

## Элементная база

Развитие элементной базы РЭА, в том числе и РЭС прошло четыре этапа, которые в основном связаны с развитием элементной базы. Обычно говорят о четырех поколениях РЭА:

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| первое<br>(1915-1955 гг.)   | создание РЭА на основе электровакуумных приборов и дискретных ЭРЭ;             |
| второе<br>(1955-1965 гг.)   | использование дискретных транзисторов и миниатюрных ЭРЭ;                       |
| третье<br>(1965 - 1980 гг.) | применение ИС и микроминиатюрных дискретных ЭРЭ;                               |
| четвертое<br>(с 1980 г)     | комплексное использование ЭРЭ, БИС и СБИС, УФЭ и микропроцессорных комплектов. |

Развитие элементной базы определяется потребностями СМЭ и основано на достижениях физики, технологии и производства. Особенно быстро она стала развиваться с начала 60-х гг., когда достижения физики создали основу для появления микроэлектроники. Это привело к формированию в конструкции и технологии самостоятельного направления - конструирования и технологии радиоаппаратуры.

Четвертый этап продолжается и в настоящее время. Существуют и другие классификации, особенно в отдельных направлениях РЭА.

Современная микроэлектроника базируется на интеграции дискретных элементов электронной техники, при которой каждый элемент схемы формируется отдельно в полупроводниковом кристалле. При этом в основе создания, ИМС лежит принцип элементной (технологической) интеграции, сопровождающейся микроминиатюризацией элементов (активных и пассивных) микросхемы. В ИМС можно выделить области, представляющие собой активные (диоды, транзисторы) и пассивные (резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности) элементы. В интегральной микроэлектронике сохраняется главный принцип дискретной электроники, основанной на разработке электрической схемы по законам теории цепей. Этот принцип неизбежно связан с ростом числа элементов микросхемы, и межэлементных соединений по мере усложнения выполняемых ею функций.

Повышение степени интеграции микросхем и связанное с этим уменьшение размеров элементов имеет определенные пределы. Интеграция свыше нескольких сотен тысяч элементов (в отдельных случаях и миллионов) на одном кристалле оказывается экономически нецелесообразной и технологически трудно выполнимой.

Сложными становятся проблемы топологии и теплоотвода. Поэтому в отдаленной перспективе интегральная микроэлектроника уже не будет полностью удовлетворять разработчиков сложной радиоэлектронной аппаратуры.

Функциональная микроэлектроника предполагает принципиально новый подход, позволяющий реализовать определенную функцию аппаратуры без применения стандартных базовых элементов, основываясь непосредственно на физических явлениях в твердом теле. В этом случае локальному объекту твердого тела придаются такие свойства, которые требуются для выполнения данной функции, и промежуточный этап представления желаемой функции в виде эквивалентной электрической схемы не требуется. Функциональные микросхемы могут выполняться не только на основе полупроводников, но и на основе таких материалов, как сверхпроводники, сегнетоэлектрики, материалы с фотопроводящими свойствами и др. Для переработки информации можно использовать явления, не связанные с электропроводностью (например, оптические и магнитные явления в диэлектриках, закономерности распространения ультразвука и т.д.).

Таким образом, функциональная микроэлектроника охватывает вопросы получения специальных сред с наперед заданными свойствами и создания различных электронных устройств методом физической интеграции, т.е. использования таких физических принципов и явлений, реализация которых позволяет получить приборы со сложным схмотехническим или системотехническим функциональным назначением.

Оптические явления (когерентная и некогерентная оптика, нелинейная оптика, электрооптика, магнитооптика). Их свойства, связанные со свойствами светового потока, следующие:

- зарядовая нейтральность, однонаправленность, отсутствие гальванических связей и электрических контактов;
- двумерность светового потока, а следовательно, возможность многоканальной обработки информации;
- высокая несущая частота и, следовательно, большая полоса пропускания каналов обработки информации.

Эти особенности стали основой интенсивно развивающегося направления функциональной микроэлектроники - оптоэлектроники.

