



В этой новой рубрике будут публиковаться заметки, которые познакомят читателей с полупроводниковыми устройствами, лежащими в основе вычислительной техники.

Первое знакомство

Доктор физико-математических наук М. Е. ЛЕВИНШТЕИН,
кандидат физико-математических наук Г. С. СИМИН

Наверняка мы не ошибемся, если предположим, что большинство наших читателей лучше представляют себе, что могут делать электронно-вычислительные машины, нежели знают, как эти машины устроены. Многие не только расскажут, какие задачи решаются с помощью ЭВМ, но и продемонстрируют навыки работы с ними. Прodelать же некоторые вычисления на микрокалькуляторе способны сегодня практически все школьники старших классов. А вот что там, внутри этих устройств? Что лежит в основе их работы?

Электронные цифровые вычислительные машины появились 40 лет назад, вскоре после окончания второй мировой войны. Машины «Эниак» (США), «БЭСМ-1», «Урал-1» (СССР) и др. содержали несколько десятков тысяч электронных ламп и проделывали 5—10 тысяч операций в секунду.

Современные ЭВМ содержат миллионы полупроводниковых приборов и выполняют десятки миллионов операций в секунду.

Колоссальный прогресс ЭВМ решающим образом связан с развитием физики полупроводников и полупроводниковой техники.

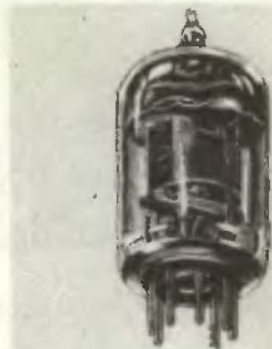
Полупроводниковые приборы — основа современной радиоэлектроники; ЭВМ — самое сложное радиоэлектронное устройство, когда-либо созданное человеком. Схема коротковолнового переносного радиоприемника включает 10—15 полупроводниковых элементов (транзисторов и диодов), цветного телевизора на полупроводниках — более 100. Большая ЭВМ содержит десятки миллионов элементов и намного превосходит все другие устройства по сложности своей внутренней структуры.

И в то же время, это сложнее радиоэлектронное устройство состоит из простых элементарных ячеек, называемых логическими схемами. В свою очередь их основой, а следовательно, и основой работы всей машины является один-единственный элемент, обладающий главным свойством: способностью находиться в двух хорошо различимых физических состояниях, одно из которых можно условно назвать «нулем», а другое — «единицей». Физикам известны десятки так называемых «ключевых» приборов, обладающих этим свойством, число таких приборов с каждым годом увеличивается, и на основе любого из них можно, в принципе, построить ЭВМ. Но только в принципе! Реальные компьютеры предъявляют к своему основному элементу целый набор весьма жестких требований.

Во-первых, скорость переключения элемента, то есть скорость его перехода из состояния «0» в состояние «1» и обратно, должна быть очень велика, так как она определяет быстродействие всей машины; во-вторых, его размеры должны быть очень малы — ведь элементов в ЭВМ миллионы; в-третьих, по той же причине, потребляемая им мощность и его стоимость должны быть очень низкими; в-четвертых, он должен быть надежен; в-пятых, ..., в-восьмых, ..., в-десятых...

Оказывается, что единственный тип приборов из множества известных сегодня «ключевых» элементов, который удовлетворяет всей совокупности жестких и противоречивых требований современных ЭВМ, — это транзисторы, объединенные в большие и сверхбольшие интегральные схемы (БИС и СБИС).

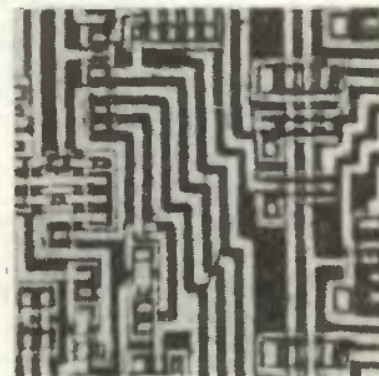
До появления интегральных схем транзисторы создавались следующим образом. На большой кремниевой пластине изготавливалось несколько тысяч транзисторных структур. Далее



Электронные лампы — элементная база ЭВМ первого поколения. Срок службы такой лампы — несколько тысяч часов, объем — несколько см³. Ламповые ЭВМ весили 20—30 т, потребляли мощность 100—200 кВт.

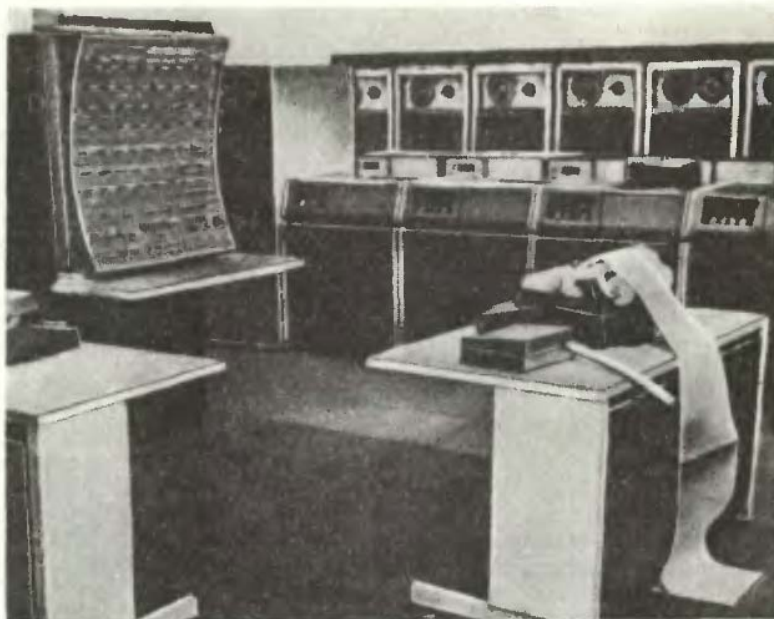


Транзисторы — основа ЭВМ 2-го поколения. Одна из мощнейших машин этого класса — БЭСМ-6; создана в СССР в 1967 году и эксплуатируется до сих пор. Совершает около 1 млн. операций в секунду. Содержит около 60 тысяч биполярных транзисторов и 200 тысяч диодов.



Идея создавать на полупроводниковой пластине готовую схему, содержащую транзисторы и все необходимые соединения, — интегральную схему (ИС) — возникла в 1952 году и была реализована в 1959 году.

Отечественная ЭВМ
ЕС-1060 — одна из самых
мощных машин 3-го поколе-
ния. Элементная база — ИС
на основе биполярных тран-
зисторов. Быстродействие —
3 млн. операций в секунду.
Содержит более 10 млн. тран-
зисторов.



«Электроника ВЗ-38» — мик-
рокалькулятор на основе од-
ного кристалла, содержащего
35 тысяч полевых транзисто-
ров. Размер кристалла $\sim 5 \times 5$
 $\times 5$ мм². Содержит микро-
программы 34 математиче-
ских операций. Потребляет
менее 600 мкВт, весит менее
50 г.



Человеческий мозг может
вместить приблизительно 10^{13}
единиц информации. Чтобы
разместить эту информацию в
памяти ЭВМ, в 1960 году по-
требовалось бы помещение
объемом 500 млн. м³.
Если современная скорость со-
кращения размеров полупро-
водниковых элементов в ИС
сохранится, то в 2050 году
эта информация сможет быть
размещена в объеме, меньшем,
чем объем головы человека.

пластина разрезалась на множество мелких кристалликов, каждый из которых представлял собой один будущий транзистор. Затем начиналась длинная последовательность трудоемких ручных операций. Кристаллик крепился в специальный держатель, под микроскопом с двух сторон к кристаллу приваривались выводы-проволочки, вся конструкция помещалась в специальный корпус, герметизировалась. И в результате транзистор был готов служить элементом любой радиоэлектронной схемы.

Получалось, что сначала транзисторы отделялись один от другого (когда пластина разрезалась), а затем, при изготовлении схемы, снова соединялись друг с другом.

Идея ИС состоит в том, чтобы изготавливать на пластине одновременно и транзисторы, и необходимые соединения между ними. В результате каждая пластина содержит готовые радиоэлектронные схемы. В корпус помещается теперь не один транзистор, а схема, насчитывающая много (до сотен тысяч) транзисторов и имеющая сравнительно небольшое число внешних выводов. Размеры электронных схем очень сильно уменьшаются, их надежность возрастает.

Если бы знакомый всем микрокалькулятор был собран не на ИС, а на обычных дискретных транзисторах, он был бы размером с письменный стол и выходил из строя каждый час. Электронные наручные часы вообще не могли бы существовать. Да и современные ЭВМ, насчитывающие десятки миллионов транзисторов, были бы практически непригодны: они выходили бы из строя каждые несколько секунд.

В ЭВМ используются ИС, содержащие два основных типа транзисторов: биполярные и полевые.

В наших последующих заметках мы расскажем о принципах работы биполярных и полевых транзисторов и о простейших логических схемах, лежащих в основе действия ЭВМ.



II. Полевые транзисторы

Доктор физико-математических наук
М. Е. ЛЕВИНШТЕЙН,
кандидат физико-математических наук
Г. С. СИМИН

Принцип работы полевого транзистора (ПТ) очень прост (рис. 1). На тонкой полупроводниковой пластинке расположены три электрода. Если приложить напряжение между электродами 1 (истоком) и 2 (стоком), то по пластинке, называемой каналом, потечет ток. Величина протекающего по каналу тока изменяется при приложении к третьему электроду (затвору) управляющего напряжения.*)

Различные типы полевых транзисторов (а их существует довольно много) отличаются друг от друга принципом работы затвора. Существуют ПТ, в которых роль затвора играет $p-n$ -переход, контакт металл — полупроводник, структура металл — диэлектрик — полупроводник (МДП-структура) и т. д.

На рисунке 2 показан ПТ, в котором в качестве затвора используется $p-n$ -переход, смещенный в обратном направлении. Как известно («Физика 9» §79), на границе между электронным (n -типа) и дырочным (p -типа) полупроводниками образуется слой, обедненный свободными носителями тока (запорный слой). Если приложить к $p-n$ -переходу запирающее напряжение U_z : «плюс» к n -типу и «минус» — к p -типу, то ширина этого слоя растет. Поскольку свободных носителей в запиорном слое нет, ток через него не протекает. Таким образом, увеличение напряжения на затворе приводит к сужению канала, по которому протекает ток, и при неизменном напряжении сток — исток происходит уменьшение тока через транзистор. Еще большее напряжение на затворе полностью перекрывает канал, и ток обращается в нуль.

На рисунке 3 изображен другой тип транзистора, чрезвычайно широко используемый в современных ЭВМ, особенно в микрокалькуляторах. В качестве затвора в этом ПТ используется МДП-структура. Металлический затвор отделен от полупроводниковой пластины тончайшим (сотые доли микрона) слоем двуокиси кремния SiO_2 , которая является хорошим диэлектриком. Поэтому транзисторы этого типа иногда называются также МОП—ПТ (металл—окисел—полупроводник). На пластине кремния p -типа под стоком и истоком созданы области n -типа (рис. 3, а). Напряжение сток—исток $U_{си}$, таким образом, прикладывается к двум последовательно соединенным $p-n$ -переходам. Какова бы ни была полярность напряжения $U_{си}$ в отсутствие напряжения на затворе, один из $p-n$ -переходов всегда оказывается запиортым. В таком состоянии сопротивление $p-n$ -перехода очень велико, и ток, протекающий через транзистор, близок к нулю.

*) Поскольку управление сопротивлением канала производится электрическим полем затвора, транзисторы этого типа и называются полевыми.



Рис. 1.

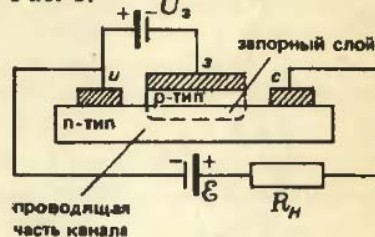


Рис. 2.

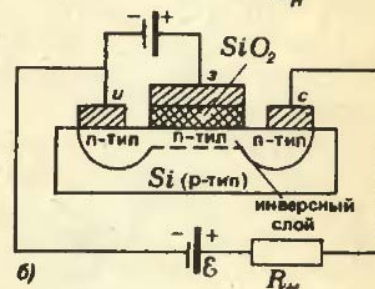
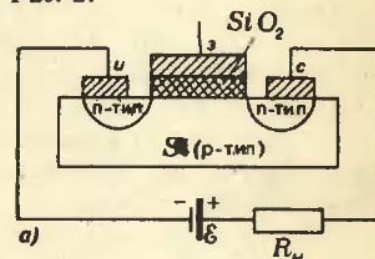


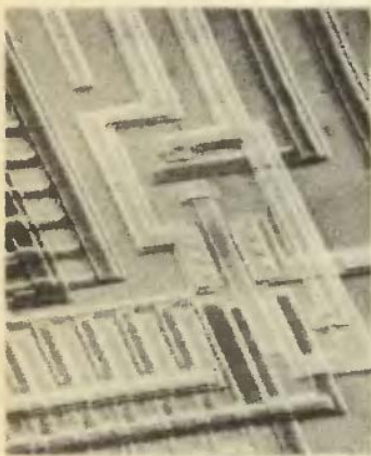
Рис. 3.

Большие интегральные схемы (БИС) для ЭВМ, содержащие на одном кристалле десятки и сотни тысяч транзисторов, в настоящее время изготавливаются из кремния. Подвижность электронов в кремнии $\sim 0,1 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. К началу 90-х годов нашего века ожидается появление БИС на основе арсенида галлия (GaAs). Подвижность электронов в GaAs $\sim 1 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. В исследовательских лабораториях созданы структуры, имеющие подвижность до $100 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, пригодные для изготовления полевых транзисторов.

Минимальная достижимая длина канала L определяется совершенством технологии. Для полевого транзистора 60-х годов $L \approx 20 \text{ мкм}$. Для современного серийного кремниевого МДП-транзистора $L \approx 3 \text{ мкм}$. В исследовательских лабораториях получены приборы с $L \lesssim 0,3 \text{ мкм}$.

Собственное предельное время переключения «3 мкм — транзистора» — $3 \cdot 10^{-11} \text{ с}$. Практическая скорость сраба-

тивания современной серийной логической МДП-ячейки составляет $5 \cdot 10^{-9}$ с. Рекордно малое время переключения МДП-транзистора, полученное в 1984 году, составляет $\sim 10^{-11}$ с.



Микрофотография фрагмента МДП-БИС. Длина канала самых больших элементов ~ 10 мкм, самых маленьких ~ 1 мкм.

При громадной плотности упаковки элементов на пластине ($\sim 10^5$) и крошечных размерах элементов (≤ 1 мкм), каждая пылинка, севшая на пластину, приводит к выходу из строя всей БИС.



В таких костюмах обычно работают хирурги. Но эта девушка «оперирует» не больного: она проводит операцию по изготовлению БИС.

Если же приложить сравнительно небольшой положительный потенциал к затвору U_z , то по другую сторону диэлектрика, в p -канале, который как бы служит второй обкладкой конденсатора, начнут скапливаться отрицательные заряды. Положительный заряд на затворе индуцирует появление в канале электронов, которые притягиваются полем металлического электрода. При некотором напряжении $U_z = U_0$, называемом пороговым напряжением, в узком слое под затвором концентрация индуцированных полем электронов превысит исходную концентрацию дырок в p -канале. Произойдет изменение характера проводимости (инверсия). Вместо полупроводника p -типа в пределах этого слоя возникнет полупроводник n -типа. В результате исчезают p - n -переходы между стоком и истоком и образуется сплошной проводящий канал (рис. 3, б). В таком состоянии сопротивление транзистора мало.

ПТ, у которых в отсутствие управляющего напряжения на затворе канал для тока открыт и сопротивление мало, называются нормально открытыми. ПТ, у которых, наоборот, в отсутствие управляющего напряжения канал закрыт, называются нормально закрытыми. МДП-ПТ, принцип работы которого рассмотрен выше (рис. 3), относится к нормально закрытым ПТ.

Для того чтобы схема, содержащая ПТ, имела два легко различимых состояния «0» и «1», и таким образом, могла служить элементом логической ячейки, достаточно последовательно с транзистором в цепь сток — исток включить сопротивление нагрузки R_n и источник напряжения \mathcal{E} .

Если в такой схеме используется, например, нормально закрытый ПТ, то в отсутствие напряжения на затворе ($U_z = 0$) сопротивление транзистора очень велико и практически все напряжение источника \mathcal{E} падает на транзисторе. Когда напряжение на затворе превышает пороговое значение U_0 , сопротивление транзистора мало, и все напряжение падает на сопротивлении R_n . Эти два легко различимых состояния соответствуют состояниям «0» и «1» в логических схемах на основе МДП-транзисторов. Достаточно небольшого (≈ 1 В) сигнала на затворе, чтобы перевести транзистор из состояния «0» в состояние «1».

