с помощью упругих акустических (ультразвуковых) волн. При этом ОС, проходящий через среду, испытывает преломление ($b/\lambda \ll 1$) или дифракцию ($b/\lambda \gg 1$); здесь b — ширина проходящего луча, λ — длина волны колебаний.

Изменение показателя преломления среды под действием приложенного электрического поля E составляет суть электрооптического эффекта. Различают линейный (Поккельса) и квадратичный (Керра) электрооптические эффекты. Для линейного $\Delta n_{ij} \approx r_{ijk} E_k$, где Δn_{ij} — приращения коэффициентов преломления (тензор второго ранга), r_{ijk} — электрооптические коэффициенты (полярный тензор третьего ранга). В свою очередь, в соответствии с взаимной ориентацией направлений луча z и напряженности поля E выделяют продольный ($z \parallel E$) и поперечный ($z \perp E$) эффекты Поккельса. Для квадратичного эффекта: $\Delta n_{ij} \approx R_{ijk} \cdot E_k E_l \approx R_{ijkl} E^2$, где R_{ijkl} — коэффициенты (тензор четвертого ранга).

Суть магнитооптического эффекта заключается во вращении плоскости поляризации ОС, проходящего через среду, помещенную в магнитном поле.

Элементную базу оптоэлектронных устройств ВТ составляют светоизлучатели (лазеры и светодиоды), приборы для управления излучением (модуляторы, дефлекторы и др.), фотоприемники (элементарные и матричные), оптические бистабильные элементы (оптические вентили), оптроны (оптопары, оптоэлектронные микросхемы), различные оптические элементы (объективы, зеркала, светоделители и т. п.), носители информации (регистрирующие среды), индикаторы и индикаторные панели, оптические каналы связи и среды для передачи ОС, интегрально-оптические схемы и т. д.

На базе этих элементов строят оптические и оптоэлектронные процессоры, оптоэлектронные гибридные вычислительные системы обработки информации, оптические и оптико-электронные системы обработки изображений, распознавания образов, искусственного интеллекта, устройства голографической и оптической памяти и др.

Рассмотрим кратко принципы действия и особенности работы основных элементов оптоэлектронного типа в устройствах ВТ.

Светоизлучатели. В настоящее время в оптических устройствах в основном используют лазеры трех типов: газовые атомные (гелий-неоновые) и ионные, твердотельные (рубиновые, АИГ-лазеры) и полупроводниковые. С помощью лазеров создают когерентные во времени и в пространстве коротковолновые излучения с $\lambda = 0,3 - 1,5$ мкм.

Высокую степень когерентности и долгий срок службы имеют маломощные газовые лазеры. Большую мощность излучения в сочетании с высокой направленностью создают твердотельные лазеры. Однако твердотельные лазеры отличаются нестабильностью излучения, малым сроком службы.

Полупроводниковые лазеры (мощностью до 5 мВт и с КПД 10—50%) перспективны во многих отношениях: они малогабаритны, на их основе методами интегральной технологии можно создать матрицы лазеров. Однако им присущи относительно низкие параметры когерентности излучения: из-за высокой плотности активного вещества и малой длины резонатора расходимость излучения до 100—500 мрад. Срок их службы составляет до 10^4 ч и непрерывно повышается. Из полупроводниковых лазеров следует отметить инжекционные на арсениде галлия с $\lambda \approx 0,7—1,5$ мкм, работающие как в импульсном, так и в непрерывном режимах, с временем установления режима генерации $\leq 10^{-9}$ с. Применение матриц инжекционных лазеров улучшает массо-габаритные показатели и упрощает устройства ВТ; отпадает необходимость в использовании дорогостоящих элементов для управления лучом (дефлекторов). Первые линейки матриц были созданы в 1976 г. для оптических интегральных схем; в настоящее время время разработаны двухмерные лазерные матрицы. Интегральные линейные матрицы имеют индивидуальную коммутацию лазерных диодов, выпускают матрицы и без таковой. Первые в основном предназначены для параллельной передачи информации, а вторые — для получения лазерного излучения повышенной мощности. Однако задача долговременной работы всех лазерных диодов в матрице пока удовлетворительно не решена.

Устройства для управления излучением. Дефлекторы изменяют по заданному закону пространственное положение лазерного луча и работают на основе электро-, акусто- и магнитооптических явлений. Наибольшее применение имеют электрооптические (одно- и двухкоординатные) и акустооптические дефлекторы. Например, в каскадной схеме электрооптического дефлектора дискретного типа каждый каскад состоит из оптического модулятора поляризации и двулучепреломляющего кристалла (рис. 1). Модулятор обеспечивает плавное изменение поляризации излучения (по заданному зако-

ну); в двулучепреломляющем кристалле излучение раздваивается (и так в каждом каскаде). В таком дефлекторе число дискретных положений луча в пространстве равно 2^i , где i — число каскадов.

Акустооптический дефлектор (рис. 2) содержит активную среду 1, пьезоэлектрический преобразователь (возбудитель) 2, акустический поглотитель 3. Пьезоэлектрический преобразователь возбуждает акустическую волну (например, синусоидальную), и в активной среде возникают периодические пространственные изменения показателя преломления, соответствующие фазовой решетке 4 волны, т. е. областям сжатия и разрежения.

Оптический луч, поступающий, например, через призмные элементы 5, дифрагирует на решетке, т. е. изменяет свое положение в пространстве. Период изменения показателя преломления в возбужденной дифракционной решетке равен длине акустической волны и зависит от свойств активной среды. Изменяя частоту акустических колебаний, производят перестройку периода дифракционной решетки и управляют тем самым положением луча в пространстве.

Для ввода информации в ОС служат **модуляторы** излучения. Модуляция ОС может осуществляться по амплитуде, частоте, фазе, направлению вектора поляризации или по определенной совокупности этих параметров.

Оптоэлектронные модуляторы представляют собой модуляторы интенсивности, так как современные фотоприемники реагируют только на интенсивность. Для создания модуляторов используют магнитооптический

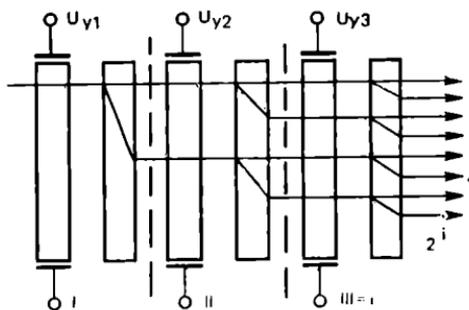


Рис. 1

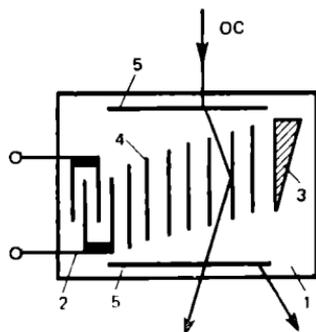


Рис. 2

эффект Фарадея (на ферритгранате, трехбромистом хrome); быстродействие их примерно 10^4 Гц. Однако наибольшее распространение получили электрооптические модуляторы, работающие на поперечном эффекте Показеляса, а также акустооптические модуляторы, обеспечивающие полосу пропускания на уровне $\geq 10^9$ Гц.