Физические явления, связанные с взаимодействием потока электронов с акустическими волнами в твердом теле. Такие явления, как генерация и усиление акустических волн потоком электронов, движущихся со сверхзвуковыми скоростями, обусловили появление нового направления функциональной микроэлектроники - акустоэлектроники. Особенность этих явлений заключается в малой скорости распространения акустических волн ( $1.105 \text{ см/с}$ ) в отличие от электромагнитных волн ( $3.10^{10} \text{ см/с}$ ), что позволяет реализовать миниатюрные линии задержки, фильтры с заданными частотными свойствами, усилители СВЧ и др.

Преимущество этого направления состоит в том, что реализация заданной функции обеспечивается лишь выбором конфигурации устройства.

Новые магнитные материалы (слабые ферромагнетики и магнитные полупроводники), появление которых привело к созданию нового направления - магнетоэлектроники. Отличительной особенностью слабых ферромагнетиков является малая по сравнению с классическими магнитными материалами намагниченность насыщения. Это дает возможность управлять движением магнитных доменов, называемых пузырями, в двух и трех измерениях слабыми магнитными полями и осуществлять тем самым функции хранения, перемещения и обработки больших объемов информации.

Характерные размеры "пузырей", составлявших примерно 1 мкм, позволяют достичь, высокой плотности записи информации (1.108 бит/см<sup>2</sup>). Большое преимущество таких систем состоит в том, что хранение информации осуществляется без питания, а перемещение "пузырей" - малым рассеянием мощности. Ряд новых материалов - магнитных полупроводников, обладающих свойствами магнетиков и полупроводников, - позволяет создавать приборы с большой функциональной гибкостью.

Покоящиеся и движущиеся электрические неоднородности (домены и шнуры) в однородных полупроводниках. Их исследование стимулировало создание функциональных интегральных микросхем.

Так как в данном случае используется однородный материал, то реализация заданной функции может быть достигнута выбором соответствующей конфигурации устройства. Высокие скорости движения неоднородностей электрического поля (1.107 см/с) обуславливают высокое быстродействие (меньше 1.10<sup>-9</sup> с), а также генерацию и усиление в диапазоне СВЧ.

Явления, связанные с изменением структуры конденсированных тел на молекулярном уровне. Они привели к возникновению нового направления - квантовой или молекулярной микроэлектроники. К этому направлению относятся фазовые переходы в твердых телах и жидких кристаллах, сопровождающихся резкими изменениями электрических, оптических и магнитных свойств. Обусловленная этим высокая чувствительность к внешним воздействиям позволяет легко, осуществлять ряд операций по управлению и преобразованию потоков информации в различных функциональных системах.

Интересными материалами с еще не вполне раскрытыми, перспективами использования их в микроэлектронике являются органические полупроводники.

Микроэлектронные устройства с использованием доменов обладают высокими функциональными возможностями.

Элементы на основе эффекта Ганна. Помимо генераторов и усилителей СВЧ они позволяют создавать такие функциональные устройства, как импульсно-кодовые модуляторы, компараторы, аналого-цифровые преобразователи, нейристорные линии задержки, полный ряд логических элементов, генераторы колебаний сложной формы, регистры сдвига и запоминающие устройства (ЗУ). На основе этих элементов могут быть созданы сверхбыстродействующие микросхемы (теоретически до 10-12 с), превосходящие по быстродействию лучшие

кремниевые микросхемы, по крайней мере, на порядок при том же уровне рассеиваемой мощности.

Малогабаритные СВЧ-генераторы на диодах Ганна уже миновали стадию лабораторных разработок. Они обладают низким уровнем шумов (сравнимым с клистронами) и мощностью излучения, достаточной для использования в радиолокационных устройствах в диапазоне частот 1 - 80 ГГц. Такие: диоды в пролетном режиме генерации обеспечивают выходную мощность 20 - 350 мВт - в непрерывном режиме и 1 - 400 Вт - в импульсном режиме. В режиме ограниченного накопления объемного заряда диоды Ганна позволяют получать импульсную мощность 3 - 6 кВт на частоте 1,5 - 2 ГГц при к. п. д. 10 - 20%.