Важнейшим параметром транзистора в качестве элемента логических схем ЭВМ является скорость его переключения из открытого состояния в закрытое и обратно. Эта скорость определяется как свойствами самого прибора, так и схемой, в которую он включен. Самое малое время переключения, которое, в принципе, может быть получено, приблизительно равняется времени прохождения носителей τ вдоль канала под действием приложенного напряжения $U_{си}$. При длине канала L и скорости носителей v время пролета τ составит $\tau = L/v$. Скорость дрейфа электронов (или дырок) в электрическом поле, как известно, пропорциональна напряженности поля E ($v = \mu E$). Коэффициент пропорциональности μ , имеющий размерность $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, называется подвижностью. Поскольку напряженность поля в канале $E = U_{си}/L$, окончательно получаем: $\tau = L^2/\mu U_{си}$. Таким образом, предельное быстродействие полевых транзисторов определяется тем, насколько коротким удастся сделать канал транзистора, и подвижностью носителей в материале, из которого изготовлен транзистор.

О том, каковы реальные размеры транзисторов, скорости их переключения и плотность упаковки в современных ЭВМ, вы узнаете из соседней колонки.



III. Биполярные транзисторы

Доктор физико-математических наук М. Е. ЛЕВИНШТЕИН,
кандидат физико-математических наук Г. С. СИМИН

Принцип работы биполярного транзистора (БТ) довольно подробно рассмотрен в школьном курсе физики («Физика 9», § 81). Поэтому здесь мы ограничимся только кратким описанием основных особенностей работы БТ.

Транзистор состоит из трех слоев полупроводника с чередующимися типами проводимости, то есть представляет собой $p-n-p$ - или $n-p-n$ -структуру.

В $p-n-p$ -структуре в две крайние области транзистора, называемые эмиттером и коллектором, добавлены акцепторные примеси, и ток в этих областях переносится положительно заряженными дырками. В среднюю часть такой структуры, называемой базой, добавлены донорные примеси, что обогащает полупроводник отрицательными электронами проводимости.*)

В $n-p-n$ -структуре соответственно в эмиттер и коллектор добавлена донорная, а в базу — акцепторная примеси.

Широкое распространение получили оба типа транзисторных структур. В дальнейшем мы будем для определенности говорить только о БТ типа $n-p-n$, тем более что в ЭВМ чаще используются именно такие транзисторы.

Рисунок 1 поясняет принцип работы БТ. Внешний источник напряжения, включенный между эмиттером и базой, смещает $p-n$ -переход эмиттер — база в прямом (пропускном) направлении. Второй источник смещает $p-n$ -переход коллектор — база в обратном (запирающем) направлении. При таком включении небольшой ток, протекающий в базе, вызывает появление в цепи коллектора тока, гораздо большего по величине.

Отношение тока коллектора к току базы — коэффициент усиления транзистора по току β — определяется подвижностью носителей тока в материале μ и толщиной базы W . Чем меньше W и больше μ , тем больше коэффициент усиления. Величина β в БТ лежит в пределах от нескольких десятков до нескольких тысяч.

В схемах ЭВМ БТ часто питаются не от двух, как показано на рисунке 1, а от одного источника питания (рис. 2) и работают в так называемом ключевом режиме.



Рис. 1. Схематическое изображение биполярного транзистора.

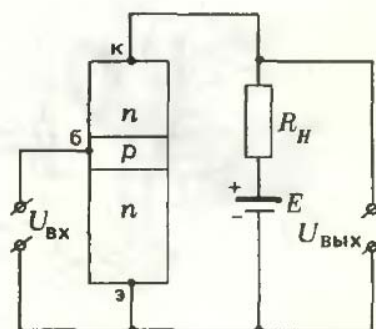
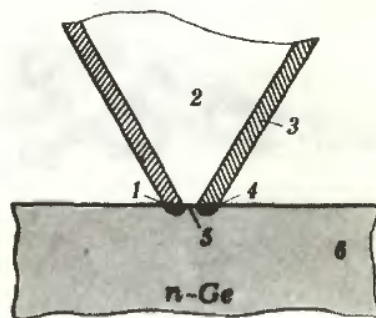
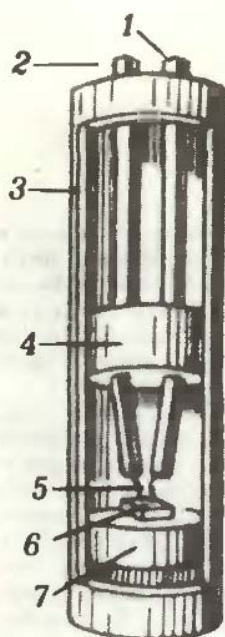


Рис. 2. Работа БТ в ключевом режиме.



Так был устроен первый биполярный транзистор (1947 г.). В пластинку монокристаллического германия (6) с силой вдавливался пластмассовый треугольник (2), обернутый золотой фольгой (3). На вершине треугольника, вдавленной в пластинку, фольга разрезана бритвой. В месте соприкосновения фольги с поверхностью монокристалла образуются области p -типа: эмиттер (1) и коллектор (4); между ними — база (5).

*) Поскольку в транзисторах такого типа одинаково важную роль играют носители обоих знаков — отрицательно заряженные электроны и положительно заряженные дырки, — то такие транзисторы называются биполярными. В полевых транзисторах (см. предыдущий номер журнала) используется движение носителей только какого-либо одного знака — или электронов, или дырок. Поэтому иногда полевые транзисторы называют еще и униполярными.



Первый промышленный биполярный транзистор (1948 г.). Эмиттерный и коллекторный переходы изготавливаются сплавлением в германиевый кристалл тонких проволок. Коэффициент усиления $\beta \approx 2$, время переключения $t_0 \approx 30$ мкс, диаметр корпуса 1 см, высота 4 см.

1 — контакт к эмиттеру; 2 — контакт к коллектору; 3 — корпус; 4 — изолирующая прокладка; 5 — две контактные проволоки; 6 — кристалл германия; 7 — контакт к базе.



Современный сверхвысокочастотный транзистор (увеличение 5). Коэффициент усиления $\beta \approx 30$, время переключения ≈ 200 пс, диаметр корпуса 3 мм, толщина 1,5 мм.

При работе в таком режиме БТ может находиться в одном из двух возможных состояний — открытом или закрытом.

Пусть на вход транзистора, показанного на рисунке 2, сигнал не подан. Напряжение источника питания E смещает переход коллектор — база в обратном (запирающем) направлении, а $p-n$ -переход эмиттер — база — в прямом. Так как сопротивление $p-n$ -перехода в запирающем направлении очень велико, то практически все напряжение падает на коллекторном переходе БТ. Напряжение между базой и эмиттером близко к нулю. Ток через транзистор практически отсутствует. В таком состоянии транзистор «закрыт». Все напряжение источника E падает на транзисторе. Выходное напряжение $U_{\text{вых}} \approx E$ велико.

Небольшой сигнал между базой и эмиттером, смещающий переход эмиттер — база в прямом (пропускном) направлении, обуславливает появление большого тока в цепи коллектор-эмиттер. При этом напряжение источника питания падает на нагрузочном сопротивлении R_n . Напряжение на транзисторе становится малым — транзистор «открыт».

Эти два легко различимых состояния соответствуют состояниям «0» и «1» в логических схемах на основе БТ.

Скорость переключения БТ из открытого состояния в закрытое и обратно определяется как параметрами самого прибора, так и схемой его включения. Самое малое время переключения, которое в принципе может быть получено, определяется временем, в течение которого носители (электроны в $n-p-n$ - или дырки в $p-n-p$ -транзисторах) проходят через базу транзистора благодаря процессу диффузии.

При диффузии (случайном блуждании) носители за время t удаляются от начального положения на расстояние $x = \sqrt{Dt}$, где D — коэффициент диффузии носителей в данном материале*). Отсюда минимально возможное время переключения t_0 в БТ с толщиной базы W определяется как $t_0 \approx W^2/D$.

Следует отметить, что коэффициент диффузии связан с подвижностью носителей μ зависимостью, установленной Альбертом Эйнштейном. В соответствии с соотношением Эйнштейна значение D прямо пропорционально величине μ .

Таким образом, предельно возможное быстродействие биполярных транзисторов, так же как и полевых, тем выше, чем меньше длина пути, проходимого носителями тока (толщина базы W), и чем выше подвижность носителей μ в материале, из которого изготовлен транзистор.

В настоящее время подавляющая часть БТ изготавливается из кремния (Si). Подвижность электронов в Si примерно $0,1 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Наиболее перспективный материал для изготовления БТ ближайшего будущего — арсенид галлия (GaAs). Подвижность электронов в нем — около $1 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Практическая скорость срабатывания современных серийных логических ячеек на БТ составляет 1—10 нс. Рекордно малое время переключения БТ, полученное в 1984 году, равняется 30 пс ($30 \cdot 10^{-12} \text{ с}$).

*) Об этом более подробно можно прочитать, например, в книге М. Е. Левинштейна и Г. С. Симиной «Знакомство с полупроводниками», Библиотечка «Квант», вып. 33. (Примеч. ред.)



Шестой турнир городов

«Я не прошел на Всесоюзную математическую олимпиаду, но прошу допустить меня решать задачи вне конкурса» — с подобными заявлениями часто обращаются в жюри школьники из городов, проводящих Всесоюзную олимпиаду, а иногда даже и из других городов, выражая готовность специально для этого приехать. Что если бы вход на эти олимпиады был свободным для всех? Мы, конечно знаем, что это нереально — ограничены средства, помещения, возможности жюри и т. д. А все-таки...

Желание пробовать свои силы свойственно молодым. Человека, который идет на соревнование, не остановит возможность поражения — оно, может быть, даже необходимо ему, чтобы получить правильные ориентиры в выборе своего пути. Что если всё-таки попробовать найти такую форму организации соревнований, которая позволила бы «скрестить шпaги» более широкому кругу учащихся, чем это позволяют финальные туры олимпиады, сохранив при этом ориентацию на задачи, находящиеся по своему содержанию и уровню в преддверии настоящей науки?

В течение ряда лет такая форма нащупывалась, и теперь можно сказать, что она в какой-то степени найдена. Это — Турнир городов. Создан Центральный оргкомитет Турнира во главе с академиком Пугачевым В. С., а в некоторых городах — местные оргкомитеты. Скорее всего, эта форма будет еще изменяться. Чтобы дать представление об этом соревновании, мы расскажем о прошедших турнирах.

Инициатива проведения первого турнира принадлежит Совету молодых ученых и специалистов при ЦК ЛКСМ Латвии. В турнире приняли участие школьники из Риги, Москвы и Киева. Затем круг городов-участников постепенно расширился. В 1984/85 учебном году в шестом турнире участвовали 28 городов с общим населением 31 млн. чел. Турнир проводился по математике, а в трех городах — еще и по информатике. В дальнейшем предполагается тематическое расширение турнира. Специальная комиссия отобрала задачи и разослала их по городам. Добрая традиция турниров — хорошие задачи. Правда, некоторые из них трудноваты, но за них дается много очков (баллы за полное решение каждой задачи сообщались вместе с условиями). Это вполне естественно для соревнований общесоюзного уровня, школьники нашей страны на международных математических олимпиадах занимали первые места примерно столько же раз, сколько все остальные страны, вместе взятые. При этом трудность задач вполне реалистическая — каждая задача кем-либо из участников была решена, а некоторые участники решили почти все задачи.

И вот в одно воскресенье учащиеся в своих городах одновременно в течение пяти часов решали задачи. Затем все работы были проверены местными жюри. Часть работ направлялась на контрольную проверку в Центральный оргкомитет для выработки единых требований к работам.

Кроме содержательной стороны — интересных задач — турнир имеет и спортивную сторону — он проводится как личное и командное первенство. Организация личного первенства в пределах города — дело местного жюри. Командное же первенство организовано так, что размеры города мало влияют на итог. Показатель командного выступления города определяется как средний балл N лучших работ этого города. Это N для городов с числом жителей свыше 450 тысяч равно округленному до целого числу сотен тысяч жителей города; $N=5$ для городов с числом жителей от 100 тысяч до 450 тысяч, причем средний балл пяти лучших работ для таких городов умножается еще на некоторый поправочный коэффициент k , зависящий от населения города как убывающая функция и не превышающий для этих городов 1,6. Для городов с населением до 100 тысяч жителей показатель не определяется, так как сопоставлять такие города с крупными городами всё же, видимо, не стоит.

В 1984/85 учебном году было проведено два тура турнира — осенний и весенний — на правах двух попыток. Тем учащимся, которые приняли участие в обоих турах, был засчитан лучший из их результатов. В некоторых городах-участниках проводился только один тур. По итоговому показателю на первом месте оказалась Рига — 42 очка. А вот еще несколько городов, имеющих высокие показатели: Белорецк (39), Ленинград (36), Одесса (29), Москва, Севастополь (по 28,5), Свердловск (25,5), Тарту, Петрозаводск (по 24,5). Хорошо выступил гость турнира — болгарский город Ямбол — 26,4 очка.

В 1985/86 учебном году турнир проводится также в два тура, причем весенний тур намечен на 16 марта 1986 г. Заявки на участие в нем высылаются местным оргкомитетом или инициативной группой, связанной с органами просвещения, вузами и научными учреждениями (эта группа берет на себя функции местного оргкомитета) по адресу: 103006, Москва, К-6, ул. Горького, 32/1, редакция журнала «Квант», «Турнир городов. Математика». Просим всех учащихся и преподавателей, заинтересовавшихся Турниром городов, присылать свои идеи, предложения, а также задачи для турнира. Задачи прошлых турниров частично опубликованы в «Кванте» (в некоторых случаях — в усиленном варианте) — это М711—М715 («Квант», 1981 г.), М756, М757 (1982 г.), М807, М808, М816, М818—М820 (1983 г.), М851, М863, М864, М866—М870, М883—М886 (1984 г.), М914, М923, М927, М936—М939 (1985 г.).

Н. Н. Константинов,
зам. председателя оргкомитета



IV. Как изготавливают транзисторы в интегральных схемах

Доктор физико-математических наук М. Е. ЛЕВИНШТЕЙН,
кандидат физико-математических наук Г. С. СИМИН

В прошлых номерах журнала мы рассказали о принципах работы транзисторов. Сегодня речь пойдет о том, каким образом изготавливают современные транзисторы.

В технологии изготовления полевых и биполярных транзисторов так много общего, что достаточно рассмотреть ее на примере только биполярного транзистора, устройство которого несколько сложнее.

На рисунке 1 показана конструкция биполярного транзистора — элемента интегральной схемы (ИС), используемой в ЭВМ. Эта конструкция так сильно отличается от показанного на рисунке 2 схематического изображения транзистора, обсуждавшегося в предыдущей статье, что на первый взгляд трудно поверить, что это один и тот же прибор. Тем не менее, взглядевшись внимательно, нетрудно увидеть на рисунке 1 то же чередование $n-p-n$ -областей, что и на рисунке 2.

Конструкция, показанная на рисунке 1, называется планарной, то есть плоской (от английского слова plane — плоский): все операции по изготовлению такого транзистора производятся с одной стороны кремниевой (или арсенид-галлиевой) плоской пластины. Планарная технология при изготовлении интегральной схемы является единственно возможной. Во-первых, поскольку при изготовлении ИС на одной пластине размещаются десятки и сотни тысяч транзисторов размером в несколько микрон, точно совместить отдельные элементы каждого транзистора с двух сторон пластины было бы невозможно. Во-вторых, планарная технология позволяет использовать сравнительно толстые (толщиной сто и более микрон) пластины полупроводника. Такие пластины обладают достаточной механической прочностью и удобны в работе. При двусторонней технологии понадобились бы пластины толщиной в доли микрона. Работать с пластинами такой толщины практически нельзя.

Существует довольно много способов изготовления ИС. Одна из широко распространенных технологий, по которой создаются кремниевые БТ, в упрощенном виде показана на рисунке 3.

1. Поверхность кремниевой пластины окисляется. На ней образуется слой двуокиси кремния SiO_2 . Затем поверх окисла наносится тонкий слой светочувствительного полимера — фоторезиста. Фоторезист обладает способностью изменять свои химические свойства под действием света.

К покрытой фоторезистом полупроводниковой пластине прижимается стеклянная пластинка с нанесенным на ней рисунком, составленным из прозрачных и непрозрачных участков, — фотошаблон. После этого фоторезист освещается через фотошаблон, и те участки фоторезиста, на которые попадает свет, приобретают способность растворяться в определенных травителях. Эта операция называется фотолитографией. Она — одна из самых важных в процессе изготовления всех ИС.

Когда пластина с засвеченным фоторезистом погружается в травитель, происходит растворение участков фоторезиста, на которые попадал свет, а также находящихся под ними участков двуокиси кремния. На полупроводниковой пластине в этих местах открываются области чистой поверхности кремния — «окна». Затем в другом травителе, растворяющем незасвеченный фоторезист, но не растворяющем SiO_2 , удаляется оставшийся фоторезист. В результате поверхность пластины представляет собой сочетание «окон» с участками, защищенными слоем прочной, устойчивой к высокой температуре двуокиси кремния — «маской».