Вводимая в модулятор информация непосредственно (или после преобразования в радиосигнал) используется, например, для возбуждения акустической волны в активной среде акустооптического модулятора (АОМ). Длина оптической апертуры в таком модуляторе позволяет разместить в нем сигнал определенной длительности. Частотное разрешение АОМ $\Delta f \approx (1,1 - 1,5) v/D$, где v — скорость звука, D — длина звукопровода. Дифракция светового луча создает на выходной апертуре модулированный ОС (см. рис. 2 и 3).

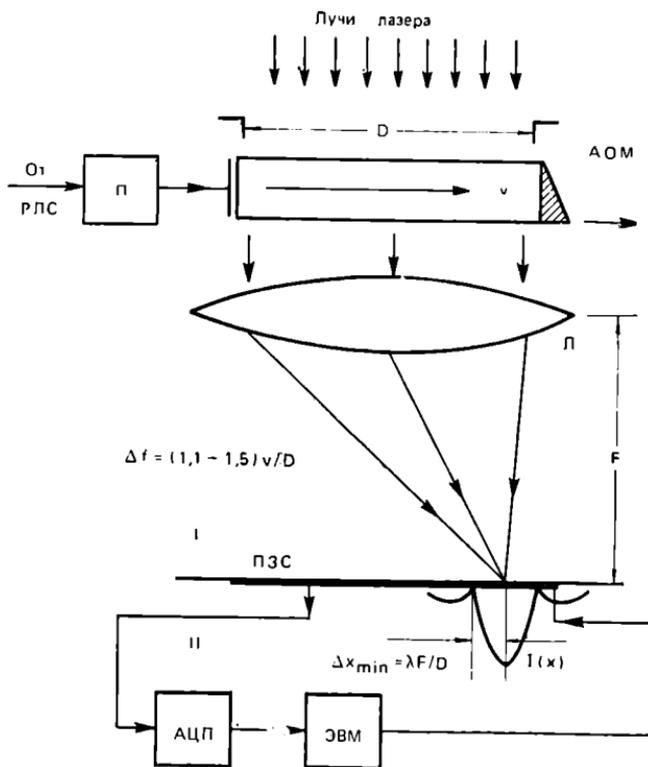


Рис. 3

Электрооптические модуляторы обеспечивают быстрый параллельный ввод больших массивов информации, что важно для эффективной работы оптических процессоров.

Оптоэлектронные модуляторы и дефлекторы используют одни и те же материалы (например, ниобат лития LiNbO_3 , пьезокерамику ЦТСЛ, парателлурит и др.), могут быть выполнены в объемном и плоском (интегральном) исполнении.

Пространственно-временные модуляторы света (ПВМС), или управляемые транспаранты. Принцип их действия также базируется на электро-, акусто- и магнитооптических эффектах. В основе их работы лежит изменение оптических свойств участков модулирующей рабочей среды ПВМС при воздействии на нее электрических или оптических сигналов (соответственно электроуправляемые или оптически управляемые транспаранты). ПВМС могут производить дискретную или аналоговую модуляцию выходного ОС, что соответствует преобразованию двумерных массивов цифровой или аналоговой информации. Модуляторы «сигнал-свет» (электроуправляемые) и «свет-свет» (оптически-управляемые) в соответствии с видом пространственной модуляции светового поля бывают амплитудные, фазовые или модулирующие поляризацию. Запись и считывание информации в ПВМС могут быть последовательные или параллельные (считывание обычно параллельное).

Большинство ПВМС упрощенно представляют собой многослойную структуру типа конденсатора (рис. 4), между прозрачными электродами которого размещается фотопроводник (ФП) и модулирующая среда (МС).

На слое фотопроводника формируется изображение объекта. Сопротивление фотопроводника соответствует пространственному распределению интенсивности света в изображении (изображение может формироваться некогерентным светом). В модулирующей среде используются такие оптические свойства, как поглощение, изменение показателя преломления, коэффициентов отражения, рассеивания и т. д. Модулирующую среду выполняют на электрооптических кристаллах, жидких кристаллах, термопластиках, полупроводниковых структурах, магнитооптических средах, ЦТСЛ — пьезокерамике и др. Записанная в ПВМС информация считывается когерентным светом. Стирание информации (полное или

селективное) достигается засвечиванием фотопроводника.

Фотоприемные полупроводниковые матрицы преобразуют ОС в электрические и выдают их, например, в интерфейс ЭВМ. Каждый элемент фотоматрицы (фотоприемник) функционирует как пороговый детектор, указывающий (в соответствующей ее позиции) наличие или отсутствие ОС. Элементы фотоматрицы должны обладать низкой пороговой мощностью детектирования при высоком быстродействии и допускать параллельное считывание всех разрядов произвольного слова (несколько слов). Плотность упаковки элементов достигает примерно $10^3/\text{см}^2$, что обеспечивается методами интегральной технологии. Находят применение фотодиодные матрицы (с *p-i-n* фотодиодами и МОП-транзисторами *p*-типа для коммутации фотодиодов), фотоматрицы с накоплением заряда, фототранзисторные матрицы и др.; частота сканирования достигает 40 МГц. Ведется разработка матриц высокоскоростных оптических логических вентилях, обеспечивающих повышенную энергетическую эффективность.

Носители информации служат для регистрации и хранения данных, представленных в объемной или пло-

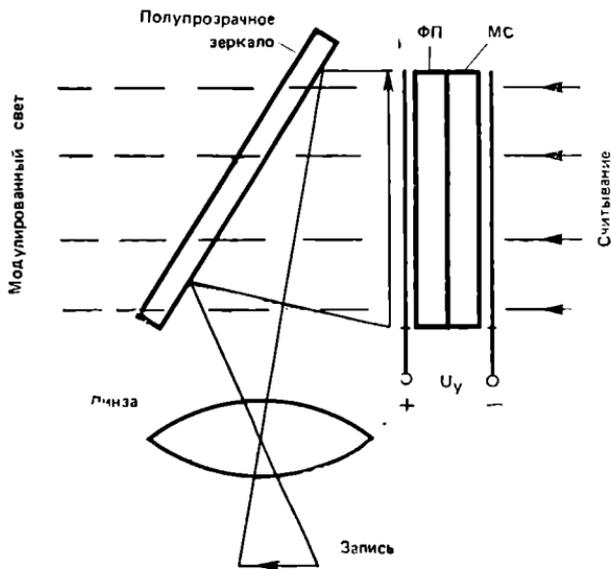


Рис. 4

ской голографической форме. Это различные материалы и устройства, чувствительные к интенсивности света и изменяющие оптические свойства в соответствии с пространственным распределением интенсивности. Если в материале изменяется амплитудное пропускание, образуется амплитудная голограмма; если изменяется показатель преломления или рельеф поверхности, образуется фазовая голограмма. При изменении поляризации получают поляризационные голограммы (магнитные голограммы, получаемые термомагнитным способом на тонких магнитооптических пластинках).