Явления холодной эмиссии, которые позволили создать электровакуумные приборы в микроэлектронном исполнении с применением пленок. Обладая всеми преимуществами вакуумных приборов (высокие входные сопротивления, малые шумы), они характеризуются очень высокой радиационной стойкостью, весьма малыми размерами, высокими рабочими частотами.

Явления живой природы, в частности на молекулярном уровне, позволяющие использовать принципы хранения и обработки информации в живых системах для создания сверхсложных систем обработки информации, приближающихся по своим функциональным возможностям к человеческому мозгу (искусственный интеллект), а также решать проблему эффективной связи "человек - машина". Эти явления открывают новое направление - биоэлектронику. Развитие этого направления может привести к научно технической революции в электронике, последствия которой трудно предвидеть.

Функциональные микросхемы, в которых используется эффект накопления и переноса зарядов, что позволяет реализовать плотность размещения элементов  $3 \cdot 10^4$  элемент/см<sup>2</sup>. Такие приборы по существу представляют собой МДП-структуры, они весьма технологичны (число технологических операций в два раза меньше по сравнению с обычной МДП-технологией). Приборы с переносом заряда (ППЗ), или приборы с зарядовой связью (ПЗС), могут стать основой построения логических схем, линий задержки, схем памяти и систем для получения изображений. Сравнительная простота технологии изготовления ПЗС по сравнению с системами на обычных МДП-транзисторах и почти десятикратное уменьшение площади схемы (~0,0016 мм<sup>2</sup> на 1 бит информации) должны привести к существенному снижению стоимости систем на ПЗС. Использование полевых транзисторов с нитридом кремния в качестве диэлектрика затвора позволяет преодолеть один из основных недостатков полупроводниковых ЗУ - потерю информации при отключении питания. Такие ЗУ дают возможность реализовать плотность размещения элементов до 10<sup>8</sup> элемент/см<sup>2</sup> при времени записи 10-6 с.

Другой тип управления электрическими неоднородностями в однородном материале состоит в помещении зарядов в потенциальные ямы в приэлектродной области. И здесь выполнение заданных функций достигается топологией

контактов. Очень перспективно объединение методов, сочетающих заряд в потенциальных ямах с захватом и хранением заряда в поверхностном слое (электретный эффект), что позволяет совместить длительное хранение больших объемов, информации и ее обработку.

Интересные возможности для реализации быстродействующих ЗУ большого объема представляют переключатели на основе аморфных материалов (не имеющие кристаллического строения), обладающие симметричной S-образной вольт-амперной характеристикой. Время переключения прибора составляет  $1,5 \cdot 10^{-10}$  с. На основе элементов из халькогенидных стекол создано постоянное ЗУ на 256 бит с возможностью электрической перезаписи и высокой плотностью упаковки структуры, сравнимой с достигнутой плотностью в биполярной и МДП-технологии. Емкость ЗУ может возрасти до  $10^6$  бит. Эти приборы обеспечивают хранение информации без расхода энергии и считывание без разрушения, обладают симметричностью вольт-амперных характеристик и высокой радиационной стойкостью.

Наиболее перспективными из аморфных полупроводников (пленки толщиной не более 1 мкм) является S, Ge, As, Te, In, Sb, Se или их сплавы, а также диэлектрики на основе окислов этих полупроводников или окислов тугоплавких металлов переходной группы, например Gr, Ti, Ta, Mo, Nb.

Аморфные материалы классифицируют следующим образом:

- материалы с резко изменяющимся, значением удельного сопротивления ;
- материалы с отрицательным дифференциальным сопротивлением до  $10^6$  Ом ;
- материалы с двумя управляемыми состояниями электропроводности; сопротивления этих материалов могут различаться на семь порядков, а время переключения составляет  $10^{-9}$  с;
- материалы с двумя устойчивыми состояниями переключения;
- функциональные материалы, объединяющие свойства перечисленных материалов.