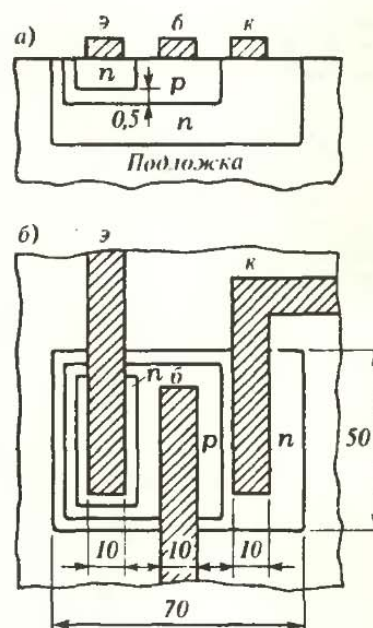


Рис. 1. Планарный биполярный транзистор — элемент ИС на БТ.

а) Транзистор в разрезе.

б) Вид на транзисторную структуру сверху.

Приведены типичные размеры транзистора в мкм; толщина базы $W=0,5$ мкм.



Рис. 2. Схематическое изображение биполярного транзистора.

Современные биполярные транзисторы

Верхний ряд — мощные транзисторы, выдерживающие напряжение между коллектором и базой ~ 1000 В и способные пропускать токи в десятки ампер.

Средний ряд — мощные транзисторы, предназначенные для усиления и генерации сверхвысокочастотных (СВЧ) колебаний. Современные СВЧ транзисторы способны работать на частотах до нескольких десятков гигагерц ($1 \text{ ГГц} = 10^9 \text{ Гц}$).

Нижний ряд — приборы в пластмассовых корпусах. Их появление привело к резкому удешевлению транзисторов. Подлинную революцию в развитии ЭВМ произвело появление интегральных схем (ИС). Внизу справа показана ИС в корпусе. Основа прибора — кремниевая пластина размером 2×3 мм (в центре). На такой пластине размещается до 10^5 БТ.

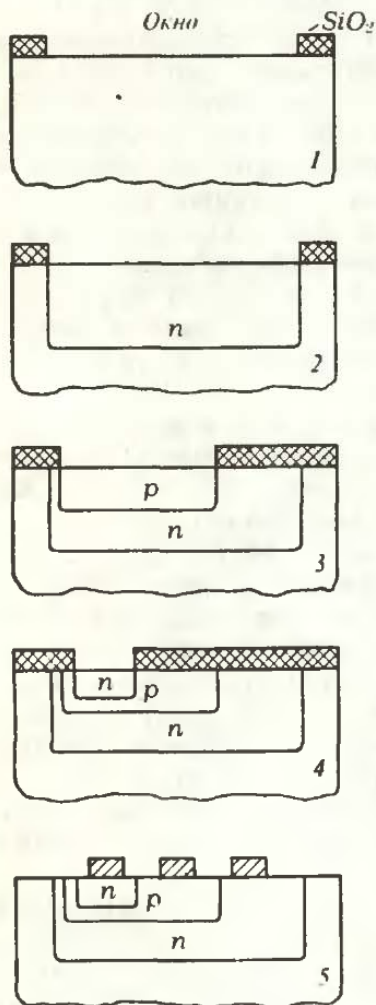
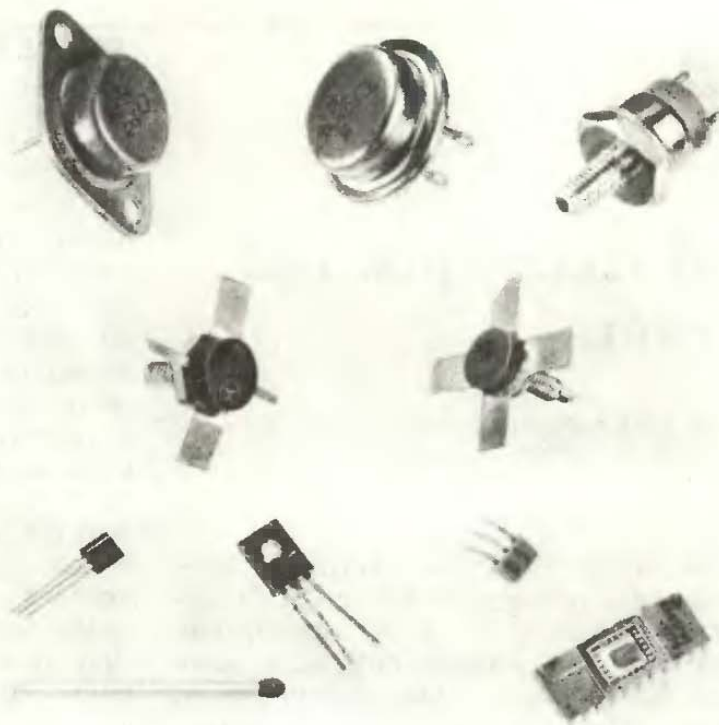


Рис. 3. Этапы изготовления биполярного транзистора.

2. Теперь в пластину при высокой температуре с помощью процесса диффузии вводят атомы мышьяка (As) или сурьмы (Sb), образующих в Si донорную примесь. Там, где поверхность пластины защищена маской SiO₂, атомы примеси не достигают кремния. Таким образом, донорная примесь попадает в кремний только в окнах.

Так одновременно создаются коллекторные области проводимости n-типа всех БТ, входящих в ИС.

3. Маска SiO₂ удаляется путем химического травления и создается новая маска с окнами, соответствующими расположению базовых областей транзистора. Через эти окна проводится диффузия бора (В), являющегося акцептором. Концентрация акцепторов берется больше, чем концентрация доноров, так что те области полупроводника, куда попадает бор, будут областями p-типа. Происходит, как говорят, перекомпенсация. Акцепторная примесь (В) перекомпенсирует донорную.

4. Снова аналогичным методом создаются окна в SiO₂-маске и диффузией донорной примеси формируются эмиттерные n-области. При этом также используется метод перекомпенсации имевшейся здесь акцепторной примеси.

5. На поверхности полученной n—p—n-структуры формируются контакты из алюминия. Для этого пластина покрывается тонкой алюминиевой пленкой толщиной в несколько десятых долей микрона. Затем производится фотолитография с использованием фотошаблона, на котором контактные области и необходимые соединения сделаны непрозрачными. Далее участки засвеченного фоторезиста и находящейся под ним пленки алюминия растворяют в травителях. Полученные таким образом алюминиевые проводники служат элементами, осуществляющими необходимые электрические соединения в ИС.

В больших интегральных схемах (БИС) на каждой пластине расположены десятки тысяч одинаковых транзисторов. В сверхбольших интегральных схемах (СБИС) — сотни тысяч и даже миллионы. И все технологические операции при изготовлении всех транзисторов ИС производятся одновременно. Пластина целиком покрывается окислом. Затем сразу во всех тех местах, куда нужно ввести примесь, в окисле вскрываются окна (то есть сразу изготавливается, например, миллион коллекторов) и так далее. Именно благодаря этой интегрально-групповой технологии все транзисторы имеют одинаковые параметры, а вся ИС стоит лишь немного дороже одного транзистора.



V. Элементарные логические операции

Доктор физико-математических наук М. Е. ЛЕВИНШТЕЙН,
кандидат физико-математических наук Г. С. СИМИН

В предыдущих заметках этой рубрики (см. «Квант», 1985, № 9—12) мы рассмотрели устройство, принципы действия и способы изготовления транзисторов — основы современных ЭВМ. Для того чтобы понять, как с помощью транзисторов в ЭВМ осуществляются простейшие действия, нам потребуется сегодня разговор об элементарных логических операциях.

...Вы входите в вестибюль современного 16-этажного дома. Перед вами двери двух лифтов и одна-единственная кнопка в стене. Вы ее нажимаете и по световому табло над дверью видите, как один из лифтов начинает к вам спускаться. По дороге кабина останавливается — слышен шум открывающихся и закрывающихся дверей — в лифт кто-то вошел. Кабина возобновляет движение. Наконец, двери лифта открываются. Кто-то выходит... Все это так привычно, что практически не задерживает внимания.

А теперь представьте себя на месте инженера, который должен спроектировать электронную схему, управляющую движением лифта. Эта схема должна уметь решать множество задач.

«Если кабины не заняты и нажата только одна кнопка — послать к данному этажу ту кабину, которая ближе. Если обе кабины на одном этаже — послать ту, которая потребляет меньше энергии.»

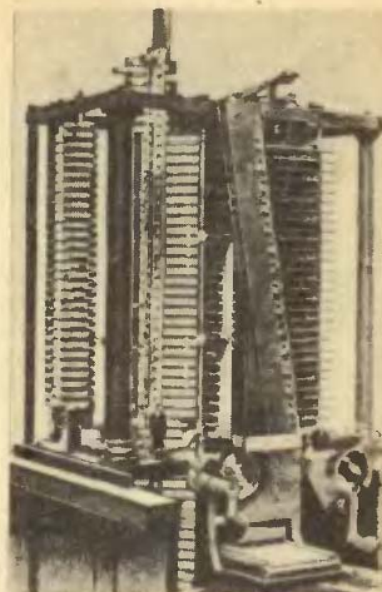
«Если в кабине пассажир и он нажал кнопку данного этажа, а на другом этаже также нажата кнопка, причем лифт едет не вверх, а вниз, а второй лифт не занят, или, если во втором лифте также пассажир...»

Попробуйте представить себе всю совокупность логических задач, которые могут быть поставлены перед электронной схемой при наличии 16 этажей и двух лифтов, и вы убедитесь, что даже такой простенький «процессор» должен уметь справляться с очень непростыми проблемами.

Попытавшись такой процессор спроектировать, вы рано или поздно убедитесь в следующем. Составляя логическую схему, удобно на время забыть о свойствах того прибора, который служит элементной базой вашего процессора, и считать, что в вашем распоряжении имеются элементарные логические ячейки — элементарные схемки, умеющие реализовывать логические функции «И», «НЕ», «ИЛИ».

Чем сложнее функция процессора, который должен быть спроектирован, тем более эффективен такой подход. Для ЭВМ, которая должна решать задачи в тысячи раз более сложные, чем устройство управления лифтом, только он является оправданным.

Разумеется, совсем забыть о свойствах элементной базы не удастся. Рано или поздно встанет множество вопросов, решение которых определяется именно параметрами того конкретного элемента, — электромагнитного реле, транзистора, выключателя и т. д., — на котором построены логические схемы. Как быстро срабатывают логические ячейки? Какую мощность они



Самые первые идеи создания программируемой автоматической цифровой вычислительной машины выдвинуты более 150 лет назад. Они принадлежат англичанину Ч. Бэббиджу, человеку феноменальных способностей, чьи идеи на сто лет опередили время. Более 30 лет, начиная с 1812 года, Бэббидж работал над изготовлением такой машины. «Элементной базой» машины Бэббиджа служили «цифровые» колеса с различным числом зубьев. Часть машины Бэббиджа хранится в научном музее в Лондоне. (Подробно о Ч. Бэббидже можно прочесть в «Кванте», 1985, № 10 в статье «История рождения компьютера».)



Английский философ и математик Дж. Буль разработал в 1854 году алгебру логики, которая впоследствии стала теоретическим фундаментом современных ЭВМ.

Основой этой алгебры, которая теперь называется «булевой», являются любые величины, принимающие только два значения: «да» — «нет», «0» — «1», «включено» — «выключено» и т. д.



Глубокую и принципиальную взаимосвязь булевой алгебры и двоичного характера ключевых электронных элементов установил известный американский математик Дж. фон Нейман. Идеи Неймана заложили основы однородных ЭВМ, состоящих из большого числа идентичных элементарных логических схем, действующих по двоичному принципу. Нейман доказал, что, используя схемы «НЕ», «ИЛИ», «И», можно создать все основные узлы ЭВМ.



Крупный вклад в алгебраическую теорию автоматов внес известный советский математик академик В. М. Глушков. Важные результаты получены им в теории цифровых автоматов, в области приложений вычислительной техники, в разработке новых принципов построения малых ЭВМ.

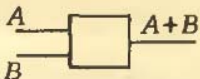
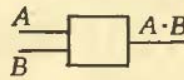
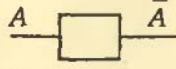
| Операции булевой алгебры | Соответствующие логические схемы |
|---|--|
| Логическое сложение $C = A + B$ (А или В) |  Схема „ИЛИ“ |
| Логическое умножение $C = A \cdot B$ (А и В) |  Схема „И“ |
| Логическое отрицание $B = \bar{A}$ (не А) |  Схема „НЕ“ |

Таблица логических операций.

потребляют? Сколько стоит логическая схема? Насколько надежно она защищена от помех? И т. д.

Но пока вы проектируете логику процессора, обо всех этих вопросах можно не думать. Логическая схема, построенная с использованием логических ячеек типа «И», «ИЛИ», «НЕ», является универсальной; она не зависит от того, на каких элементах реализованы логические ячейки.

Что же представляют собой логические ячейки?

Это электронные схемы, на входах и выходах которых напряжения могут принимать только два вполне определенных значения. Одно из этих значений называется логическим нулем, второе — логической единицей. Эти два значения напряжения обозначают, соответственно, U^0 и U^1 («0» и «1»).

Логические ячейки типа «ИЛИ» (схемы логического сложения) имеют два или более входов и один выход. Если хотя бы на один из входов поступает сигнал «1», на выходе также появляется «1». Условное обозначение схемы «ИЛИ» показано в первой строке таблицы логических операций. Входы схемы обозначены буквами А и В. Сигнал на выходе обозначается $(A + B)$.

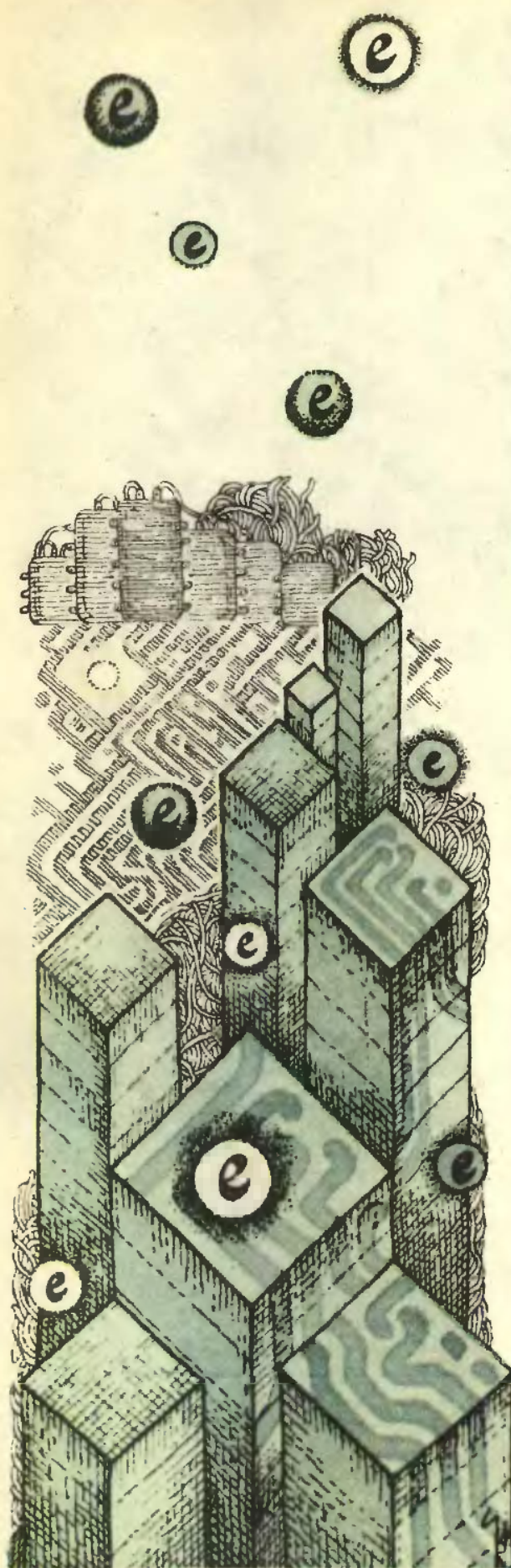
Логические ячейки типа «И» (схемы логического умножения) также имеют один выход и два или более входов. Сигнал «1» на выходе ячейки появляется в том и только в том случае, если на всех входах ячейки также действуют сигналы «1». Если хотя бы на одном из входов действует сигнал «0», то на выходе устанавливается сигнал «0».

Логические ячейки типа «НЕ» (их называют также инверторами или схемами «логического отрицания») имеют один вход и один выход. Если на вход поступает сигнал «1», на выходе появляется «0», и наоборот, если на входе действует «0», на выходе устанавливается «1».

Логические операции сложения, умножения и отрицания подчиняются определенным правилам, устанавливаемым так называемой алгеброй логики или булевой алгеброй.

Манипулируя только логическими операциями «И», «ИЛИ», «НЕ» (иногда в очень сложных сочетаниях), можно, оказывается, осуществить любые действия, позволяющие ЭВМ принимать решения, управлять, перерабатывать информацию и т. п.