Необратимые регистрирующие материалы (например, фотоматериалы) используются в постоянных голографических запоминающих устройствах (ГЗУ); в оперативных ГЗУ применяют обратимые (реверсивные) материалы. К их числу относят электрооптические кристаллы, термопластические и фотохромные материалы, магнитооптические пленки, халькогенидные стеклообразные полупроводники и др.

Оптоэлектронные и оптические процессоры. Оптоэлектронные и оптические процессоры увеличивают быстродействие, объем памяти и расширяют в целом возможности вычислительной техники за счет широкого применения параллелизма, эффективной развязки между каналами, использования картинной логики, хранения дискретного или аналогового сигнала в голографическом виде и их обработки на одних и тех же элементах и т. д. Из оптоэлектронных процессоров три их типа: табличные процессоры, процессоры в системе остаточных классов (непозиционная система счисления) и процессоры на базе пространственных модуляторов когерентного излучения — достаточно отработаны. В оптическом исполнении разработаны разнообразные типы процессоров: систолические, конвейерные, волновые и т. д. Например, обработка данных в волновых самосинхронизирующихся процессорах осуществляется на основе дискретного аналога принципа Гюйенса — Френеля для процесса распространения волнового фронта.

На системном уровне оптические вычислительные машины (ОВМ) значительно отличаются от ЭВМ. Однако отсутствие в настоящее время достаточно эффективных реверсивных носителей информации, ПВМС, логических средств и оперативных устройств ввода-вывода

данных приводит к необходимости реализации гибридных оптоэлектронных вычислительных машин, в которых оптический процессор осуществляет основные операции по параллельной обработке двумерного потока данных и сжатию информации.

ОВМ с двумерной параллельной обработкой информации на современной элементной базе обрабатывают информационный поток на уровне до 10^8 бит/с и в перспективе до 10^{11} бит/с. ОВМ, реализуемые на идеях систолической и волновой обработки информации, способны обработать поток информации со скоростью до 10^{12} бит/с.

В перспективе ОВМ должны обеспечивать производительность до 10^{15} оп/с или обрабатываемый информационный поток до 10^{15} бит/с. Элементная база таких ЭВМ еще только проходит стадию экспериментальных исследований: это полупроводниковые сверхрешетки, модулирующие оптический сигнал с частотой 10^{10} Гц, лазеры с полосой пропускания до 0,1 ТГц, фотоматрицы с быстродействием 10—100 пс, ЗУ с тактовой частотой 10—100 ГГц и объемом памяти до 1 Мбайт.

АКУСТОЭЛЕКТРОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Акустоэлектронная элементная база на поверхностных акустических волнах (ПАВ) включает в себя различные одно- и многофункциональные устройства обработки сигналов. Из них для ВТ представляют интерес разнообразные процессоры (фононные, акустические, Фурье-процессоры), многофункциональные устройства адаптивной и корреляционной обработки сигналов, акустоэлектронные ЗУ, мультиплексоры и т. д.

Для возбуждения и преобразования ПАВ (динамической неоднородности) обычно используются встречно-штырьевые преобразователи (ВШП); в качестве среды распространения ПАВ (континуальной среды) применяются пьезоэлектрические диэлектрики, полупроводники, слоистые структуры. Для построения акустоэлектронных устройств используются линейные и нелинейные свойства в основном пьезоэлектрической среды, позволяющие осуществить большое число операций над сиг-

налами на основе распространения и взаимодействия волн, электрических и оптических сигналов. Преобразователь на ПАВ позволяет синтезировать любую форму АЧХ выбором соответствующей функции перекрытия электродов (аподизация).

Коротко рассмотрим особенности работы акусто-электронных устройств ВТ.

Частотные мультиплексоры представляют собой устройства, например, в виде многополоскового ответвителя (МПО) со смещенными на расстояние a полосками, способные выделять полосы частот, разделенные на $\delta f \approx 0,5v/a = 0,5/\tau$, где v — скорость ПАВ, τ — время задержки. На этой основе разработан восьмиканальный мультиплексор в диапазоне частот 190—232 МГц с интервалами между каналами 6 МГц. Используя МПО как отражательную решетку с периодом штырьевых электродов a можно создать другой тип частотного мультиплексора, допускающий наличие, например, 15 выходных каналов (при центральной частоте 150 МГц и 450 полосках).

Устройства корреляционной обработки сигналов на ПАВ для определения функции взаимной корреляции сигналов (конвольверы, корреляторы) могут быть реализованы с помощью, например, конвольверов — двух устройств свертки, работающих соответственно в режиме временного сжатия сигнала и в режиме акустической корреляции. Устройство свертки, например, в простейшем виде представляет собой звукопровод 1 , на краях которого расположены ВШП 2 , а в центре размещен выходной параметрический электрод 3 (рис. 5). Входные сигналы подаются на ВШП 2 и возбуждают в звукопроводе 1 встречные акустические волны, нелинейное взаимодействие которых приводит к образова-

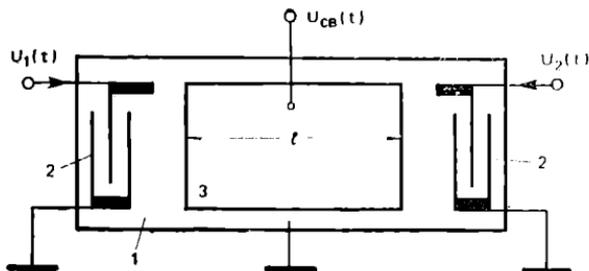


Рис. 5

нию на параметрическом электроде (интеграторе) напряжения свертки (например, сверткой двух прямоугольных импульсов является треугольный импульс). При работе такого устройства свертки в режиме акустической корреляции один из сигналов создает акустическую волну, а второй — электрическое поле на параметрическом электроде. В конвольверах используется пространственное интегрирование сигналов, в корреляторах — временное интегрирование. Перспективными устройствами для программируемой обработки сигналов являются корреляторы с акустоэлектронным запоминающим устройством.

Устройства адаптивной обработки сигналов на ПАВ широко применяются в фильтрации сигналов (адаптивные или перестраиваемые фильтры). Фильтры выполняются с дискретной или непрерывной перестройкой параметров; эффективной реализацией является использование в них акустоэлектронных ЗУ.

Фононные процессоры используют явление фоновго (электроакустического) эха и обеспечивают также возможность корреляционной обработки сигналов, например, на основе сжатия линейно-частотно-модулированных (ЛЧМ) и фазо-кодо-манипулированных (ФКМ) сигналов. При этом могут применяться эффекты двухили трехимпульсного эха и соответствующая методика обработки сигналов. Подробнее об этом рассказано в брошюре издательства «Знание» «Эхо-процессоры» В. С. Барсукова (1987, № 3).