Анализ вольт-амперных характеристик аморфных материалов показывает, что их проводимость в ряде случаев скачком изменяется на несколько порядков и сохраняется в таком состоянии неограниченно долго. Эти свойства аморфных материалов уже дали возможность построить пороговые переключатели, ячейки памяти, перестраиваемые ключи памяти с двумя устойчивыми состояниями. На основе аморфных полупроводников развиваются перспективные приборы - туннельные пленочные эмиттеры. По внешнему виду эти приборы почти не отличаются от конденсаторных структур типа "металл - диэлектрик - металл", однако принцип их работы иной. Пленка диэлектрика очень тонкая, способная пропускать токи до 0,01 А, верхний электрод также достаточно тонкий (не более 50 нм). Принцип работы пленочных эмиттеров следующий. Электроны из катода (толщиной порядка 0,5 мкм) попадают в диэлектрик и в зави-

симости от толщины аморфной пленки диэлектрика разгоняются в нем до больших скоростей либо рассеиваются со значительными потерями энергии. Толщину диэлектрика выбирают минимальной, однако такой, чтобы сохранялась сплошная структура пленки и не было частичных микропробоев диэлектрика. Рабочая толщина диэлектрика обычно не превышает 40 нм. Так называемые горячие электроны просачиваются через потенциальный барьер и мигрируют через наружный электрод в вакуум. Пленочная структура металл - диэлектрик - металл выполняет фактически функцию холодного катода, который в отличие от обычных катодов почти не шумит, обладает повышенной радиационной стойкостью и очень малыми размерами при большом токе эмиссии с единицы поверхности.

Отметим, что интервал рабочих температур аморфных переключателей и ячеек памяти составляет от  $-180$  до  $+180^{\circ}\text{C}$ .

Представляют большой интерес функциональные элементы с управляемым отрицательным сопротивлением на основе аморфных материалов. Эти приборы можно подразделить на две категории: 1) приборы, управляемые током и обладающие отрицательным дифференциальным сопротивлением (приборы с S-образной характеристикой); 2) приборы, управляемые напряжением и обладающие эффектом памяти (приборы с N-образной характеристикой). Первый тип приборов реализуется на пленках окислов Ta, Ti, Nb, второй - на пленках диэлектриков, содержащих окислы, сульфиды и флюориды.

Когерентные свойства сигнала для создания ряда новых твердотельных функциональных приборов: генераторов синусоидальных колебаний, усилителей, умножителей, преобразователей частоты, фазовращателей, трансформаторов, линий задержки, нейристорных линий, логических элементов, ячеек памяти и т.д. Следует особо выделить специфическое физическое явление, основанное на квантовых когерентных свойствах носителей заряда - эффект Джозефсона. Суть его состоит в том, что через достаточно тонкую (порядка 2 нм) диэлектрическую прослойку между сверхпроводящими слоями при низких температурах даже в отсутствие разности потенциалов может протекать своеобразный туннельный ток, легко управляемый сравнительно слабыми внешними сигналами. Значения параметров приборов, основанных на этом эффекте, существенно превышают значения соответствующих параметров приборов интегральной микроэлектроники. Исследования показали, что быстродействие отдельных приборов на эффекте Джозефсона достигает 20 - 30 пс, а мощность рассеяния равна 100 нВт, т.е. во много раз меньше, чем в обычных интегральных микросхемах. Основная трудность при изготовлении таких приборов - получение стабильного диэлектрика при толщинах порядка 2 нм.

## Тенденции развития элементной базы

Рост сложности и масштабности задач по повышению благосостояния трудящихся вызвал бурное развитие науки и техники, внедрение практически во все сферы человеческой деятельности автоматизированных систем управления. Планирование и управление, производство и обучение, наш быт сегодня немислим без радиоэлектронной и вычислительной аппаратуры.

Современная цифровая вычислительная техника, наиболее мощное средство автоматической обработки информации, воплощает в себе достижения многих отраслей науки и техники. С каждым годом увеличиваются масштабы применения ЭВМ во всех отраслях народного хозяйства, в связи с чем возрастают требования к характеристикам схем ЭВМ и следовательно к принципам их проектирования и построения.