Примеры простейших логических схем, построенных на транзисторах, мы рассмотрим в следующей заметке нашей рубрики.



Осуществить комплекс мероприятий по совершенствованию технологии производства. Расширить в двенадцатой пятилетке в 1,5—2 раза применение прогрессивных базовых технологий...

Организовать массовый выпуск персональных компьютеров. Обеспечить рост объема производства вычислительной техники в 2—2,3 раза. Высокими темпами наращивать масштабы применения современных высокопроизводительных электронно-вычислительных машин всех классов.

Из проекта Основных направлений экономического и социального развития СССР на 1986—1990 годы и на период до 2000 года

Города для электронов

Кандидат технических наук
Д. Г. КРУТОГИН

Интегральные полупроводниковые схемы стали в последние годы основным структурным элементом твердотельной электроники. Даже опытный радиолюбитель теперь вместо сборки усилителя из деталей предпочитает использовать готовую микросхему. Тем более так поступают профессиональные конструкторы. В бытовой радиоаппаратуре, например в телевизоре, число микросхем достигает десятков, в специальной — сотен и тысяч штук на изделие. Многоэлементные интегральные схемы называются большими — сокращенно БИС. Применение таких схем оказывается особенно эффективным в вычислительной технике.*)

Как делаются микросхемы? Давайте проследим за основными этапами изготовления БИС, постараемся оценить и трудности, и достижения в их технологии.

БИС под микроскопом напоминает своей четкой планировкой карту большого города. Вот и сравним построение БИС с возведением города, города для электронов.

* От редакции. Этим вопросам посвящен цикл статей под рубрикой «Полупроводниковые элементы вычислительной техники», который публикуется в «Кванте», начиная с 9-го номера 1985 года.

Что нам стоит город построить?

Сначала мы его нарисуем. Любое строительство начинается с общей идеи, с плана. И план, и детальные рабочие чертежи должен подготовить архитектор. Архитекторами БИС являются инженеры-схемотехники. Они создают и план всего «города» — электрическую схему БИС, и проект «типового квартала» — схему отдельного узла, и чертеж конкретного «дома» — основного элемента схемы — транзистора.

Электрическая схема БИС может содержать сотни, тысячи и даже сотни тысяч отдельных элементов — диодов, триодов, резисторов, конденсаторов. Чем больше разнотипных элементов, тем больше сложностей при последующем изготовлении схемы. Поэтому уже на этапе проектирования схему стоит упростить. Существенное упрощение достигается благодаря уникальным свойствам полупроводникового триода — транзистора. Оказывается, при различных способах включения его можно использовать или как диод, или как сопротивление (резистор), или как конденсатор с постоянной или регулируемой емкостью, или как собственно транзистор.

За счет такой универсальности транзистора можно всю электрическую схему представить как схему из транзисторов, работающих в том или ином режиме. На вид схема усложняется (да и какой радиолюбитель поставит вместо резистора триод?), но таковы законы микроэлектроники — при технической реализации большой микросхемы это усложнение обернется упрощением технологического процесса: делать придется в общем однотипные элементы — транзисторы, соединяя их в схему токопроводящими дорожками (проводами).

Однако только по плану микросхеме не сделаешь, хотя и без плана не обойтись. Для начала работы нужен точный чертеж микросхемы — топологическая схема. «Топология» дословно — «описание места». На топологической схеме каждый элемент микросхемы, каждая часть транзистора или проводника обретает форму, размеры, положение. Топологическая схема — то же самое, что проект строительства; в отличие от плана, проект — уже руководство к дей-

ствию. Но между планом и проектом в архитектуре и строительстве стоят две науки о земле — география и геология; иначе говоря, проект, опять же в отличие от плана, должен быть «привязан» к месту строительства. Нельзя построить ни дом, ни квартал, не зная, на что будут опираться эти дома, куда потекут дождевые воды или подуют ветры. Архитектор большой микросхемы тоже должен думать о фундаменте, об опорной площадке БИС. От выбора фундамента во многом зависит и последующая технология строительства.

На чем стоит БИС?

Чаще всего в качестве строительной площадки для БИС используется пластина из монокристаллического особо чистого кремния. Чтобы ее получить, кремниевый монокристалл диаметром 100—150 мм и длиной 200—300 мм алмазной пилой нарезают на пластины толщиной 0,4—0,5 мм.

Полученные диски тщательно шлифуют и полируют алмазными же пастами до подлинно зеркального блеска. Но и блеск не радует технологов, ибо, несмотря на отсутствие царапин, поверхностные слои атомов кремния в пластине искажены, изуродованы контактом с частицами алмазного абразива. Как ни малы эти частицы (~0,1 мкм), они все-таки в сотни раз больше межатомных расстояний. Созданные ими в кристаллической решетке дефекты (вмятины, микроскопические трещины, сдвиги) неглубоки (по сравнению с толщиной пластины); но расположены они как раз там, где в готовой микросхеме должны двигаться электроны. Для них эти дефекты — то же, что ямы и горы строительного мусора на городских магистралях. Говорить об интенсивном движении в таких условиях не приходится.

Поэтому последняя обработка поверхности пластины — химическая полировка — «нежно» удаляет нарушенные слои кристалла полупроводника, растворяя их. После этого отполированную пластину тщательно моют в специально подготовленной деионизованной воде, сушат — и вот, наконец, стройплощадка для БИС готова.

За время обработки пластина похудела — теперь ее толщина 250—

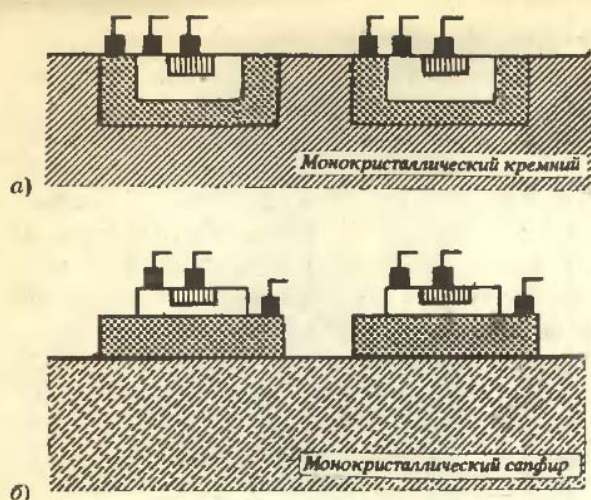


Рис. 1. Таков основной элемент интегральной схемы — транзистор — при «строительстве» на кремниевой пластине (а) и на фундаменте из сапфира (б).

300 мкм. Способ получения пластин не очень экономичен: алмазная пила толщиной 300 мкм, а затем шлифовка переводят в опилки более 60 % объема монокристаллического кремниевого слитка, полученного ценой немалых усилий и энергетических затрат. Да и толщина готовой пластины будет использована плохо. Полезная глубина, то есть толщина тех слоев, в которых потекут нужные нам токи, не превысит 1 мкм. Но сделать пластины более тонкими, к сожалению, нельзя — они будут разрушаться при обработке.

В качестве стройплощадки для БИС можно использовать пластинку диэлектрика — оксида алюминия (Al_2O_3), называемого в обиходе сапфиром. Пластинку сапфира полируют так же тщательно, как кремниевую, а затем на нее наносят монокристаллический слой кремния нужной толщины. Сапфир выбран в качестве подложки потому, что расположение атомов на поверхности кристалла сапфира при определенном направлении среза очень близко к структуре кристаллической решетки кремния. Это обстоятельство позволяет вырастить на поверхности сапфира тонкий кристаллический слой кремния — рабочую область будущего транзистора. Комбинация слоев «кремний на сапфире» — ее обозначают КНС — широко используется в технологии изготовления БИС. Она обладает важным преимуществом: сапфир — прекрасный диэлектрик, он обеспечивает пол-

ную электрическую изоляцию отдельных элементов схемы. С точки зрения топологии микросхемы эти элементы в кремниевой схеме подобны блиндажам, врытым в землю, а в КНС-структуре они подобны домикам (рис. 1).

В рамках нашей аналогии современная БИС эквивалентна городу из 100—150 тысяч домов-транзисторов с развитыми системами коммуникаций (дороги, электроснабжение и т. п.). Размеры этого города — от 2×3 мм до 6×8 мм. И на такой стройплощадке мы будем возводить все дома одновременно. Более того, на одной кремниевой пластине мы будем одновременно строить 100—150 БИС-городов (в зависимости от размеров пластины и площади микросхемы). Наша «громкая» стройплощадка в натуральную величину выглядит примерно так, как на рисунке 2.

Возможно, у читателя возник вопрос: а почему бы не делать микросхему на кристалле размером, скажем, 15×15 мм — это ведь тоже немного для пластины диаметром 150 мм, а емкость БИС возрастет на порядок. Оказывается, на кристалле увеличенного размера почти наверняка найдется дефект атомной решетки, способный полностью вывести из строя БИС. На поверхности площадью $1—2$ см² даже у самой лучшей на сегодня пластины встречается хотя бы один дефект. Так что приходится довольствоваться «малым».

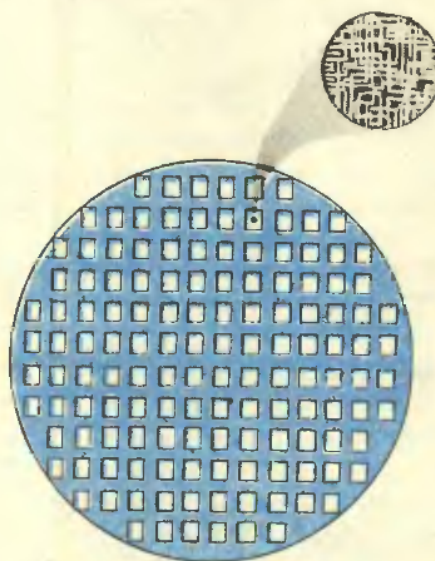


Рис. 2. Примерно так выглядит в натуральную величину «стройплощадка», на которой одновременно возводится до сотни «городов»-БИС. А чтобы разглядеть план отдельного «квартала», необходимо увеличить его в сотни раз.

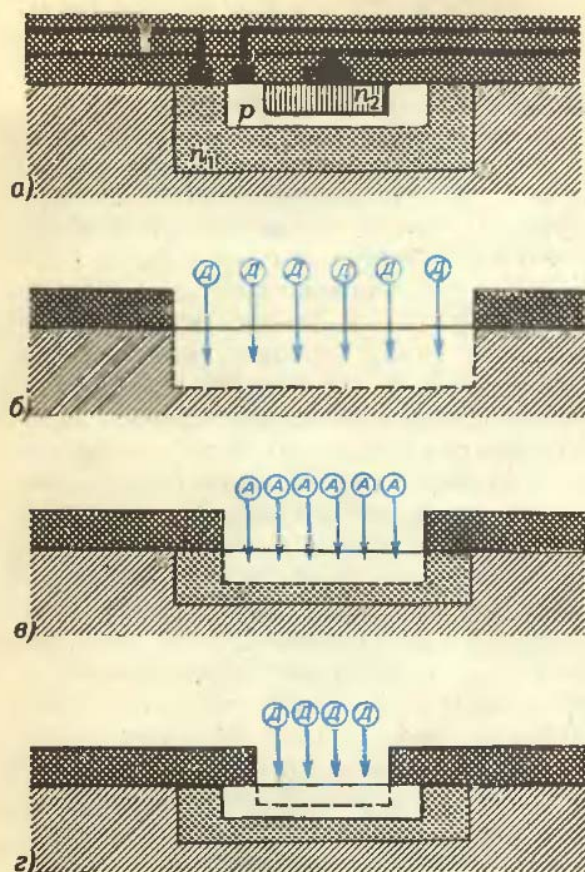


Рис. 3. Постепенно возводятся этажи дома-транзистора (а): сначала коллектор (б), потом база (в), потом эмиттер (г)...

Строить начинаем с ... окон

Итак, мы приступаем к строительству. Дома в нашем городе не низенькие. Посмотрите на рисунок 3,а: три «этажа» в рабочей области транзистора, два этажа металлической разводки да плюс несколько этажей межслойной изоляции; так что в дом-транзисторе по крайней мере 5—7 этажей.

Общее число операций, совершаемых при строительстве интегральной микросхемы, достигает сотни, но при этом некоторые операции повторяются многократно. Мы рассмотрим важнейшие моменты в процессе изготовления БИС.

Рабочие области транзистора — коллектор, база, эмиттер — образуются при легировании кремния соответствующими примесями элементов III и V групп периодической системы. Ввести в твердое тело чужеродные атомы можно, используя явление диффузии. Если пластину кремния нагревать в парах летучего соединения легирующего элемента — например, в парах BH_3 или AsH_3 , — то часть атомов B или As проникнет в кремний.

(Такой процесс называют диффузионным легированием.) Чтобы примеси проникали не всюду, а лишь в места, предусмотренные топологией БИС, надо защитить поверхность пластины экраном, непроницаемым для примесных атомов. В экране надо оставить «окна»: через них на очередной этаж будут поступать «стройматериалы» — атомы примесей (доноры и акцепторы) будут проникать в кремний, формируя рабочие области транзистора (см. рисунок 3, б—г).

Таким экраном для кремния оказался его собственный оксид SiO_2 . Достаточно «толстый» слой оксида легко образуется на поверхности кремния при температуре около 1000°C ; он непроницаем для примесных атомов; устойчив при температуре диффузии; прочно держится на кремнии. Растворение SiO_2 в кислоте (травление) позволяет проделать в нем окна для последующей диффузии. (Далеко не всегда технологам так везет. Например, прекрасный полупроводниковый материал — арсенид галлия GaAs — не образует такого защитного слоя при окислении, и его экранирование превращается в отдельную проблему.)

Легко ли «прорубить окно»?

Прежде чем протравливать окна в SiO_2 , надо защитить от растворения остальную часть оксидной пленки (на этом этапе защитный слой сам нуждается в защите). Здесь включается важнейшая в технологии микроэлектроники процедура — фотолитография. Цель ее — «раскрыть» защитный слой SiO_2 в соответствии с топологической схемой БИС.

Фотолитография — это совокупность операций, связанных с применением светочувствительных составов, подобных тем, которые наносят на фотопленку или фотобумагу. Составы эти называют фоторезистами. Глагол «to resist» в английском языке означает «сопротивляться». Засвеченный фоторезист легко растворяется в травящих растворах, незасвеченный — «сопротивляется» травлению. (Можно подобрать и такой состав, который, наоборот, становится устойчивым после засвечивания.)

На специальной центрифуге жидкий резист тонким ровным слоем размывается по поверхности окисленной пластины кремния и подсушивается.

ется. Затем на пластину, так же как при обычной контактной фотопечати, накладывается стеклянная пластинка, в которой прозрачны лишь отдельные участки — на месте будущих окон. Эта пластинка называется фотошаблоном и заслуживает отдельного рассказа. Но сначала закончим разговор о кремниевой пластине. После наложения фотошаблона производят экспонирование (засвечивание). Экспонированные (через прозрачные окна) участки фоторезиста, растворяясь при травлении, открывают доступ травителю к пленке SiO_2 ; в ней образуются необходимые нам окна, то есть незащищенные участки поверхности чистого кремния, через которые будет идти диффузия. Фоторезист сделал свое дело, и теперь остатки его удаляют. Фотолитографирование, включающее нанесение, экспонирование, травление и удаление фоторезиста, на этом закончилось. Но после диффузии все надо будет начинать сначала.

Портрет будущей БИС

Кто вбивает первый колышек на будущей стройплощадке? Геодезист. Без геодезистов с их нивелирами и теодолитами не осуществить ни один строительный проект. Изготовление фотошаблона — это своего рода «геодезические работы» на микросхемной стройке.



Такова готовая БИС — город из множества домов-транзисторов, спрятанный в небольшую коробочку. Ее компактность и элегантность особенно бросается в глаза на фоне схем, построенных на основе прежних технологий.

Фотошаблоны — это «поэтажные» планы, причем во всем БИС-городе нет двух одинаковых этажей. Размеры плана — приблизительно 5×5 мм. И на такой площадке надо «уложить» до 10^6 элементов. Выполнить подобную задачу без ошибок даже на чертеже удобных размеров, «увязать» чертежи соседних этажей БИС не в состоянии ни один самый аккуратный и старательный конструктор. Даже если бы такой человек нашелся, то слишком долго пришлось бы ему эту работу делать. Рабочие чертежи БИС проектируются на ЭВМ по специальным программам, а потом проверяются по не менее сложным контрольным программам. Готовый чертеж несколько раз переснимают с уменьшением на фотопластинки, доводя его размеры до «натуральной величины» — до размера микросхемы, и многократно размножают, с тем чтобы готовый фотошаблон соответствовал площади кремниевой пластины и позволял экспонировать на нее сразу несколько десятков, а то и сотен «изображений» микросхемы.

Таким образом, фотошаблон — это микротрафарет для разметки этажей. И сколько этажей — столько и фотошаблонов.