Акустические (акустооптические) процессоры используют акустооптический ввод информации на основе одного или нескольких акустооптических модуляторов, образующих подсистему обработки электрических сигналов I (корреляция, спектральный анализ и т. д.). Цифровая подсистема обработки данных II обеспечивает непосредственно обработку информации (см. рис. 3). В первой подсистеме акустическое взаимодействие используется для уменьшения скорости поступления данных; данные во вторую подсистему поступают обычно с многоэлементных ПЗС-фотоприемников. Различают процессоры с временным и пространственным интегрированием, работающие в режиме реального времени. Процессоры с пространственным интегрированием используют входные двумерные управляемые транспаранты с числом разрешимых элементов в двумерной

апертуре (в одном кадре) до 10^8 . Для расширения полосы частот записываемого входного сигнала в лазерном сканирующем устройстве используют одиночные акустооптические модуляторы.

Для решения задач спектральной обработки сигналов и распознавания образов применяются **акустоэлектронные Фурье-процессоры (ФП)** на ПАВ, выполняющие комплексное преобразование Фурье, которые подразделяют на процессоры параллельного действия, интерференционные, на основе алгоритма ЛЧМ-преобразования, комбинированные. В ФП параллельного действия с N параллельными каналами используются блоки частотных фильтров, например трансверсальных фильтров на ПАВ, содержащих входные ВШП с минимальным числом электродов, а выходные ВШП — с максимальным (система частотной селекции). В этих фильтрах огибающая импульсной характеристики имеет трапецеидальную (квазипрямоугольную) форму и определяется как функция свертки импульсных характеристик входного и выходного ВШП. Такая форма характеристик обеспечивает одновременно максимальный динамический диапазон при заданном частотном разрешении. В качестве примера можно отметить ФП с 24 каналами частотной селекции при полосе обзора 24—36 МГц, разрешающей способности 0,5 МГц, динамическом диапазоне 30 дБ и длительности исследуемых реализаций 0,1—1 мкс.

Интерференционные ФП представляют собой узкополосные устройства, измеряющие комплексный спектр сигналов с высоким разрешением в реальном масштабе времени, и базируются, например, на использовании алгоритма дискретного преобразования Фурье. В интерференционном ФП основным устройством является рециркулятор, включающий в себя сумматор, линии задержки на ПАВ, усилители-компенсаторы потерь в линиях задержки, сдвигающие устройства по частоте, фильтры для выделения одной боковой полосы. Узкополосный входной сигнал $S(t) = U(t) \cos[\omega_0 t + \varphi(t)]$ в ФП подвергается обработке так, что при больших значениях N -циркуляций огибающая и фаза отклика [на сигнал $S(t)$] выходного колебания соответствуют амплитудно- и фазочастотному спектрам входного сигнала. Число N -циркуляций здесь эквивалентно числу каналов частотной селекции, достигающих в ФП до нескольких сотен.

В ФП, использующих алгоритм ЛЧМ-преобразования, огибающая и фаза выходного сигнала также соответствуют амплитудно- и фазочастотному спектрам входного сигнала.

Большей эффективностью в смысле метрологических характеристик обладают комбинированные ФП с увеличенной длительностью запоминаемой реализации сигнала или с расширенным диапазоном одновременно исследуемых частот.

Рассмотренные аналоговые процессоры обеспечивают обработку сигналов без потерь информации и входят в состав современных систем радиолокации, связи и управления.

Акустоэлектронные запоминающие устройства составляют особый класс нелинейных устройств на ПАВ с запоминанием и хранением информации в аналоговом или цифровом виде. Например, акустоэлектронные ЗУ на основе структуры LiNbO_3 — матрица диодов Шотки или ЗУ на поверхностных электронных состояниях полупроводника. Акустоэлектронные ЗУ обычно одновременно осуществляют определенную, например, корреляционно-фильтрационную обработку информации.

ПЬЕЗОЭЛЕКТРОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА ВТ

Пьезо- и сегнетоматериалы, элементы на их основе находят широкое применение в оптоэлектронных устройствах ВТ. В частности, в электрооптических и акустооптических дефлекторах, модуляторах, ПВМС, носителях информации и др. используются явления и эффекты активной пьезоэлектрической среды. Эффекты пьезосреды лежат в основе работы разнообразных акустоэлектронных устройств. Пьезоэлектронные элементы и устройства используют акустические волны в твердых телах (объемные, ПАВ), различные виды деформаций и другие явления.

В основе работы различных пьезоэлектронных устройств лежит взаимосвязь явлений электромагнитного поля в пьезоэлектрической области и акустических колебаний (связанные акустоэлектромагнитные колебания), преобразование электрического сигнала в упругие волны механической деформации (поле E возбуждает акустическую волну) и обратное преобразование

деформации в электрический сигнал. В активной пьезоэлектрической однородной или неоднородной (с использованием свойств других материалов) вычислительной среде (ПВС) в качестве динамических носителей информации выступают акустическая волна и механические деформации, передающие и распространяющие информацию в среде. Пьезоэлектронные элементы ВТ могут работать в нерезонансном и резонансном режимах и строятся на основе элементов типа пьезотрансформаторов как преобразователей информации с акустическим каналом информации. При этом в общем случае можно использовать объемные бегущие и стоячие акустические волны и ПАВ, взаимодействие которых в объеме ПВС (линейное и нелинейное) создает на выходах ПВС преобразованные сигналы в аналоговой форме. Возбуждаемые в объеме ПВС волны однозначно связаны с сигналами на входах среды. При этом на ПВС могут воздействовать сигналы постоянного и переменного тока, осуществляются управляемая поляризация и деполяризация (статический носитель информации), а также механические и оптические сигналы. На основе ПВС можно реализовать различные операции: суммирование, временную задержку, умножение и деление частот, разнообразную модуляцию и логическую обработку сигналов, демодуляцию, смешение и преобразо-

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ БИБЛИОТЕЧКИ

Издательство «Знание» с января 1988 года начинает выпуск брошюр новой подписной научно-популярной серии

Вычислительная техника и ее применение

Брошюры этой серии будут распространяться только по подписке. Оформить годовую подписку можно будет осенью этого года в любом почтовом отделении. Цена годового комплекта брошюр — 1 руб. 80 коп. Индекс по Каталогу советских газет и журналов (раздел «Центральные журналы», рубрика «Брошюры издательства «Знание») — 70195.

вание частот, фильтрацию сигналов и т. д. При этом возможна «конструктивная» организация разнообразного функционального взаимодействия n выходных и m входных сигналов за счет топологии электродов и формы исполнения элемента с ПВС. Например, электроды могут иметь вид точки, линии, ВШП с анодизацией и без нее, фигуры. Форма и размещение (ориентация) электродов на поверхности ПВС и их число могут быть весьма разнообразными.