С момента создания первых ЭВМ их элементная база менялась четыре раза, поэтому различают ЭВМ четырех поколений.

В ЭВМ первого поколения в качестве элементной базы использовали электронные лампы.

В ЭВМ второго поколения в качестве элементной базы использовали полупроводниковые диоды и транзисторы.

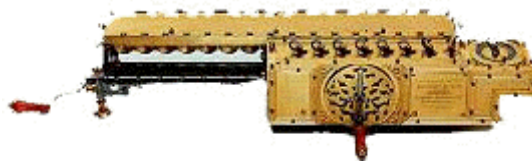
В ЭВМ третьего поколения в качестве элементной базы использованы интегральные схемы.

### Механические ВМ

Вопреки сложившемуся стереотипу, история развития вычислительной техники начинается задолго до приручения человеком электричества. Ещё в XV в. Леонардо да Винчи представил чертёж машины, которая способна была складывать натуральные числа. Для этого машина использовала 13 стержней, поворот каждого из которых приводил к частичному повороту остальных. Примерно с тех же времён (XV-XVI вв.) на Руси появились счёты.

В 1642 г. Блез Паскаль, французский математик, изобрёл устройство, позволяющее складывать десятичные числа. В основе устройства были шестерни на стержнях.

В 1673 г. немецкий философ, математик, физик Готфрид Вильгейм Лейбниц создал "ступенчатый вычислитель" - счетную машину, позволяющую складывать, вычитать, умножать, делить, извлекать квадратные корни, при этом использовалась двоичная система счисления.



Арифмометр Лейбница

В 1822 г. английский математик Чарлз Бэббидж выдвинул идею создания программно-управляемой счетной машины, имеющей арифметическое устройство, устройство управления, ввода и печати. "Разностная машина", так называлось детище Чарлза, работала на паровом двигателе и считывала данные с перфокарт.

В 1918 г. русский ученый М.А. Бонч-Бруевич и английские ученые В. Икклз и Ф. Джордан (1919) независимо друг от друга создали электронное реле, которое сыграло большую роль в развитии компьютерной техники.

### **Релейные ЭВМ**

1941 год. Немецкий ученый Конрад Цузе создал компьютер Z3, работающий на основе электрических реле. Всего было использовано 2600 реле. Компьютер мог обрабатывать величины с плавающей точкой. Во время 2 мировой войны компьютер и вся документация, включая фотографии, были уничтожены (Цузе к тому времени эмигрировал), остался только рисунок, сделанный самим Цузе в 1939 году. После войны Цузе создал в Германии компьютерную компанию Zuse KG, которая успешно работала многие годы. В 1961 году Цузе в своей компании воссоздал компьютер Z3, чтобы доказать свой патент на эту машину. Z3 экспонировался на нескольких выставках, а сейчас находится в музее в Мюнхене.



Z3

### **Ламповые ЭВМ**

В 1943 год. В Великобритании был построен компьютер Colossus Mark 1 на 1500 электронных лампах для дешифровки перехваченных германских шифровок. В разработке математической модели компьютера участвовал Алан Тьюринг. Компьютер был собран в декабре 1943 года, а первые реальные расшифровки были сделаны в январе 1944 г. после его установки в г. Bletchley Park.

1945 год - Джон фон Нейман (John von Neumann), американский ученый, выдвинул идею использования внешних запоминающих устройств, для хранения программ и данных. Нейман разработал структурную принципиальную схему компьютера. Схеме Неймана соответствуют и все современные компьютеры.





Mark 1

### **Транзисторные дискретные ЭВМ**

1955 год - изготовлен первый в мире компьютер на полупроводниковых транзисторах и диодах без использования электронных ламп - TRADIC, данный компьютер был разработан компанией Bell Labs для американских ВВС. В компьютере было 700 транзисторов и 10000 германиевых диодов.