Когда белый свет не мил

Если на площадке размером 5×5 мм нужно разместить 10^6 транзисторов, то каждому из них отводится менее 25 мкм^2 . Область эмиттера — самая маленькая рабочая область в транзисторе — должна иметь размеры около $2 \times 3 \text{ мкм}$; ширина металлических проводников — порядка 1 мкм . Возникает вопрос: с какой точностью можно выдержать эти размеры при «строительстве»?

Прежде всего они должны быть соблюдены при изготовлении фотошаблонов. Точность, которую обеспечивает метод фотолитографии, ограничена длиной волны света, используемого при экспонировании. При падении света на край щели в шаблоне происходит дифракция. Как известно, из-за дифракции границы геометрической тени всегда несколько размыты. Четкость изображения зависит от длины волны света — чем меньше длина волны, тем лучше качество изображения. В этом плане синий и фиолетовый свет предпочтительнее, чем

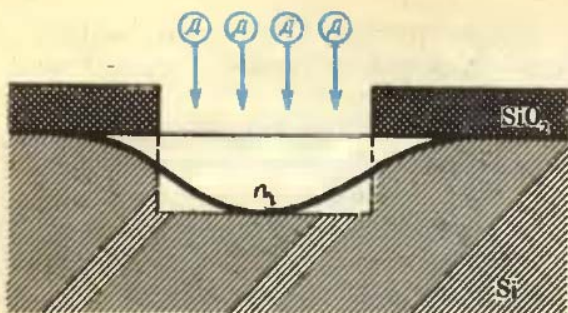


Рис. 4. Вот к чему приводит боковая диффузия: за пределами рабочей области (коллектор, база, эмиттер) концентрация примеси не сразу падает до нуля, а постепенно.

красный. А чтобы нарисовать полосу шириной 1 мкм с точностью хотя бы $\pm 0,1$ мкм, видимый свет (длина волны от $8 \cdot 10^{-7}$ м до $4 \cdot 10^{-7}$ м, то есть от 0,8 мкм до 0,4 мкм) вообще не годится. Можно использовать более короткие электромагнитные волны, например, рентгеновские; но этот метод, называемый рентгенолитографией, имеет свои неудобства.

Обнадеживающие перспективы сулит «засвечивание» резиста электронным лучом — так называемая электронная литография. Электронный пучок движется по шаблону примерно так же, как по экрану телевизора или осциллографа. Отклоняющие системы могут переместить его в любую точку шаблона, а управляя «яркостью» пучка, можно регулировать засветку резиста. Конечно, здесь используются уже не фотоэмульсия, а специальные вещества, разрушаемые электронным пучком.

Оказалось, что электронная засветка слоя оксида кремния ускоряет его травление в кислоте в несколько раз. Это позволяет отказаться от резистных масок и формировать окна прямо в оксидном защитном слое. Пучок электронов нужно сделать необычайно узким и перемещать с точностью до 0,1—0,2 мкм, постоянно регулируя яркость. Какой оператор, даже работая с микроскопом, выполнит эту задачу одинаково успешно миллионы раз по всей площади подложки? Никакой. Эту работу можно доверить только ЭВМ, сопряженной с электронно-лучевым прожектором. (Вот, кстати, пример сращивания ЭВМ с исполнительным агрегатом!) Заложенный в ее памяти проект шаблона, ранее ею же и рассчитанный, ЭВМ превращает в трафарет для разметки БИС. При этом повышается точность изготовления окон.

Шаблоны — главный планировочный инструмент микросхемной технологии; благодаря им БИС-строительство из индивидуального становится массовым, или, как говорят специалисты, групповым.

Будем считать, что шаблоны изготовлены, с их помощью на пластине кремния в защитном слое оксида произведены окна, и мы можем приступить к формированию рабочих областей.

Атомы отпускаются поштучно

Диффузионное легирование, о котором говорилось выше, широко применяется в микроэлектронике. Основное достоинство этого метода — его простота. Но есть у него и недостатки. Вот один из них: атомы примесного элемента, попадающие через окна в решетку кремния, движутся в общем хаотически и, значит, не обязательно перпендикулярно плоскости пластины. В результате вместо ожидаемой четкой формы области коллектора, такой, как на рисунке 3, б, мы получим нечто иное (рис. 4). Искаженные боковые области $p-n$ -перехода ухудшают параметры схемы. Другой недостаток диффузионного легирования: концентрация вводимых примесей ограничена. При определенном значении концентрации наступает насыщение; предел растворимости некоторых примесей в кремнии очень мал.

Распределение примеси по глубине кристалла при диффузионном легировании всегда оказывается таким, как показано на рисунке 5, и изменить его так, чтобы за пределами рабочей области концентрация примеси резко падала, не удастся. Вот поэтому на смену диффузионному легированию пришел процесс, называемый ионной имплантацией, или ионным внедрением. Суть его в том, что легирующие примесные ионы разгоняются в вакууме электрическим полем и, имея значительную скорость, обрушиваются на мишень — пластину кремния. Чем выше энергия ионов, тем глубже проникают они внутрь мишени («глубже» — на доли микрона). Число примесных ионов легко контролировать по величине тока, создаваемого ими в полете. Изменяя направление ионного пучка электрическим или магнитным полем, можно добиться равномерного распределения примеси по нужной площадке. При

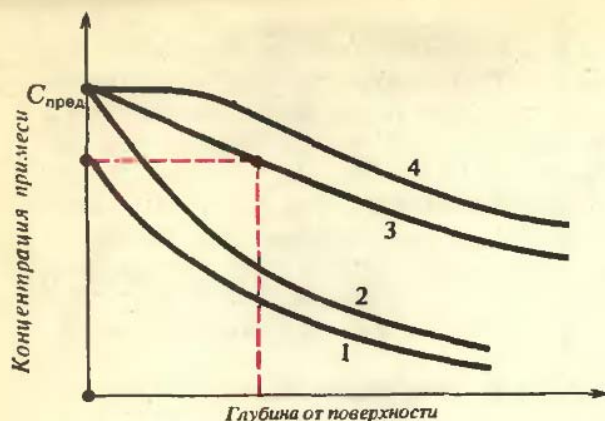


Рис. 5. Распределение концентрации примеси по глубине при диффузионном легировании. Красными линиями обозначен желательный профиль концентрации. Изменяя начальную концентрацию примеси на поверхности (сравните кривые 1 и 2), температуру (для кривой 2 она меньше, чем для 3) или продолжительность процесса диффузии (для кривой 3 в несколько раз меньше, чем для 4), можно получить необходимую концентрацию на заданной глубине.

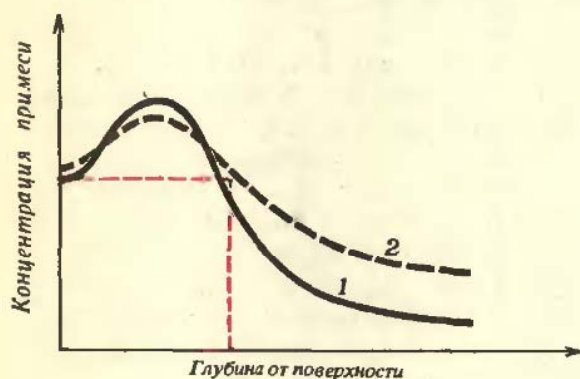


Рис. 6. При ионной имплантации распределение концентрации по глубине зависит от энергии и дозы ионов (кривая 1). Максимальная концентрация может превышать предельное значение, характерное для процесса диффузии. Пунктирная кривая 2 показывает распределение примеси после обработки, устраняющей поверхностные дефекты ионной бомбардировки.

ионной имплантации практически нет бокового проникновения, и профиль распределения примеси по глубине (рис. 6) получается более выгодным, чем при диффузионном легировании.

У метода ионной имплантации есть и свои неприятные стороны. Ионы примеси обычно входят в решетку с энергиями в сотни тысяч электрон-вольт, и за каждым ионом остается след причиненных им разрушений — сдвинутых или выбитых со своих равновесных положений атомов кристалла. При больших дозах имплантации приповерхностные слои материала так искажаются, что теряют подобие кристаллической структуры, становятся аморфными. Чтобы отчасти вос-

становить порядок, пластину придется подвергать дополнительной обработке.

Легирование полупроводников методом ионной имплантации позволяет существенно повысить плотность упаковки транзисторов в микросхеме (за счет точного выполнения заданных размеров рабочих областей).

Транзистор у телефона

Итак, последовательным повторением операций защиты поверхности, нанесения масок и легирования мы создали плотную упаковку транзисторов на пластине БИС. Однако самой схемы у нас пока нет. Мы построили много отдельных домов, но это еще не город. Необходима система коммуникаций; к домам-транзисторам надо подвести энергопитание и линии связи. Делают это опять-таки с помощью фотолитографии. На поверхность кристалла наносят металлическую разводку и контактные площадки. Разводка сложных микросхем бывает и неоднослойной; тогда «этажность» растет за счет слоев разводки и слоев изоляции.

Сечение «проводка» металлической разводки — порядка 1×2 мкм. Представьте, какой бедой обернется для БИС попадание под слой металла ничтожной микронной пылинки, заметить которую можно только в микроскоп! Обрыв цепи выведет из строя участок схемы, а может быть, и всю схему целиком. Не менее опасно попадание пылинки в рабочую область при легировании. Чтобы этого не случилось, в цехах, где «собирают» микросхемы, день и ночь борются за чистоту. Мощнейшие фильтры отлавливают пылинки, каждый работник прежде, чем попасть в цех, проходит под воздушным «обеспыливающим» душем, несколько раз в день проводится влажная уборка. Внутри такого чистого цеха есть особо чистая комната, в которой установлены герметичные боксы — в них и рождаются микросхемы.

Главным источником возможного загрязнения и вообще самым ненадежным звеном в технологическом процессе является человек. Даже при максимальной добросовестности он может ошибиться, допустить неточность. К чему это приведет? Пусть каждую из сотни операций по сборке БИС человек выполняет с надежностью 99 %. Какая часть готовой продукции будет гарантировано надежна? Микросхема калькулятора дает ответ за секунды: $0,99^{100} = 0,36$ — чуть больше трети.

Поэтому очень нужно отстранить человека от непосредственного участия в изготовлении микросхемы. Решение этой задачи — еще один шаг на пути усовершенствования технологии БИС.

(Окончание см. на с. 20)

множение карасей приведет к тому, что со временем и щуки начнут размножаться.

Но вернемся ли мы к точке А? Иными словами, будет ли процесс колебания повторяться периодически? Ответ на этот вопрос может зависеть от выбора начальной точки А (а также от значения параметров системы). К этому вопросу мы вернемся в одном из следующих номеров журнала.

Задачи

1. Найдите уравнение логистической кривой.
2. Являются ли интегральные кривые уравнений (5) и (6) растянутыми логистическими кривыми?
3. Докажите, что интегральные кривые уравнений (5) и (6), расположенные вне полосы между А и В, имеют вертикальные асимптоты.

4. Могут ли пересекаться не совпадающие интегральные кривые логистического уравнения?

5. Докажите, что период T колебания маятника (1) растет с амплитудой.

6. Приблизленно сосчитайте период колебания маятника малой амплитуды a .

7. Найдите предел периода колебаний маятника при стремлении амплитуды к π .

8. Докажите, что период колебания маятника равен производной площади, ограниченной фазовой траекторией $\dot{\theta}^2/2 - \cos \theta = E$ по энергии E .

9. Частицы массы 1 начинают двигаться с нулевой скоростью одновременно из всех точек оси x под действием силового поля $F = \sin x$. Через какое время частицы начнут сталкиваться?

Ответы даны на с. 57. Решения можно найти в следующих книгах:

1. В. И. Арнольд. *Обыкновенные дифференциальные уравнения*. М.: Наука, 1984.

2. В. И. Арнольд. *Математические методы классической механики*. М.: Наука, 1974.

Города для электронов

(Начало см. на с. 6)

После формирования разводки и контактов БИС готовы. Каждую из них тщательно проверяют на работоспособность прямо на пластине. Контрольный автомат, управляемый компьютером, опускает на БИС тончайшие иглы-контакты и посылает в схему серию тестовых импульсов тока (как говорят, «прозванивает» схему). Если схема содержит миллион элементов, то число тестовых импульсов — до десятков тысяч. Ответ экзаменуемой схемы принимает ЭВМ. Если БИС отзывается не так, как надо, или молчит, контрольный автомат пометает ее капелькой магнитной краски. После того как кремниевую пластину разделят на сотни готовых микросхем (это делают алмазным резцом или лазерным лучом), электромагнит выберет меченые забракованные схемы.

А исправные готовые БИС теперь осталось поместить в корпус. Небольшая коробочка из керамики, металла или пластмассы должна оградить микросхему от внешних повреждений, воздействия атмосферы, случайных электрических полей, обеспечить охлаждение работающей микросхемы. Поэтому, несмотря на внешнюю про-

стоту, конструкция корпуса тщательно продумывается и просчитывается. В некоторых типах микросхем стоимость корпуса и работ по «упаковке» достигает трети всей стоимости готовой БИС.

Теперь, когда процесс изготовления микросхемы закончился, кончается и аналогия с градостроительством. Никакой город-новостройка не подвергается испытаниям на устойчивость к стоградусной жаре и к морозу в -60°C , к землетрясению в 9 баллов, к удару при падении с трехметровой высоты; добавьте проверку на герметичность в морском тумане, на выдерживание предельного рабочего режима и т. п. Если БИС все это выдерживает, ее можно передать потребителю.

* * *

Микроэлектроника — это союз многих наук: материаловедения, точной механики, квантовой оптики, электрофизики, фотохимии, кибернетики, ... Нельзя сказать, что здесь главное, что второстепенное. Лучшее, чем располагают сегодня наука и техника, создает технологию производства микросхем. Мы рассмотрели лишь самые типичные и сравнительно простые для понимания элементы технологии. Но и они, и другие варианты технологии БИС полны и явных, и скрытых сложностей. Однако достигнутые успехи и близкие перспективы технологии БИС вселяют надежды на то, что вершины микроэлектронной технологии еще далеко впереди.



VI. Логические схемы на транзисторах

Доктор физико-математических наук М. Е. ЛЕВИНШТЕИН,
кандидат физико-математических наук Г. С. СИМИН

Получив представление об элементарных логических операциях (см. «Квант», 1986, № 1), мы можем теперь познакомиться с тем, как они реализуются с помощью схем на транзисторах.

Простейшая логическая схема, осуществляющая операцию «ИЛИ», показана на рисунке 1. Схема содержит два биполярных транзистора типа « $n-p-n$ ».

Обозначение \lt соответствует биполярному транзистору типа $p-n-p$; обозначение \lt — транзистору типа $n-p-n$.

Наклонная стрелка соответствует эмиттеру, вертикальная черточка — базе, наклонная черточка без стрелки — коллектору.

Коллекторы обоих транзисторов подсоединены параллельно к «плюсу» источника питания \mathcal{E} . Эмиттеры — к нагрузочному сопротивлению R_H . Если напряжение между базой и эмиттером транзистора равно нулю, то переход база — эмиттер закрыт, ток через него не протекает. Поэтому не течет ток и в цепи коллектор — эмиттер (транзистор закрыт). Из рисунка 1 видно, что если сигнал на входах обоих транзисторов отсутствует, то есть напряжение на обоих входах $U_{вх1}$ и $U_{вх2}$ равно нулю, то оба транзистора закрыты. Ток I через нагрузочное сопротивление R_H не протекает, и сигнал на выходе $U_{вых} = IR_H$ также равен нулю. Если хотя бы одно из напряжений, подаваемых на входы схемы, достаточно для отпирания транзисторов T_1 и T_2 , ток в цепи резко возрастает и выходное напряжение существенно увеличивается.

Кремниевые транзисторы обычно закрыты, если напряжение на переходе база — эмиттер меньше 0,6 В. Поэтому в схеме данного типа уровню «логического нуля» обычно соответствует напряжение U^0 , близкое к нулю, а «логической единице» — $U^1 \approx 0,8$ В.

На рисунках 2 и 3 показаны схемы «И» и «НЕ» на биполярных транзисторах. Рассуждая так же, как при анализе схемы «ИЛИ», легко убедиться, что для схемы «И» выходное напряжение $U_{вых} > 0$ только в том случае, если оба транзистора T_1 и T_2 одновременно открыты, то есть на оба входа подано напряжение, соответствующее логической единице ($U_{вх1} = U^1$, $U_{вх2} = U^1$). В схеме «НЕ» $U_{вых} = U^1$ при $U_{вх} = U^0$ и, наоборот, $U_{вых} = U^0$ при $U_{вх} = U^1$.

Важным недостатком логических схем на основе биполярных транзисторов является то, что в одном из состояний схемы через выходное сопротивление R_H протекает большой ток. В ЭВМ, содержащих миллионы логических схем, это приводит к значительному потреблению мощности, разогреву схем в процессе работы и снижению надежности ЭВМ. Этот недостаток исключен в логических схемах на основе комплементарных*) полевых транзисторов — КМОП-схемах.