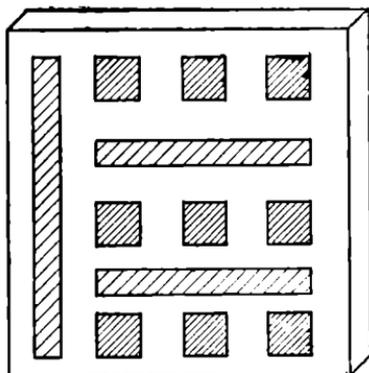
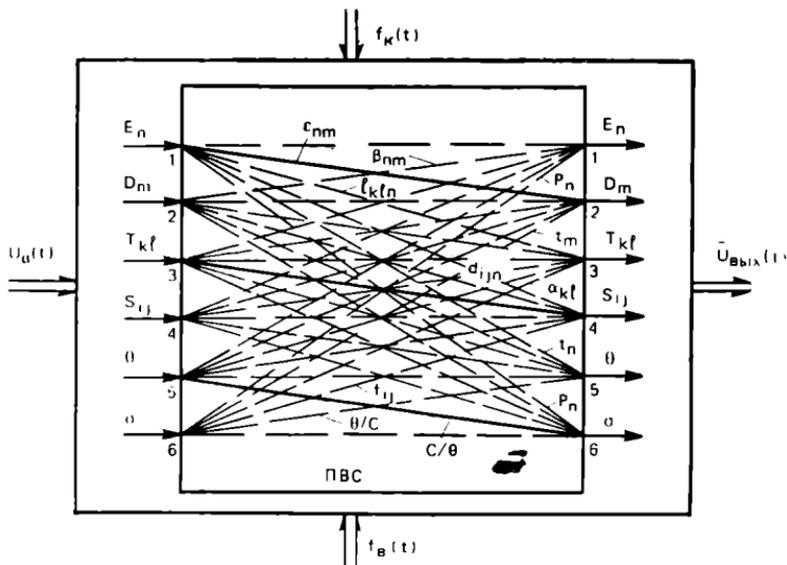


Рис. 6

Наибольшее распространение получили схемы ПВС с параллельно- и ортогонально взаимодействующими электродами прямоугольной формы (рис. 6). В зависимости от формы исполнения элемента (пластина, диск, цилиндр, сложная фигура и т. п.) потоки информации в ПВС могут носить замкнутый (локально или глобально) или разомкнутый характер. Форма исполнения элемента, его ориентация, площадь, размещение и соединение электродов на нем широко варьируются, что в значительной степени определяет функции преобразования и параметры выходных сигналов. Съем информации с ПВС может производиться в форме амплитудного, частотного или фазового представления информации.

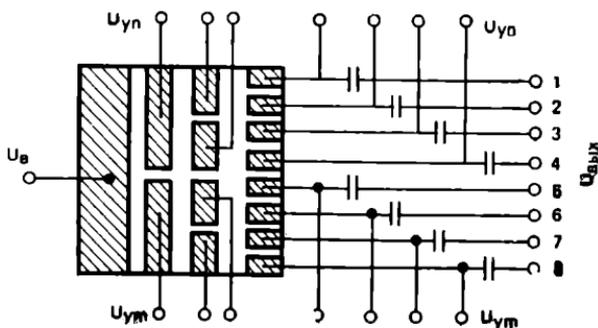
Обобщенная схема вычислительного устройства на базе ПВС представлена на рис. 7, входные и выходные сигналы в нем связаны с внешними устройствами через преобразователи соответственно входной и выходной информации (если это необходимо).

На ПВС в настоящее время реализован целый ряд разнообразных вычислительных устройств, из которых, в частности, можно отметить универсальные и специализированные аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи, суммирующие и вычитающие устройства, реверсивные счетчики и регистры, функциональные преобразователи, дешифраторы и др. В качестве примера на рис. 8 представлена конструкция дешифраторной матрицы на восемь выходов. Здесь предвари-



Р и с. 7

тельно поляризована только входящая секция (возбудитель), остальные секции не поляризованы, и подачей постоянных поляризующих сигналов обеспечивается выбор пути прохождения сигнала (его дешифрация по одному из восьми выходов).



Р и с. 8

На основе ПВС реализован класс различных репрограммируемых ЗУ, в том числе с линейной и матричной выборкой, многоуровневых с N-дискретными уровнями (с организацией многозначной логики), с координатно-

временным способом записи и считывания информации и др.¹.

КРИОЭЛЕКТРОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА ВТ

Интегральная криогенная микроэлектроника базируется на использовании эффектов в сверхпроводниках (СП) и других материалах, включая полупроводники (П), проявляющихся при криогенных температурах (ниже 80 К). В частности, криоэлектронные микросхемы на основе пленочных сверхпроводников оптимально работоспособны в области гелиевой зоны температур (около 4 К). Сверхпроводниковая криоэлектроника базируется на использовании контактов — криотронов типа супердиодов Шотки, контактов Джозефсона и др. Они представляют собой в основном туннельные структуры, например, типа СП-П, СП-П-СП, СП-диэлектрик (Д)-СП, металл (М)-Д-СП, СП1-Д-СП2 и т. п.

Криоэлектронные элементы характеризуются высоким быстродействием (10—0,1 пс), высокой плотностью интеграции (до 10⁵/см²), малой рассеиваемой мощностью (доли микроватт на вентиль), низким уровнем тепловых шумов.

В настоящее время разработаны и испытаны различные логические элементы, сумматоры, сдвиговые регистры, АЦП, ЗУ, процессоры ЭВМ и другие компоненты на сквидах (сквид — сверхпроводниковое кольцо на двух и более контактах Джозефсона). Скорость обработки информационного потока в гипотетической крио-ЭВМ в режиме реального времени может достигать 10¹¹ оп/с.

Недостатки криоэлектроники связаны с использованием сверхнизких температур, что значительно ограничивает области ее применения в основном уникальной аппаратурой.

ХИМОТРОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА ВТ

Химотроника базируется на молекулярной электронике. Носителями тока здесь выступают малоподвижные ионы в растворах, поэтому химотронные элементы

¹ ЗУ здесь не рассматриваются.

принципиально низкочастотные. Однако многофункциональность, связанная с возможностью перестройки внутренней структуры, устойчивость в работе и надежность определяют области применения химотронных устройств как биопреобразователей информации, устройств визуальной индикации и хранения информации, узлов различных самонастраивающихся и самообучающихся систем и т. д. В частности, они широко применимы в качестве элементов систем оптической обработки информации: это пассивные электрохимические индикаторы, дефлекторы, оптически и электрически управляемые транспаранты, диафрагмы и т. п.

БИОТРОНИКА. БИМОЛЕКУЛЯРНЫЕ ЭВМ

Создание биомолекулярных микросхем (биочипов), функционирующих на молекулярном уровне, с числом элементов свыше 10^{15} с высоким быстродействием и малыми габаритами составляет основную цель биотроники. Биомикросхемы строят на базе органических и неорганических веществ, при этом технология их позволяет устранить проблемы межсоединений, перегрева, экономии энергии.