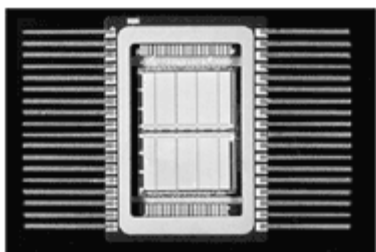
TRADIC

### **Транзисторные интегральные ЭВМ**

В 1968 году был создан первый компьютер на интегральных схемах.

1971 год. Именно с этого года начинается развитие микропроцессоров, и создала первый микропроцессор американская фирма Intel. Назывался он Intel 4004. В этом же году появились интегральные схемы памяти.

В 1973 году появляется процессор Intel 8080, который становится стандартом процессоров на долгое время. Все процессоры, созданные Intel до 1999 года, поддерживают все функции, которыми обладал этот процессор.



Intel 4004

В 1979 году в Японии началась программа по разработке компьютеров 5-го поколения. Компьютеры пятого поколения должны были для достижения сверх-

производительности интегрировать огромное количество процессоров. Цели программы достигнуты не были, т.к. подобные компьютеры хоть и были созданы, однако по мощности они отставали даже от коммерческих компьютеров того времени.

### **Проблемы развития элементной базы**

Одним из главных факторов достижения высокого быстродействия, а значит, и высокой производительности ЭВМ является построение их на новейшей элементной базе. Смена поколений ЭВМ в значительной степени связана с переходами на новые поколения элементной базы, знаменующие достижения новых частотных диапазонов работы схем в рамках доступных технологий. Успехи в создании новой элементной базы определяются передовыми научными и техническими достижениями целого ряда наук (физики, химии, оптики, механики и др.). Качество элементной базы является показателем 'технического прогресса.

Все современные ЭВМ строятся на микропроцессорных наборах, основу которых составляют большие и сверхбольшие интегральные схемы. Технологический принцип разработки и производства интегральных схем действует уже более четверти века. Он заключается в циклическом послойном изготовлении частей электронных схем по циклу программа - рисунок - схема. По программам на напыленный фоторезисторный слой наносится рисунок будущего слоя микросхемы. Затем рисунок протравливается, фиксируется, закрепляется и изолируется от новых слоев. На основе этого создается пространственная твердотельная структура. Например, СБИС типа Pentium включает около трех с половиной миллионов транзисторов, размещаемых в пятислойной структуре.

Степень микроминиатюризации, размер кристалла ИС, производительность и стоимость технологии напрямую определяются типом литографии. До настоящего времени доминирующей оставалась оптическая литография, т.е. послойные рисунки на фоторезисторе микросхем наносились световым лучом. В настоящее время ведущие компании, производящие микросхемы, реализуют кристаллы с размерами примерно  $400\text{мм}^2$  - для процессоров (например, Pentium) и  $200\text{мм}^2$  - для схем памяти. Минимальный топологический размер (толщина линий) при этом составляет 0,5 - 0,35 мкм. Для сравнения можно привести такой пример. Толщина человеческого волоса составляет примерно 100 мкм. Значит, при таком разрешении на толщине волоса могут вычерчиваться более двухсот линий.

Дальнейшие достижения в микроэлектронике связываются с электронной (лазерной), ионной и рентгеновской литографией. Это позволяет выйти на размеры 0.25, 0.18 и даже 0.08 мкм.

При таких высоких технологиях возникает целый ряд проблем. Микроскопическая толщина линий, сравнимая с диаметром молекул, требует высокой чистоты используемых и напыляемых материалов, применения вакуумных

установок и снижения рабочих температур. Действительно, достаточно попадания мельчайшей пылинки при изготовлении микросхемы, как она попадает в брак. Поэтому новые заводы по производству микросхем имеют уникальное оборудование, размещаемое в чистых помещениях класса 1, микросхемы в которых транспортируются от оборудования к оборудованию в замкнутых сверхчистых мини-атмосферах класса 1000. Мини-атмосфера создается, например, сверхчистым азотом или другим инертным газом при давлении  $10^{-4}$  Торр [3].