Пример КМОП-схемы представлен на рисунке 4.

*) «Комплементарные» в переводе с английского означает «дополняющие».

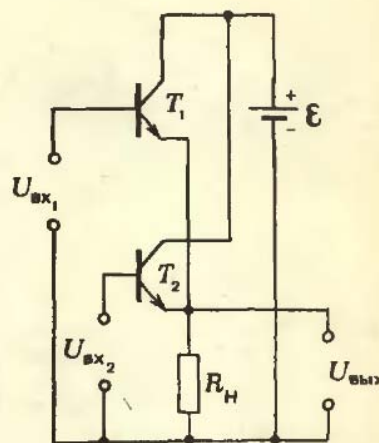


Рис. 1. Пример реализации схемы «ИЛИ» на двух биполярных транзисторах типа $n-p-n$.

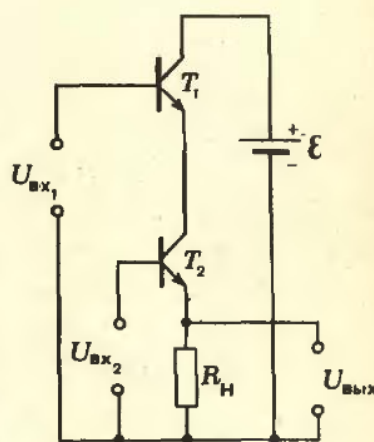


Рис. 2. Пример реализации схемы «И».

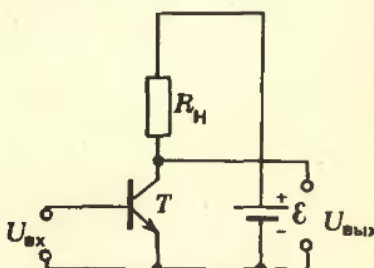
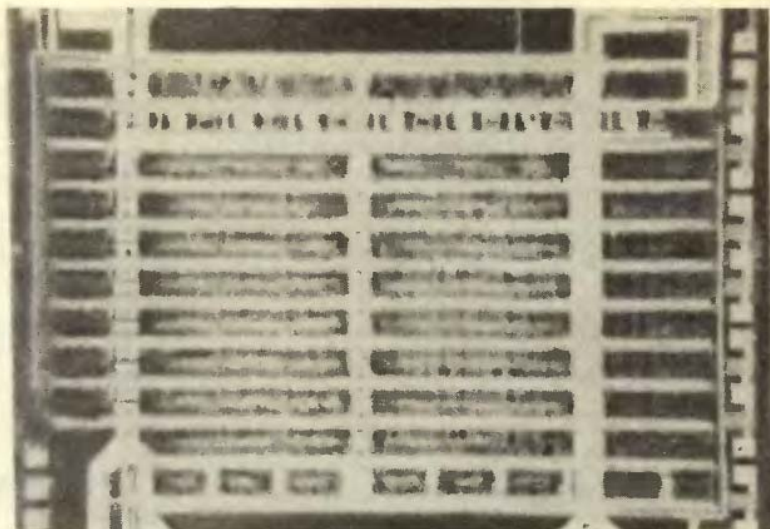


Рис. 3. Пример реализации схемы «НЕ».

В ближайшем будущем появятся ЭВМ, логические схемы которых будут изготовлены из арсенида галлия (Ga As). Эти схемы обладают значительно большим быстродействием.

На микрофотографии показана БИС на основе арсенид-галлиевых полевых транзисторов. Размер БИС — $2,7 \times 2,25$ мм. Длина затвора транзисторов в БИС — ~ 1 мкм. Скорость переключения элементарных логических ячеек БИС — 150 пс. По быстродействию эта схема в четыре раза превосходит лучшую кремниевую БИС аналогичного назначения.

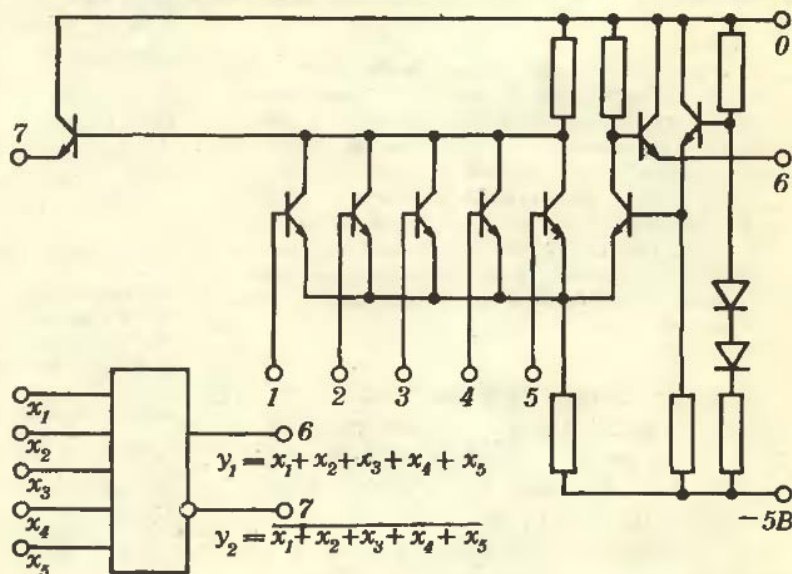


Принципиальная схема и условное обозначение современной логической микросхемы серии К187 на кремниевых биполярных $p-n-p$ транзисторах.

Схема имеет 5 входов и 2 выхода. На одном из выходов (вывод 6) образуется напряжение логической суммы (операция «ИЛИ») сигналов x_1-x_5 , поступающих на выводы 1-5, на другом выходе (вывод 7) — сигнал, сочетающий операции логического суммирования и инверсии (операции «ИЛИ» — «НЕ»).

Существенное усложнение реальной логической схемы по сравнению с простейшей ячейкой, показанной на рисунке 1, вызвано необходимостью обеспечить высокое быстродействие, малую потребляемую мощность, независимость параметров схемы от колебаний напряжения питания и количества подключаемых к ней других логических схем, требующих помехоустойчивости логических сигналов на выходе и т. д.

Время срабатывания микросхемы около 10^{-8} с, потребляемый ток ~ 10 мА.



Вертикальная линия обозначает канал транзистора. Отходящие от нее горизонтальные линии — исток (нижняя) и сток (верхняя). Линия, идущая параллельно каналу рядом с ним, обозначает затвор. Вывод затвора изображается на одном уровне с выводом истока.

Используемые в схеме МОП-транзисторы T_1 и T_2 имеют структуру разного типа. Транзистор T_1 нормально открыт, то есть при отсутствии напряжения на затворе проводимость его канала велика; транзистор T_2 нормально закрыт, при нулевом напряжении на затворе ток по его каналу не течет. При достаточно большом положительном напряжении на затворе U^1 нормально открытый транзистор T_1 запирается, а нормально закрытый T_2 — открывается.

В показанной на рисунке 4 схеме при $U_{вх}=0$ T_1 открыт, а T_2 — закрыт, поэтому все напряжение источника питания падает на транзисторе T_2 ; поскольку выходное напряжение снимается с транзистора T_2 , $U_{вых}$ велико. При $U_{вх}=U^1$ T_1 закрывается, а T_2 — открывается, поэтому $U_{вых} \approx 0$. В обоих состояниях протекающий в цепи ток равен нулю, так как один из транзисторов находится в закрытом состоянии. Поэтому КМОП-схема потребляет энергию от источника только в момент переключения. На основе КМОП-схем созданы микрокалькуляторы и микро-ЭВМ, имеющие рекордно низкое потребление мощности — доли микроватта. Такие микро-ЭВМ могут питаться от фотоэлемента, для работы которого достаточно света неяркой настольной лампы.

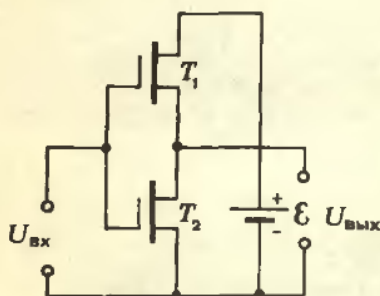


Рис. 4. КМОП-схема «НЕ».



VII. Элемент памяти — триггер

Доктор физико-математических наук М. Е. ЛЕВИНШТЕИН,
кандидат физико-математических наук Г. С. СИМИН

Предыдущий раздел, посвященный логическим схемам (см. «Квант», 1986, № 1, 2), мы начали с обсуждения логических задач, которые приходится решать устройству, управляющему движением лифтов в обычном доме. Теперь, наверное, самое время упомянуть о том, что даже такое простое устройство не может функционировать, если в нем не предусмотрены элементы памяти. В «памяти» управляющего устройства лифта постоянно записано несколько данных: сколько секунд должна стоять открытой дверь после того, как лифт освободится; что делать, если автоматически закрывающиеся двери натолкнулись на препятствие; какова последовательность операций при нажатии аварийной кнопки «стоп» и т. д. Кроме этих постоянных данных, в «память» лифта вводят и записывают оперативные данные, меняющиеся в процессе работы — на каких этажах нажаты кнопки; куда движется лифт в данный момент: вверх, вниз, стоит на месте.

В памяти ЭВМ, решающей сложную задачу, зафиксированы сотни тысяч, а иногда и миллионы данных. Эти данные, как уже говорилось, записаны в форме, которую ЭВМ способна воспринимать и обрабатывать, то есть с помощью «нулей» и «единиц» (в двоичной системе счисления).*)

Ясно, что ни рассмотренные нами элементы вычислительной техники — транзисторы, ни логические схемы на их основе сами по себе элементами памяти быть не могут. Все они после прекращения действия входного импульса сразу возвращаются в исходное состояние.

Для элемента памяти нужно устройство, которое под действием входного импульса могло бы переключаться из состояния «0» в состояние «1» и обратно; и при этом, после прекращения действия входного импульса, запоминало бы свое состояние и могло находиться в нем неопределенно долго (до прихода следующего переключающего входного импульса).

Радиотехническая схема, удовлетворяющая этим требованиям, называется триггером (от английского trigger — защелка).

Понять принцип работы триггера легче всего, воспользовавшись уже известным нам свойством логической схемы НЕ (инвертора).

Рассмотрим два последовательно соединенных инвертора (рис. 1). Напряжение на входе первого инвертора $U_{вх} = x$ может равняться либо U^0 (логическому нулю), либо U^1 (логической единице). Напряжение на выходе инвертора всегда равняется x (не x), то есть U^1 при $U_{вх} = U^0$ и U^0 при $U_{вх} = U^1$. Выходное напряжение первого

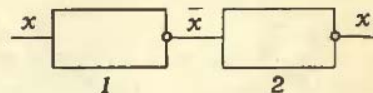


Рис. 1. Последовательное соединение двух логических схем типа «НЕ».

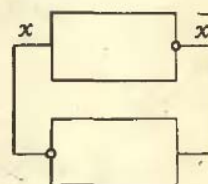


Рис. 2. Кольцо из двух инверторов.

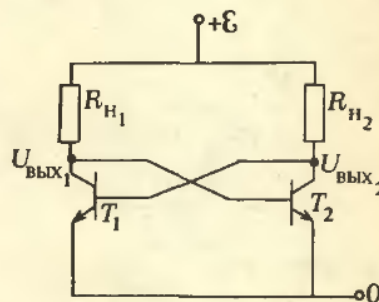
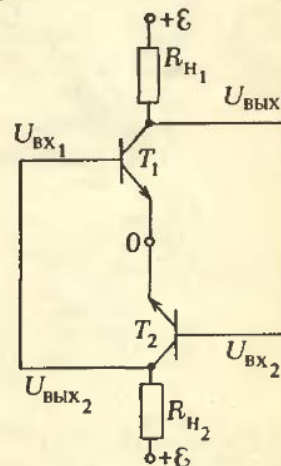


Рис. 3. Триггер на двух БТ. Схемы а) и б) полностью эквивалентны.

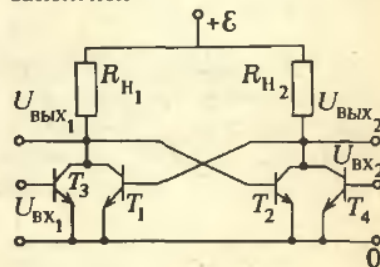
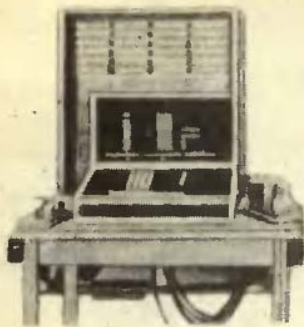


Рис. 4. Ячейка памяти на триггере с двумя входами.

*) Шуточное стихотворение «Необыкновенная девочка» (с. 50) поможет вам разобраться, как связаны двоичная и десятичная системы счисления.



В машине немецкого инженера К. Цузе, часть которой представлена на снимке, программа, то есть последовательность команд, управляющих действиями машины, была задана в виде отверстий, пробитых в обычной киноленте.

Идея представления программы в двоичном коде и хранения ее так же, как и чисел, принадлежит американскому математику Джону Нейману (1946 г.). Он же разработал проект первой ЭВМ с «электронным» хранением программы — «ЭДВАК», — создававшейся с 1945 по 1950 годы. Элементами памяти в этой машине были лампы-триггеры.

* * *

Триггерная память современных быстродействующих ЭВМ выполняется на основе биполярных кремниевых транзисторов. БИС триггерной памяти, фрагмент которой показан на фото, имеет объем до сотен килобит (1 килобит равен тысяче двоичных разрядов). Быстродействие таких БИС порядка нескольких десятков наносекунд, включая и время поиска ячейки с нужной записью.



инвертора является входным для второго. Поэтому на выходе второго инвертора напряжение всегда равно (\bar{x}) (не x), то есть x .

А теперь соединим выход второго инвертора со входом первого (рис. 2). При этом, очевидно, ничего не изменится: ведь напряжение на входе первого инвертора и до присоединения было равно x , и после соединения осталось таким же. Образовавшееся «кольцо» из двух инверторов, очевидно, будет оставаться в равновесии сколь угодно долго. При этом возможны два состояния: либо слева «1», а справа «0», либо, наоборот, слева «0», а справа «1». Схема «запомнит» то состояние, в котором были инверторы в момент образования кольца, и будет находиться в этом состоянии неограниченно долго *).

На рисунке 3, а показана принципиальная схема триггера, реализованная на двух биполярных транзисторах (БТ). Каждый из БТ образует инвертор, а соединение инверторов соответствует рисунку 2: выход T_1 соединен со входом T_2 , а выход T_2 — со входом T_1 .

Схема, представленная на рисунке 3, б — это та же схема, что и на рисунке 3, а, только несколько иначе нарисованная. Посмотрите внимательно на обе схемы и убедитесь в этом. Симметричное и изящное представление триггера, показанное на рисунке 3, б, общепринято, хотя, быть может, оно и не так наглядно поясняет принцип его работы, как первая схема.

Показанный на рисунке 3 триггер не может, однако, служить элементом памяти, поскольку состояние, в котором он находится, нельзя изменить с помощью сигнала.

Схема триггера, дополненная двумя транзисторами (рис. 4), лишена этого недостатка. Под воздействием входных сигналов такой триггер может изменять свое состояние.

Условимся, например, считать, что триггер находится в состоянии «0», если $U_{\text{вых } 2} = U^0$ (в этом случае, как мы знаем, $U_{\text{вых } 1} = U^1$). Если, наоборот, $U_{\text{вых } 2} = U^1$ (а $U_{\text{вых } 1} = U^0$), будем считать, что триггер находится в состоянии «1». Можно сказать и так: в первом случае в ячейку памяти, показанную на рисунке 4, записан «0», во втором — «1».

Пусть в ячейке памяти записан «0». Это значит, что транзистор T_1 заперт (напряжение $U_{\text{баз } 1} = U^1$), а транзистор T_2 открыт ($U_{\text{баз } 2} = U^0$). Если подать на вход транзистора T_3 напряжение $U_{\text{вх } 1} = U^1$, то через него потечет большой ток, напряжение на сопротивлении $R_{\text{н } 1}$ возрастет, а на транзисторе T_1 — уменьшится и станет равным $U_{\text{баз } 1} = U^0$. Но напряжение на T_1 служит входным сигналом для инвертора T_2 . Инвертор T_2 «перевернется»: транзистор T_2 «заперется». На его выходе появится напряжение $U_{\text{вых } 2} = U^1$. Это напряжение поступит на базу транзистора T_1 и... ничего не изменит. Транзистор T_1 и так открыт; напряжение на его выходе $U_{\text{вых } 1} = U^0$. В результате ячейка памяти перейдет во второе возможное стабильное состояние, которому, по условию, соответствует «1».

Это новое состояние будет сохраняться неопределенно долго; пока на вход транзистора T_4 не поступит входной сигнал U^1 . После этого триггер вновь «перевернется» и в ячейке памяти снова окажется записанным «0».

Более подробный разговор о записи, хранении и считывании информации в ЭВМ будет продолжен в следующей заметке.