Существуют проекты создания к 2000 году на основе биомикросхем ЭВМ в виде трехмерных многослойных структур с плотностью до 10^{15} эл/см³ и ЗУ на органических молекулах. Предполагается, что можно достичь в био-ЭВМ скорости вычислений 10^{12} оп/с. При этом предлагаются различные структуры био-ЭВМ, в частности, перспективной считается ЭВМ с матричным параллельным вводом информации в молекулярный процессор в единой сборке с молекулярной памятью и оптическим вводом и выводом информации. Усилия многих фирм в настоящее время сосредоточены на разработке технологии создания разнообразных цифровых и аналоговых биомикросхем, в том числе имитирующих структуру мозга человека, с использованием различных материалов: белков, небелковых полимеров, полупроводников и т. д. Ожидается появление первых биомикросхем в ближайшие 5—10 лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В когерентных оптических процессорах результирующий сигнал от интерферирующих световых электромагнитных волн зависит от степени когерентности и глубины модуляции ОС. При реализации процессоров на объемных дискретных элементах обеспечить их долговременную температурную и механическую стабильность (и стабильность, например, фазовых соотношений ОС на уровне $\Delta\varphi \leq 0,6^\circ$, что соответствует динамическому диапазону примерно в 40 дБ) чрезвычайно трудно. Следовательно, уменьшается точность обработки информации, динамический диапазон обычно не превышает 20—30 дБ, что ограничивает области применения таких процессоров. Например, перспективным представляется их использование в виде акустооптических анализаторов спектра радиосигналов (такой спектрометр нашел применение для отечественного радиотелескопа РАТАН-600). Интегрально-оптические процессоры имеют уменьшенные массогабаритные показатели и более высокую долговременную стабильность. Однако они отличаются низким частотным разрешением (сотни мегагерц); затруднена реализация двумерных систем с параллельной обработкой в пространственно-многоканальных системах с матричными ПЗС-фотоприемниками.

Улучшить стабильность работы процессоров введением оптических отрицательных обратных связей возможно, но практически затруднено из-за сложности их организации при высокой параллельности в обработке информации. Использование оптических процессоров (в том числе частично когерентных или некогерентных) с матрицами-светоизлучателями и матрицами фотоприемников также имеет существенные ограничения. Большие перспективы связывают с разработкой процессоров на базе оптоэлектронных логических элементов, но и здесь просматриваются ограничения по быстродействию.

Необходимо отметить, что в целом реальное быстродействие оптоэлектронных процессоров определяется их электронной частью. Несмотря на высокое быстродействие эффектов рекомбинации и генерации носителей, полное быстродействие определяется обычными процессами инжекции, накопления и релаксации заряда в полу-

проводниковых структурах (полупроводниковые излучатели, фотоприемники, цифровые устройства и т. д.).

Разработка нелинейных оптических элементов, например, изменяющих параметры в зависимости от амплитуды световой волны, на электрооптических материалах имеет свои трудности и ограничения либо из-за слабой нелинейности последних (требуются мощные световые потоки и большие длины взаимодействия), либо они не обладают требуемым быстродействием.

В последние годы интенсивно разрабатывается направление по созданию искусственных материалов с заранее заданными свойствами (на основе молекулярной электроники, нанотехнологии, атомной эпитаксии). При этом формируют пространственные структуры из атомов, размеры которых соизмеримы с длиной волны электрона в твердом теле (сверхрешетки, квантоворазмерные структуры). Повышение быстродействия здесь (не менее чем на 1—2 порядка) обеспечивается за счет использования процессов туннелирования и резкого сокращения размеров элементов ($\tau \approx 10^{-13} - 10^{-15}$ с). При этом туннельные явления реализуют в структурах типа металл-диэлектрик-металл при размерах элементов на уровне десятков нанометров. Данная элементная база в виде квантовых интегральных микросхем охватывает полосу частот радио, СВЧ и оптического диапазонов и является перспективной для создания ЭВМ.

Литература

Джагунов Р. Г., Ерофеев А. А. Пьезокерамические элементы в приборостроении и автоматике. — Л.: Машиностроение, 1986.

Ерофеев А. А. Пьезоэлектронные устройства автоматике. — Л.: Машиностроение, 1982.

Нелинейные акустоэлектронные устройства и их применение / Под ред. В. С. Бондаренко. — М.: Радио и связь, 1985.

Хоружий В. А. и др. Акустоэлектроника. — Киев: Техшка, 1984.

Акаев А. А., Майоров С. А. Когерентные оптические вычислительные машины. — Л.: Машиностроение, 1977.

Майоров С. А., Очин Е. Ф., Романов Ю. Ф. Оптические аналоговые вычислительные машины. — Л.: Энергоатомиздат, 1983.

Поверхностные акустические волны / Под ред. А. Олинера. — М.: Мир, 1981.

Захаров И. С. Пространственно-временные модуляторы света. — Томск: ТГУ, 1983.

Андрушко Л. М., Гроднев И. И., Панфилов И. П. Волоконно-оптические линии связи. — М.: Радио и связь, 1984.

Аксененко М. Д., Бараночников М. Л., Смолин О. В. Микроэлектронные фотоприемные устройства. — М.: Энергоатомиздат, 1984.

Федотов Я. А., Старостин В. В., Шuka А. А. Электроника четвертого поколения. — М.: Знание, 1985.

Речицкий В. И. Радиокomпоненты на ПАВ. — М.: Радио и связь, 1984.

БалакшиЙ В. П. и др. Физические основы акустооптики. — М.: Радио и связь, 1985.

Интегральные пьезоэлектрические устройства фильтрации и обработки сигналов. — М.: Радио и связь, 1985.

Хансерджер Р. Интегральная оптика. — М.: Мир, 1985.

Оптическая связь / Пер. с яп. — М.: Радио и связь, 1984.

Казане А. Оптика и связь: Оптическая передача и обработка информации. — М.: Мир, 1984.

Дж. Симонс. ЭВМ пятого поколения: компьютеры 90-х годов. — М.: Финансы и статистика, 1985.

Алфеев В. Н. и др. Интегральные схемы и микроэлектронные устройства на сверхпроводниках. — М.: Радио и связь, 1985.

Биомолекулярная электроника — перспективное направление микроэлектроники. — Радиоэлектроника за рубежом, вып. 12, 1984.

Ломанович В. А. и др. Химотронные приборы. — М., Энергия, 1968.

Барсуков В. С. Эхо-процессоры. — М.: Знание, 1986.

ОТКРЫТИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ. Научный обозреватель английской газеты Daily telegraph А. Берри заметил по поводу создания суперкомпьютеров: «Их физическую основу будут составлять джозефсоновские переходы. Появятся аппараты, которые сейчас кажутся принадлежащими к миру фантастики». Последние известия периодической печати передвигают эти далекие прогнозы из мира фантастики в область планирования таких разработок уже в обозримом будущем.