Уменьшение линейных размеров микросхем и повышение уровня их интеграции заставляют проектировщиков искать средства борьбы с потребляемой  $W_n$  и рассеиваемой  $W_p$  мощностью. При сокращении линейных размеров микросхем в 2 раза их объемы изменяются в 8 раз. Пропорционально этим цифрам должны меняться и значения  $W_n$  и  $W_p$ , в противном случае схемы будут перегреваться и выходить из строя. В настоящее время основой построения всех микросхем была и остается КМОП-технология (комплиментарные схемы, т.е. совместно использующие n- и p-переходы в транзисторах со структурой металл - окисел - полупроводник).

Известно, что  $W=U*I$ . Напряжение питания современных микросхем составляет 5 - 3V. Появились схемы с напряжением питания 2,8V, что выходит за рамки принятых стандартов. Дальнейшее понижение напряжения нежелательно, так как всегда в электронных схемах должно быть обеспечено необходимое соотношение сигнал-шум, гарантирующее устойчивую работу ЭВМ.

Протекание тока по микроскопическим проводникам сопряжено с выделением большого количества тепла. Поэтому, создавая сверхбольшие интегральные схемы, проектировщики вынуждены снижать тактовую частоту работы микросхем.

Таким образом, переход к конструированию ЭВМ на СБИС и ультра-СБИС должен сопровождаться снижением тактовой частоты работы схемы. Дальнейший прогресс в повышении производительности может быть обеспечен либо за счет архитектурных решений, либо за счет новых принципов построения и работы микросхем. Альтернативных путей развития просматривается не очень много. Так как микросхемы СБИС не могут работать с высокой тактовой частотой, то в ЭВМ будущих поколений их целесообразно комплексировать в системы. При этом несколько СБИС должны работать параллельно, а слияние работ в системе должно обеспечивать сверхскоростные ИС (ССИС), которые не могут иметь высокой степени интеграции.

Большие исследования проводятся также в области использования явления сверхпроводимости и туннельного эффекта - эффекта Джозефсона. Работа микросхем при температурах, близких к абсолютному нулю ( $-273^{\circ}\text{C}$ ), позволяет достигнуть  $f_{\text{max}}$ , при этом  $W_p=W_n=0$ . Очень интересны результаты по использованию "теплой сверхпроводимости". Оказывается, что для некоторых материалов, в частности для солей бария, явление сверхпроводимости наступает уже при температурах около  $-150^{\circ}\text{C}$ . Высказывались соображения, что могут

быть получены материалы, имеющие сверхпроводимость при температурах, близких к комнатной. С уверенностью можно сказать, что появление таких элементов знаменовало бы революцию в развитии средств вычислительной техники новых поколений.

В качестве еще одного из альтернативных путей развития элементной базы ЭВМ будущих поколений следует рассматривать и биомолекулярную технологию. В настоящее время имеются опыты по синтезу молекул на основе их стереохимического генетического кода, способных менять ориентацию и реагировать на ток, на свет и т.п. Однако построение из них биологических микромашин еще находится на стадии экспериментов. Таким образом, можно сделать вывод, что в настоящее время возможности микроэлектроники еще не исчерпаны, но давление пределов уже ощутимо. Основой для ЭВМ будущих поколений будут БИС и СБИС совместно с ССИС. При этом структуры ЭВМ и ВС будут широко использовать параллельную работу микропроцессоров.

Компьютеры для коммерческого и домашнего использования продолжают строиться на основе микропроцессоров, так как данная технология является относительно дешевой и при этом позволяет достичь значительной производительности. Суперкомпьютеры же разрабатываются на основе искусственных нейронных сетей, которые используют массовый параллелизм и способность к обучению и обобщению на основе большого количества взаимосвязанных процессоров невысокой вычислительной способности.

Одной из появившихся недавно элементных баз также является искусственный биокомпьютер - компьютер, который функционирует как живой организм или содержит биологические компоненты. Создание биокомпьютеров основываются на направлении в исследовании - молекулярные вычисления. В качестве вычислительных элементов используются белки и нуклеиновые кислоты, реагирующие друг с другом.



Суперкомпьютер СКИФ, разработанный белорусскими и российскими специалистами