*) Это изящное объяснение принципа работы триггера принадлежит известному советскому ученому и педагогу профессору И. П. Степаненко.

Доминик Франсуа Араго

(Начало см. на с. 9)

плоскости пластинки, то магнит стремится следовать за движением пластинки; если же поворачивается магнит, пластинка стремится следовать за его движением; и это взаимодействие является настолько сильным, что поворачивает магниты или пластинки весом (массой) в несколько фунтов (1 фунт=454 г.). Если магнит и пластинка неподвижны друг относительно друга, то между ними нельзя наблюдать ни малейшего взаимодействия, ни притяжения, ни отталкивания». Попробуйте самостоятельно объяснить это явление.

Большой интерес представляет литературно-историческое наследие Араго. Это и учебники, и различные популярные книги. А его труд «Биографии знаменитых астрономов, физиков и геометров» до сих пор является одним из фундаментальных исследований по истории науки.

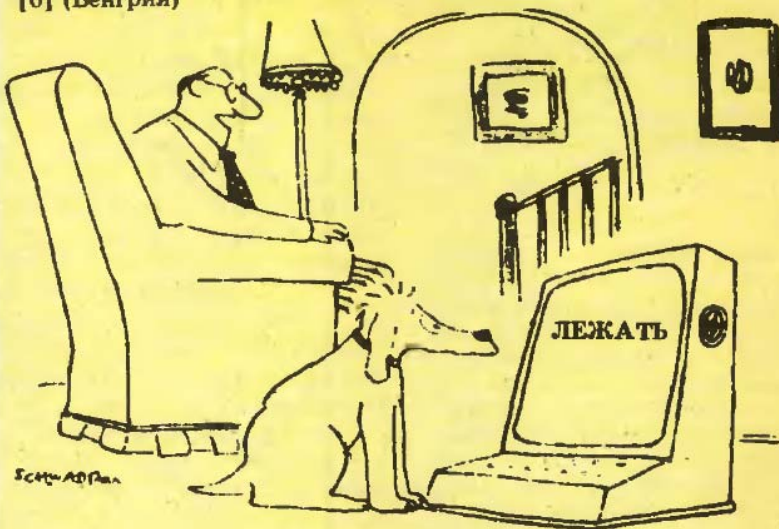
Надо сказать, что наука не была единственным увлечением Араго. Последние 20 лет своей жизни он активно занимался политикой. Избранный в 1831 году в Палату депутатов, в 1848 году он вошел во временное правительство, став военным, а позднее и морским министром. Современники отмечали, что в политике, как и в науке, ему были свойственны честность, беспристрастность, твердость характера, хладнокровие и находчивость в трудных ситуациях.

Девизом жизни Араго были слова, сказанные Даламбером одному молодому человеку, встречавшему трудности при изучении математики: «Идите, идите вперед — и обретете уверенность». Верность этому девизу позволила Доминику Франсуа Араго стать одним из сподвижников развития и совершенствования науки, промышленности и образования во Франции.

Б. И. Геллер

КВАНТ УЛЫБАЕТСЯ

Персональные компьютеры в картинках
(по материалам «PERKOMPUTILA INSTRUADO», 1985, № 2
[6] (Венгрия))



Устные команды ты уже выполняешь, попробуй освоить компьютерное управление.



Необыкновенная девочка

А. Н. Стариков

Ей было тысяча сто лет,
Она в сто первый класс ходила,
В портфеле по сто книг носила —
Все это правда, а не бред.
Когда, пыля десятком ног,
Она шагала по дороге,
За ней всегда бежал щенок
С одним хвостом, зато стоногий.
Она ловила каждый звук
Своими десятью ушами,
И десять загорелых рук
Портфель и поводок держали.
И десять темно-синих глаз
Рассматривали мир привычно...
Но станет все совсем обычным,
Когда поймете наш рассказ.



VIII. Регистры

Доктор физико-математических наук М. Е. ЛЕВИНШТЕИН,
кандидат физико-математических наук Г. С. СИМИН,
В. Я. СИНДАЛОВСКИЙ

ЭВМ часто сравнивают с живым организмом. В этом сложном организме роль сердца играет тактовый генератор, задающий ритм работы машины, роль мозга — процессор, управляющий всеми операциями, производимыми ЭВМ. «Глаза» и «уши» ЭВМ — устройства ввода информации, «нервная система» — сложнейшая сеть проводников, объединяющая в единое целое элементы ЭВМ, «речь» — устройства вывода полученных результатов.

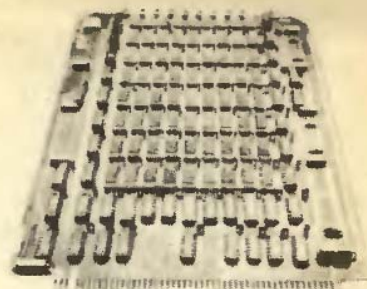
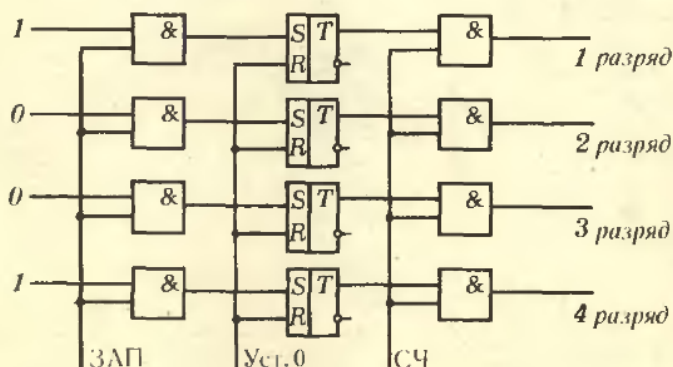
В этом сложном организме мы изучили работу одиночных клеток — транзисторов. Именно из таких «клеток» — биполярных или полевых транзисторов состоят почти все части ЭВМ. Не изучив, как устроена клетка и как она работает, нельзя глубоко понять работу организма. Но с другой стороны, ясно, что ограничившись только знакомством с одиночной клеткой, особенно далеко в исследовании сложного организма тоже не продвинешься.

В этой и следующей заметках мы расскажем, в качестве примера, как на основе уже изученных нами простейших логических схем и триггеров на транзисторах создаются более сложные радиоэлектронные схемы, непосредственно служащие узлами ЭВМ, — регистры и сумматоры.

Вся информация, хранящаяся и перерабатываемая в ЭВМ, представлена, как мы знаем, в форме чисел, записанных в двоичной системе. Регистры используются в ЭВМ для записи, хранения и считывания чисел.

На рисунке показана упрощенная схема регистра для записи чисел, имеющих четыре двоичных разряда (в действительности регистры современных ЭВМ могут содержать до 64 разрядов). Регистр состоит из запоминающих элементов — триггеров, входных схем «И», разрешающих запись, и выходных схем «И», разрешающих считывание числа.

Обратите внимание на условное обозначение триггера. Оно похоже на условное обозначение других логических схем, но содержит в правом верхнем углу значок «Т». Два входа триггера обозначают буквами S (от английского слова set — установить) и R (от слова reset — вернуть, восстановить). Различие между входами чисто условное — электрически они совер-



Так выглядит оперативная память современной ЭВМ. На печатной плате видны кремниевые интегральные микросхемы. Время записи и считывания в регистры такой памяти составляет в среднем 50—100 нс.

При выполнении действий с большими числами мы пользуемся представлением числа в следующем виде:

$0,123826 \cdot 10^5$ порядок

↑ ↑

мантисса основание системы счисления

В регистрах ЭВМ используется аналогичное представление чисел с той только разницей, что основанием системы счисления служит 2 (двоичная система), а мантисса и порядок также записаны в двоичной системе.

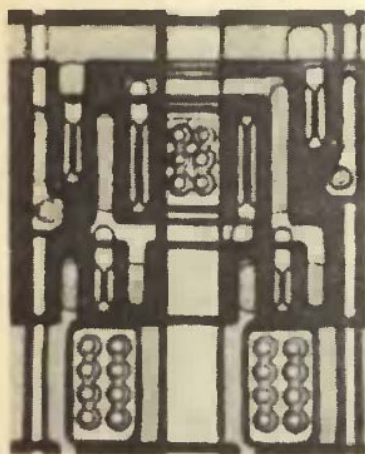
Запись в девятиразрядном регистре ЭВМ числа —4,5:

| | | | | | | | | |
|----------|---------|---------|---|---|----------|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| ↑ | ↑ | └───┘ | | | └───┘ | | | |
| знак | знак | порядок | | | мантисса | | | |
| мантиссы | порядка | | | | рядка | | | |

Первый разряд регистра отводится для записи знака числа (мантиссы). Число 1 в разряде соответствует минусу, 0 — плюсу. Второй разряд показывает знак порядка. В данном примере порядок имеет знак плюс. Разряды с 3 по 5 отведены для записи порядка; в данном примере порядок равен +3. Разряды с 6 по 9 служат для записи двоичной мантиссы. Единича в 6-м разряде соответствует 2^{-1} , в 7-м — 2^{-2} , в 8-м — 2^{-3} и т. д. Таким образом, записано число — $(1 \cdot \frac{1}{2} + 0 \times \frac{1}{4} + 0 \cdot \frac{1}{8} + 1 \cdot \frac{1}{16}) \cdot 2^3 = -4,5$.

В приведенном примере мантисса может изменяться от

$-\frac{15}{16}$ до $+\frac{15}{16}$, а порядок от -7 до $+7$. В ЭВМ серии ЕС в 32-разрядных регистрах хранятся числа от $\approx 5,4 \cdot 10^{-79}$ до $\approx 7,2 \cdot 10^{75}$.



В ЭВМ ближайшего будущего на смену кремниевым БИС придут ИС оперативной памяти на основе полупроводникового материала арсенида галлия. На фотографии показана ячейка такой ИС, имеющая размер 62×65 мкм. Полевые транзисторы, входящие в состав схемы, имеют затворы длиной 1 мкм. Кристалл с объемом памяти 4 кбит содержит 26600 полевых транзисторов и имеет размер $5,6 \times 6$ мм. Быстродействие ИС — 2 нс.



Объем оперативной памяти недостаточен для решения сложных задач на ЭВМ. Основная часть информации хранится во внешней памяти, имеющей гораздо больший объем, хотя и меньшее быстродействие. На фотографии изображено устройство внешней памяти на магнитной ленте, немного похожее на обычный катушечный магнитофон. На ленте длиной 750 м может храниться до 6 млн. 32-разрядных чисел. Время считывания всей такой ленты составляет 6—7 минут.

шенно эквивалентны. Вход R используется для установки начального «нулевого» состояния триггера, а вход S — для подачи сигнала, который необходимо запомнить. Выход триггера, напряжение на котором устанавливается равным «1» при подаче «1» на S , называется основным (верхний вывод на рисунке 1), а второй вывод, напряжение на котором инверсно по отношению к входному сигналу, называется дополнительным. Инверсия, так же как и в схемах типа «НЕ», обозначается кружком.

Входы «установка нуля» R всех триггеров соединены; на них перед записью подается сигнал «1», в результате чего на всех основных выходах триггеров устанавливается «0».

Проследим, как происходит запись числа в регистр. Каждая из входных схем «И» имеет два входа. Один из них (нижний на рисунке 1) — общий для всех схем. Проводник, соединяющий эти общие входы, называется шиной записи (ЗАП). Если на шину записи подано нулевое напряжение, то на всех выходах схем «И» также будет нулевое напряжение, независимо от сигналов на вторых, «сигнальных» входах — таково свойство схем типа «И» (см. заметки в № 1, 2 «Квант», 1986). Однако, если на шину записи ЗАП подается сигнал «1» — разрешение записи, — то напряжение на выходах схем «И», а следовательно, и на S — входах триггеров будет зависеть от того, какой сигнал поступает в этот момент на вторые, сигнальные входы схем «И».

На рисунке 1 для примера показана запись числа 9 (1001). В первом и четвертом разрядах на сигнальных входах сигнал «1». Если на шине ЗАП также сигнал «1», то на вход S триггеров 1-го и 4-го разрядов поступит сигнал «1», который «перевернет» эти триггеры. В 1-м и 4-м разрядах запишется «1». В разрядах 2 и 3, где на сигнальных входах «0», на выходах схем «И» также будет «0» и в триггерах останется записанным «0».

Действие выходных схем «И» аналогично действию входных. Как только на шину считывания (СЧ) будет подан сигнал «1», на выходах схем «И» появятся сигналы «1» в тех разрядах, в которых на основном выходе триггера была записана «1».

В схемах реальных регистров используются и дополнительные выходы триггеров. На этих выходах создается так называемый «обратный код» записанного числа, в котором на месте «1» находятся «0» и наоборот. Обратный код используется в ЭВМ для осуществления некоторых арифметических операций с двоичными числами.

Совокупность регистров, используемых ЭВМ для запоминания программы работы, исходных и промежуточных данных математических действий, называется оперативной памятью. Оперативная память одной из больших отечественных ЭВМ «БЭСМ-6» содержит 32768 ($32768 = 2^{15}$) регистров, каждый из которых позволяет хранить 48-разрядные двоичные числа.

От оперативной памяти требуется высокое быстродействие, потому что она должна успевать записывать и считывать числа с такой же скоростью, с какой машина производит вычисления. Среди современных промышленные интегральные схем наибольшим быстродействием обладают ИС на основе кремниевых биполярных транзисторов. Поэтому оперативная память больших ЭВМ выполняется из логических схем и триггеров на биполярных транзисторах.

Регистры микрокалькуляторов изготавливаются на основе полевых МДП-транзисторов. Быстродействие такой памяти значительно ниже, но зато МДП-транзисторы потребляют гораздо меньше энергии. Благодаря этому микрокалькуляторы могут десятки часов работать от миниатюрной батарейки.

Избранные школьные задачи

Восьмой класс

1. Найдите наименьшее значение выражения $2x^2 - 2xy + 5y^2 + 2x + 2y$.
2. Найдите сумму $1 \cdot 3 + 3 \cdot 5 + 5 \cdot 7 + 7 \cdot 9 + \dots + 999 \cdot 1001$.
3. Известно, что $n-1$ делится на 15, а 1001 делится на $n+1$. Найдите n .
4. В прямоугольном треугольнике ABC ($\angle C = 90^\circ$) проведена высота CD . Найдите: а) радиус окружности, вписанной в треугольник ABC , если радиусы окружностей, вписанных в треугольники ACD и BCD , равны r_1 и r_2 ; б) периметр треугольника ABC , если периметры треугольников ACD и BCD равны P_1 и P_2 .
5. На окружности, описанной около правильного треугольника ABC , взята точка. Найдите сумму квадратов расстояний от этой точки до вершин треугольника, если сторона треугольника равна a .

Девятый класс

6. Решите систему уравнений

$$\begin{cases} x_1 + 2x_2 + \dots + 9x_9 + 10x_{10} = 55, \\ x_2 + 2x_3 + \dots + 9x_{10} + 10x_{11} = 55, \\ \dots \\ x_{10} + 2x_{11} + \dots + 9x_{18} + 10x_{19} = 55. \end{cases}$$
7. Докажите неравенство

$$\frac{xy}{z} + \frac{yz}{x} + \frac{xz}{y} > x + y + z \text{ при } xyz > 0.$$

8. Пусть AD — биссектриса угла A в треугольнике ABC . Докажите, что

$$AD^2 = AB \cdot AC - BD \cdot CD.$$

9. Докажите, что произвольную треугольную пирамиду можно рассечь плоскостью так, чтобы в сечении получился ромб.

10. Решите уравнение

$$4x^2 - 4x - 3 = 4 \left\lfloor \frac{2x-1}{2} \right\rfloor.$$

(Здесь квадратные скобки означают целую часть числа.)

Десятый класс

11. Решите систему уравнений

$$\begin{cases} x^3 = 7x + 2y, \\ y^3 = 2x + 7y. \end{cases}$$

12. На стороне BC треугольника ABC найдите такую точку D , чтобы окружности, вписанные в треугольники ABD и ACD , касались друг друга.

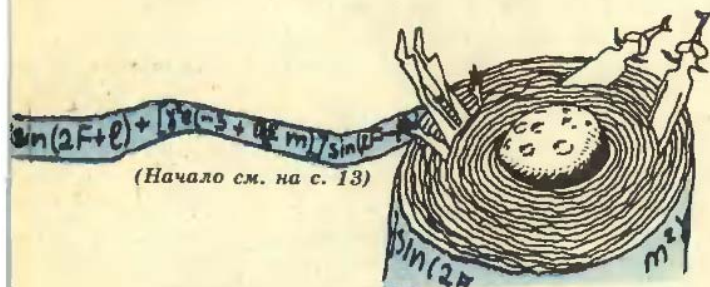
13. Решите уравнение

$$x + \frac{x}{\sqrt{x^2 - 1}} = \frac{35}{12}.$$

14. Сколькими разными способами из листа клетчатой бумаги $m \times n$ можно вырезать прямоугольник со сторонами, идущими по линиям сетки?