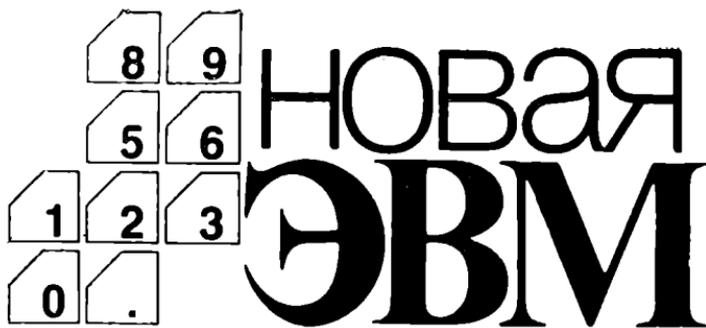
В газетных статьях сегодняшнее открытие физиков сравнивается по значению с открытием радиации. Замечательное явление сверхпроводимости пока на практике используется сравнительно редко — это уникальные устройства научного и исследовательского плана. Достижение сверхпроводимости возможно было при температуре около 4К (0К соответствует минус 273,1°С), для этого использовался жидкий гелий. Сложно, дорого, габаритно.

В 1973 г. сверхпроводимость была получена при 23К, в 1986 г. — при 38К (охлаждение до такой температуры обеспечивал уже жидкий неон). А теперь американскими и советскими (ФИАН СССР) учеными создан новый сплав, становящийся сверхпроводником при температуре минус 175°С (98К) — сенсационное достижение, существенно приближающее время технического использования этого замечательного эффекта. Охлаждение до 175°С обеспечивает доступный и дешевый жидкий азот.

Работы по сверхпроводимости разворачиваются широким фронтом и каждый день приносит новые результаты.

Литература. Известия. 16 марта 1987 г.

За рубежом. 11 марта 1987 г.



НОВАЯ ЭВМ

П. И. Пархоменко,
В. Н. Беляев,
М. С. Гуревич

В народном хозяйстве нашей страны широкое применение получили микро-ЭВМ семейства «Электроника-60». Число их применений в настоящее время насчитывает десятки тысяч. Прежде всего это станки с числовым программным управлением, роботы-манипуляторы, различные автоматы и полуавтоматы, системы сбора, обработки и хранения информации и т. д.

В процессе развития научно-технической революции сформулированы задачи, связанные с внедрением гибких автоматизированных производств и систем, что требует разработки более совершенных вычислительных устройств. Для решения таких задач разработана и освоена в производстве новая микро-ЭВМ, входящая в это семейство, — «Электроника МС 1211». Новая микро-ЭВМ сохраняет все преимущества микро-ЭВМ «Электроника 60М»: гибкость архитектуры, способность решения задач реального времени, широкий набор команд, развитое математическое обеспечение.

Микро-ЭВМ МС1211 разработана так, что микро-ЭВМ «Электроника 60М» программно совместима с МС1211 снизу-вверх, т. е. программы, написанные для «Электроники 60М», могут работать на МС1211, но не наоборот.

Вместе с тем ресурсы новой микро-ЭВМ и ее многие характеристики соответствуют аналогичным харак-

теристикам мини-ЭВМ ряда СМ и «Электроники-79», сохраняя с ними программную совместимость.

Микро-ЭВМ МС1211 представляет собой 16-разрядную микро-ЭВМ. Она выполнена на основе микропроцессорного набора серии К1811. Конструктивно микро-ЭВМ МС1211 имеет два исполнения: МС1211.01 и МС1211.02. ЭВМ МС1211.01 выполнена без кожуха и блока питания и предназначена для использования ее в технологическом и контрольно-измерительном оборудовании. ЭВМ МС1211.02 имеет кожух, блок питания, лицевую панель с пультом управления и предназначена для использования в стандартной стойке.

ЭВМ МС1211 в составе вычислительных комплексов обеспечивает выполнение следующих основных функций:

- мультипрограммную работу;
- работу в реальном масштабе времени;
- работу с разделением времени;
- пакетную обработку;
- возможность организации многомашинных систем;
- возможность работы с широким набором периферийных устройств.

Основные составные части микро-ЭВМ МС1211:

- центральный процессор «Электроника МС1601»;
- запоминающее устройство «Электроника МС3101»;
- интерфейс последовательный «Электроника МС4602»;
- устройство аппаратной загрузки и диагностики «Электроника МС3401».

Таким образом, микро-ЭВМ МС1211 имеет модульный принцип построения, т. е. все ее функциональные блоки выполнены в виде конструктивно законченных устройств (модулей), связь между которыми осуществляется через магистраль передачи информации. Маги-

марки
ТИПЫ
характеристики



страль передачи информации является простой быстродействующей системой связей, соединяющей центральный процессор, память и все внешние устройства.

Характеристики ЦП МС1601.

Производительность:

— для научно-технических задач оп/с 89,0 тыс.;

— для планово-экономических задач оп/с 170,0 тыс.;

Разрядность обрабатываемых данных, бит:

— при операциях с фиксированной запятой 16;

— при операциях с плавающей запятой 32,64.

Система команд — безадресная, одноадресная, двухадресная:

количество видов адресации 8;

число регистров общего назначения 8.

Количество команд 138,

в том числе

— количество основных команд 92;

— количество команд для вычислений

с плавающей запятой 46.

Максимальный адресуемый объем памяти до 4 Мбайт.

Характеристики запоминающего устройства МС3101:

емкость памяти, кбайт 64;

время выборки, нс 500;

выполняется контроль по четности;

обеспечивается автономная регенерация.

Характеристики интерфейса последовательного МС4601:

число каналов последовательной связи 2.

Скорости обмена, бод 150, 300, 600, 1200, 2400, 4800, 9600, 19200.

Два способа последовательного обмена:

— 20 мА токовая петля;

— стык С2.

Характеристики устройства МС3401:

емкость постоянной памяти, кбайт 48;

обеспечивается считывание программ пользователя из ПЗУ и ППЗУ следующих типов: К573РФ2(5), К555РТ5 и К556РТ7.

Для расширения возможностей ЭВМ МС1211 можно использовать дополнительные устройства ввода-вывода и контроллера, разрабатываемые для ЭВМ «Электроника МС1211» и для других подобных машин.

ЭВМ

Микропроцессы

Электроника

★ МАТЕМАТИКА, КИБЕРНЕТИКА. Новое в жизни, науке, технике. Подписная научно-популярная серия брошюр. Издается ежемесячно с 1967 г. — М.: Знание.

★ РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И СВЯЗЬ. Новое в жизни, науке, технике. Подписная научно-популярная серия брошюр. Издается ежемесячно с 1966 г. — М.: Знание.

★ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ. Новое в жизни, науке, технике. Подписная научно-популярная серия брошюр. Начало издания 1988 г. — М.: Знание.

★ АВТОМАТИКА И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА. Всесоюзный научно-теоретический журнал. Издается с 1967 г. Выходит 6 раз в год. Орган Института электроники и вычислительной техники АН Латвийской ССР. — Рига.: Зинатне.

★ ТРУДЫ ИНСТИТУТА ИНЖЕНЕРОВ ПО ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ И РАДИОТЕХНИКЕ (ТИИЭР). Пер. с англ. Издается с 1961 г. Ежемесячный журнал. Орган Института инженеров по электротехнике и радиотехнике (США). — М.: Мир.

★ ЭЛЕКТРОНИКА. Пер. с англ. Научно-технический журнал. Издается с 1961 г. Выходит 2 раза в месяц. — М.: Мир.

★ ВОПРОСЫ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ. Научно-технический сборник. Орган Научно-исследовательского института экономики и информации по радиоэлектронике. Издается 12 серий.

★ ЗАРУБЕЖНАЯ РАДИОЭЛЕКТРОНИКА. Ежемесячный научно-технический журнал. Орган научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А. С. Попова. Издается с 1947 г. — М.: Радио и связь.

★ **КИБЕРНЕТИКА.** Всесоюзный научно-технический журнал. Орган Института кибернетики им. В. М. Глушкова. Издается с 1965 г. Выходит 6 раз в год. — Киев: Наукова думка.

★ **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И АРХИТЕКТУРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ.** Сборник научных трудов. Выпуски АН СССР. Сибирское отделение. Институт математики. Новосибирск.

★ **ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ И ПРОГРАММИРОВАНИЕ.** Сборник работ Научно-исследовательского вычислительного центра Московского государственного университета. Издательство Московского университета.

★ **ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА ЗА РУБЕЖОМ В 19... ГОДУ.** Ежегодный сборник статей. Орган Института точной механики и вычислительной техники им. С. А. Лебедева АН СССР.

★ **МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ СРЕДСТВА И СИСТЕМЫ.** Научно-технический и производственный журнал. Орган Государственного комитета СССР по науке и технике. Выходит 6 раз в год. — М.: Всесоюзный центр по оборудованию ГКНТ СССР.

★ **ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ.** Ежемесячный научно-технический и производственный журнал. Орган Министерства приборостроения средств автоматизации и систем управления и центрального правления ЦПО приборостроительной промышленности им. акад. С. И. Вавилова. Издается с 1956 г. — М.: Машиностроение.

★ **ТЕХНИКА СРЕДСТВ СВЯЗИ.** Научно-технический сборник. Центральный отраслевой орган научно-технической информации «ЭКОС». Одна из серий «Вычислительная техника в системах связи», а также АСУ. Микроэлектронная техника и др. Всего 13 серий.

★ **ELROG.** Иллюстрированное издание В/О «Электроноргтехника СССР». Выходит 2 раза в год на русск., англ., фр., нем., испанск. и финск. языках. Издатель В/О «Внешторггреклама». Готовится к печати редакцией журнала «Советский экспорт».

★ **НОВЫЕ КНИГИ ЗА РУБЕЖОМ.** Ежемесячный критико-библиографический бюллетень. Серия Б. «Техника». Издается с 1957 г. М.: Мир.

★ **ПРОГРАММИРОВАНИЕ.** Издание АН СССР. Выходит 6 раз в год. Основан в 1975 г. — М.: Наука.

★ **ЭКСПРЕСС-ИНФОРМАЦИЯ.** Реферативные сборники Центрального научного института информации и технико-экономических исследований приборостроения, средств автоматизации и систем управления. Всего 12 серий.

★ **ЭКСПРЕСС-ИНФОРМАЦИЯ. ВИНИТИ.** Орган Государственного комитета СССР по науке и технике и АН СССР. Всего 31 серия, каждая издается 4 раза в месяц. М.: ВИНИТИ.

★ **АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММЫ** (библиографическая информация). Орган Государственного комитета СССР по науке и технике и Государственной публичной научно-технической библиотеки СССР. Основан в 1968 г. Выходит ежемесячно. М., ГПНТБ.

★ **АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММЫ**. Информационный бюллетень. Государственный фонд алгоритмов и программ СССР. Выходит пять раз в год. М., Всесоюзный научно-технический информационный центр.

★ **ИНФОРМАТИКА И ОБРАЗОВАНИЕ**. Научно-методический журнал Министерства просвещения СССР, Государственного комитета СССР по профессионально-техническому образованию, Министерства высшего и среднего специального образования СССР. Издается с 1986 г. Выходит шесть раз в год. М., Педагогика.

★ **ЗАРУБЕЖНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА**. Сборник обзоров. Орган Министерства электронной промышленности СССР. Издается ежемесячно с 1970 г. М., Издательство ЦНИИ Электроника.

★ **РАДИО**. Ежемесячный научно-популярный радиотехнический журнал. Орган Министерства связи СССР и ДОСААФ. Издается с 1924 г. М., Издательство ДОСААФ СССР.

★ **УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ И МАШИНЫ (УС и М)**. Научно-технический журнал. Орган Института кибернетики им. В. М. Глушкова. Основан в 1972 г. Выходит 6 раз в год. Киев. Наукова думка.

★ **ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА**. Научно-технический сборник. Орган Министерства электронной промышленности и Центрального научно-исследовательского института «Электроника». В настоящее время публикуются 17 серий. Издается с 1965 г. М., Радио и связь.

★ **ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ СТРАН**. Сборник статей. Орган Межправительственной комиссии по сотрудничеству социалистических стран в области вычислительной техники. Издается один-два раза в год с 1977 г. М., Финансы и статистика.

Продолжение в следующих выпусках библиотечки.

В брошюре рассмотрена история создания, разработки и производства микропроцессоров и микропроцессорных устройств. Обсуждена современная и перспективная архитектура микропроцессоров. Приведены оригинальные примеры их применения.

**СБОРНИК СТАТЕЙ
ПОД ОБЩЕЙ РЕДАКЦИЕЙ АКАДЕМИКА
И. В. Прангишвили**

Научно-популярное издание

ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ЭВМ

Библиотечка «Вычислительная техника и ее применение».

Выпуск 6

Главный отраслевой редактор *Л. А. Ерлыкин*

Редактор *Б. М. Васильев*

Мл. редактор *Л. В. Бурханова*

Оформление художника *И. А. Емельяновой*

Худож. редактор *П. Л. Храмцов*

Техн. редактор *Т. В. Луговская*

Корректор *В. В. Каночкина*

Сдано в набор 15.01.87. Подписано к печати 21.03.87. Т-08120. Формат бумаги 84×108¹/₂. Бумага тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 3.36. Усл. кр.-отт. 3.78. Уч.-изд. л. 3.42. Тираж 250000 экз. Заказ 1522. Цена 20 коп. Издательство «Знание», 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 871811.
г. Калинин. Областная типография.

20 коп.

**БИБЛИОТЕЧКА
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА
И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ**



**ВЫПУСК
6**

**Авторы
выпуска**

ГУЛЯЕВ Ю. В. — академик, директор института.

ФЕДОТОВ Я. А. — доктор технических наук, профессор. Заведующий кафедрой МИРЭА, председатель научно-технического семинара по функциональной электронике, лауреат Ленинской премии.

ЕРОФЕЕВ А. А. — доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации и вычислительной техники, заместитель

председателя секции «Спец-вычислители радиотехнических комплексов» (Ленинградское отделение) научного совета АН СССР по проблеме «Статистическая радиофизика», член редакционного совета издательства «Радио и связь».

ПАРХОМЕНКО П. И., БЕЛЯЕВ В. Н., ГУРЕВИЧ М. С. — специалисты Воронежского института электронной техники.

**ЭЛЕМЕНТНАЯ
БАЗА ЭВМ**