15. При каком положении в пространстве спичечной коробки площадь ее тени будет наибольшей? (Тень — это ортогональная проекция на горизонтальную плоскость.)

Публикацию подготовил А. А. Егоров



(Начало см. на с. 13)

учтены не только солнечные возмущения, но и влияние несферичности Земли, притяжение планет, небольшая релятивистская поправка. И все же теория Брауна обнаруживала странные неувязки, давала хотя и очень малые, но заметные расхождения с наблюдениями. Уже в 40-х годах нашего столетия было установлено, что теория здесь опять не виновата, а имеет место неравномерность вращения Земли, а значит, и неравномерность времени, которое определяется по вращению нашей планеты. С переходом к эфемеридному времени, текущему равномерно (оно определяется с помощью атомных часов), все неувязки отпали.

Развитие космических полетов, в

том числе к Луне, установка на поверхности Луны угольковых отражателей для лазерной локации существенно повысили требования к точности лунной теории. Теперь расстояние до Луны мы можем определять с точностью до 25 см. Совершенствование ЭВМ открыло новые возможности.

Группа французских ученых сумела с помощью ЭВМ проверить теории Делоне и Хилла — Брауна и получила все нужные величины с потрясающей точностью: до $1''$ по углам и с «лазерной» точностью по расстоянию. Для этого пришлось брать в разложениях уже много тысяч членов. Впрочем, для ЭВМ это особого труда не составило. Созданная таким образом теория была затем с успехом применена и к изучению движения искусственных спутников Земли.

Так завершилась многовековая история построения теории движения Луны. Теперь мы знаем, что скрывается за столь, казалось бы, простой фразой: «Луна движется вокруг Земли по эллипсу...»



IX. Сумматор

Доктор физико-математических наук М. Е. ЛЕВИНШТЕЙН,
кандидат физико-математических наук Г. С. СИМИН,
В. Я. СИНДАЛОВСКИЙ

Сумматор, как следует из его названия, предназначен для выполнения в ЭВМ операции сложения. Если учесть, что все математические операции, осуществляемые ЭВМ, — умножение, деление, возведение в степень, вычисление интегралов, решение дифференциальных уравнений и т. д. — в конечном счете сводятся к выполнению по определенным программам операций сложения, станет ясно, что сумматор — один из самых важных узлов ЭВМ.

Сумматор складывает два числа, работая по тем же правилам, что и мы, когда выполняем сложение «в столбик».

Сложим, например, два числа: $A=10010$ и $B=1011^*)$. Сумма чисел C равняется

$$\begin{array}{r} 10010 \\ + 1011 \\ \hline 11101 \end{array}$$

Сформулируем правила, которыми мы руководствуемся, выполняя операцию сложения. Мы складываем число, записанное в младшем разряде числа A (a_1), с числом, записанным в младшем разряде числа B (b_1). Если результатом сложения оказались 0 или 1, мы записываем результат в младший разряд числа C (c_1). Однако результатом сложения может оказаться и 2. Такой результат для двоичной системы соответствует переносу единицы в следующий, более старший разряд («ноль пишем, один в уме!»).

Переходя к сложению следующих, вторых разрядов, мы фактически должны складывать не два числа a_2 и b_2 , а три: a_2 , b_2 и третье число, которое мы обозначим p_1 . Если в результате проделанного раньше сложения в младшем разряде единица в старший не переходит, $p_1=0$, а если переходит, то $p_1=1$. Результатом сложения во втором разряде будут два числа: второй разряд суммы c_2 и p_2 — число, подлежащее сложению с a_3 и b_3 в следующем, третьем разряде. Разумеется, как c_2 , так и p_2 могут равняться либо 0, либо 1.

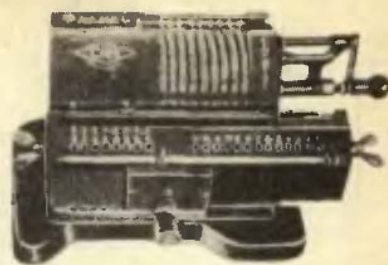
Точно так же выполняется сложение и во всех последующих разрядах, вплоть до старшего.

Для наглядности запишем сформулированные правила в форме таблицы истинности.

Таким образом, схема сумматора, выполняющая сложение одного разряда двух чисел (так называемого одноразрядного сумматора), должна иметь три входа, на которые подаются сигналы a_n , b_n и p_{n-1} , и два выхода, на которых формируются сигналы c_n и p_n .

Одна из возможных схем одноразрядного сумматора показана на рисунке 1.

*) Числа A , B и сумма C записаны в двоичной системе, в которой обычно хранится и перерабатывается в ЭВМ вся информация.



Сумматор эпохи механических вычислительных машин. Время суммирования двух чисел на нем зависело от ловкости, с которой оператор передвигал рычажки и крутил ручку, и составляло от 1 до 10 секунд. Для сложения ручку вращали в одну сторону, а для вычитания — в другую. Умножение и деление сводилось к последовательным сложениям или вычитаниям и занимало до одной минуты.

Быстродействие современных сумматоров на основе кремниевых биполярных транзисторов достигает сотен миллионов сложений в секунду.

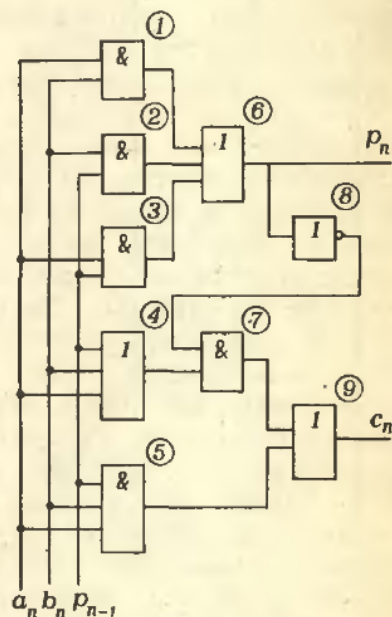
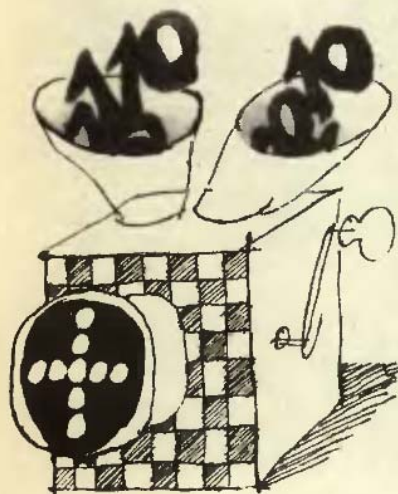


Рис. 1. Одноразрядный сумматор. Входные сигналы обозначены буквами a_n , b_n и p_{n-1} , выходные — c_n и p_n . Цифрами в кружках условно пронумерованы логические схемы, образующие сумматор.

| Значение слагаемых | | | Значение результата | |
|-----------------------|-------|-----------|------------------------|-------|
| a_n | b_n | p_{n-1} | c_n | p_n |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Таблица истинности.



Как бы ни были сложны действия, выполняемые в ЭВМ, в конечном итоге они сводятся к многочисленным операциям суммирования двоичных чисел. Даже такие сложнейшие логические задачи, как игра в шахматы, тоже могут быть решены при помощи операций суммирования. В 1967 году состоялся первый шахматный матч между электронными вычислительными машинами СССР и США. Матч состоял из четырех партий. Глубина просмотра вариантов составляла до 5 полуходов (то есть ходов как своих, так и противника). Со счетом 3:1 победила советская шахматная программа.

Современные шахматные программы уже сейчас играют в силу мастера спорта.

Рис. 2. Многоразрядный сумматор. Он складывает много-разрядные двоичные числа A и B , разряды которых обозначены соответственно a_0, a_1, \dots, a_n и b_0, b_1, \dots, b_n . Разряды суммы C обозначены c_0, c_1, \dots, c_n .

Прежде всего обратим внимание на то, что она содержит только хорошо знакомые нам простейшие логические схемы типа И, ИЛИ и НЕ.

Разберем работу одноразрядного сумматора на примере сложения двух чисел $a_n=1; b_n=0$ при наличии сигнала переноса $p_{n-1}=1$. На входы схемы 1 типа И поступают сигналы $a_n=1$ и $b_n=0$. Следовательно, на ее выходе вырабатывается сигнал 0. Такой же сигнал будет на выходе схемы 2 ($b_n=0; p_{n-1}=1$). На выходе схемы 3 вырабатывается сигнал 1 ($a_n=1; p_{n-1}=1$). Схема 6 типа ИЛИ имеет три входа, на одном из которых действует сигнал 1, а на двух остальных — 0. На ее выходе формируется сигнал $p_n=1$.

Далее, с выхода схемы 6 сигнал 1 поступает на вход инвертора 8, а с его выхода сигнал 0 — на вход схемы И 7. На второй вход схемы 7 подается сигнал с выхода схемы ИЛИ 4. При рассматриваемой комбинации входных сигналов он соответствует 1.

На выходе схемы 7 формируется 0, который поступает на вход схемы ИЛИ 9. На второй вход схемы 9 поступает сигнал со схемы И 5, в данном случае 0. В результате выходной сигнал $c_n=0$.

Как мы видим, схема выдала правильный результат $c_n=0; p_n=1$. Удостоверьтесь сами, что результат сложения будет правильным при любой комбинации входных величин a_n, b_n и p_{n-1} .

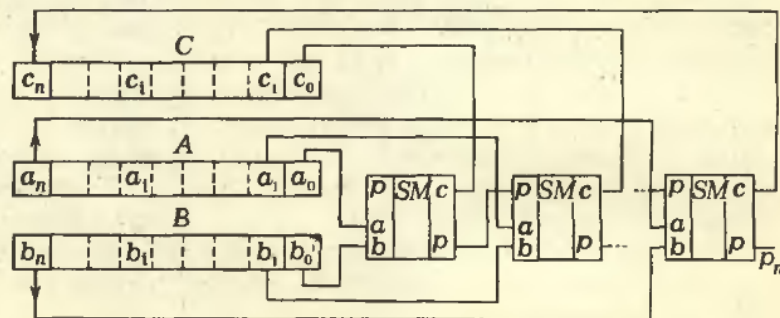
Для суммирования многоразрядных двоичных чисел необходимо соединить между собой столько одноразрядных сумматоров, сколько разрядов содержат складываемые числа (рис. 2).

Вспоминая, что числа в больших ЭВМ могут содержать 48 разрядов, что за каждым квадратиком, обозначающим простейшую логическую операцию, в действительности скрывается электронная схема, содержащая несколько транзисторов, мы приходим к выводу, что сумматор, складывающий многоразрядные числа в ЭВМ, представляет собой весьма сложный узел.

Итак, мы познакомились с работой регистра и сумматора. Обратили ли вы внимание, что чем дальше мы отходим от «одиночной клетки», на основе которой строится ЭВМ, — транзистора, — чем более сложные схемы мы анализируем, тем больше меняется предмет разговора, методы анализа, сам язык, на котором ведется обсуждение. Это не случайно. Из области физики полупроводниковых приборов мы вступили в царство совсем другой науки — схемотехники.

Основы этой науки заложены выдающимися математиками, логиками, инженерами. Она очень интересна и глубоко разработана. Но это предмет совсем другого разговора.

Наш рассказ о полупроводниковых элементах вычислительной техники подходит к концу. И закончим мы его в следующем номере журнала, рассказав о перспективных полупроводниковых элементах для будущих ЭВМ.





Х. Заключение. Полупроводниковые элементы будущих ЭВМ

Доктор физико-математических наук М. Е. ЛЕВИНШТЕЙН,
кандидат физико-математических наук Г. С. СИМИН

Полупроводниковые элементы, на основе которых работают современные ЭВМ, достигли высокой степени совершенства. Время их переключения составляет стомиллионные доли секунды. Размеры их так малы, что на кремниевой пластинке размером 5×5 мм помещаются сотни тысяч транзисторов — полевых или биполярных.

Современные ЭВМ способны управлять космическими аппаратами и ставить диагноз больному, доказывать математические теоремы и руководить предприятиями, переводить научные тексты и планировать перевозки в масштабах целой страны.

Однако существуют задачи, которые пока что не под силу даже самым мощным из нынешних ЭВМ. Например, чтобы составить удовлетворительный прогноз погоды на завтрашний день, провести очень точный расчет поведения самолета в воздушном потоке или электронов в твердом теле, необходимы ЭВМ с быстродействием порядка 1 триллиона операций в секунду. И для таких ЭВМ, разработка которых ведется уже сейчас, понадобятся новые, более совершенные элементы.

Совершенствование элементов ЭВМ происходит сразу в нескольких направлениях. Улучшаются параметры биполярных и полевых транзисторов, создаются и испытываются новые переключательные элементы, предлагаются и проходят всестороннюю проверку новые способы объединения переключательных элементов в Сверхбольшие и Сверхскоростные Интегральные Схемы.

Совершенствование существующих элементов ЭВМ

Из принципа работы биполярных и полевых транзисторов (см. заметки II и III настоящей серии в «Кванте» № 10, 11, 1985 г.) следует, что скорость переключения этих элементов тем выше, чем меньше их размеры и чем больше подвижность носителей тока в полупроводнике, из которого они изготовлены.

Поэтому совершенствование существующих элементов ЭВМ — биполярных и полевых транзисторов — идет двумя основными путями. Создаются новые технологические процессы, позволяющие получать транзисторы с возможно меньшей толщиной базы (биполярный транзистор) или возможно более коротким каналом (полевой транзистор). Идет поиск новых материалов с большой подвижностью носителей для изготовления транзисторов.

Современные технологические процессы позволяют под контролем ЭВМ наращивать слои полупроводникового материала толщиной в один-единственный атомный слой. Практически созданы и проходят испытания приборы с толщинами рабочих элементов $10-15 \text{ \AA}$ (рис. 2). Созданы биполярные транзисторы с толщиной базы $\sim 0,1$ мкм и полевые — с длиной затвора $0,15$ мкм.

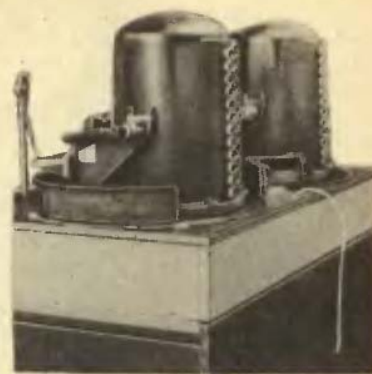


Рис. 1. В таких установках на тонких пленках монокристаллических полупроводников наращиваются очень чистые бездефектные слои толщиной $0,05-10$ мкм, обладающие всеми свойствами, необходимыми для создания БИС.



Рис. 2. Структура из чередующихся слоев двух разных полупроводников, выращенных друг на друге. На электронной микрофотографии каждая темная зона состоит из шести атомных плоскостей GaAs, каждая светлая — из четырех атомных плоскостей $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$. Обратите внимание на четкие границы между полосками, характеризующие точность, с которой регулируется толщина слоев при выращивании.

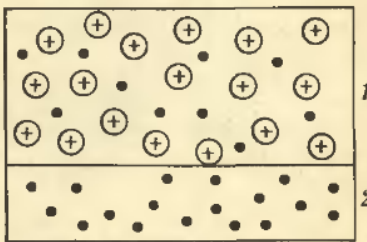


Рис. 3. Селективно-легированная структура. Атомы донорной примеси (обозначены \oplus) вводятся в материал 1 (GaAlAs). Они создают в этом материале свободные электроны (обозначены \bullet). Часть

электронов переходит в полосу материала 2 (GaAs), где создается достаточно большая концентрация электронов с высокой подвижностью.

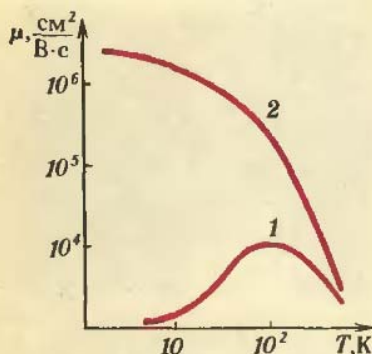


Рис. 4. Зависимость подвижности от температуры: 1 — в GaAs с концентрацией носителей $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$; 2 — в селективно-легированной структуре с концентрацией носителей $\sim 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

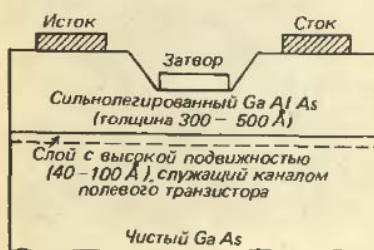


Рис. 5. Полевой транзистор на основе селективно-легированной структуры. На границе сильно легированного GaAlAs и GaAs создается селективно-легированный слой с высокой подвижностью электронов.

Оптическая ИС содержит полупроводниковый лазер и 36 полевых транзисторов, предназначенных для ввода в световой луч логической информации. Сигнал, переданный лазером, улавливается другими кристаллами ЭВМ, где он вновь превращается в электрический. Один луч лазера заменяет сотни проводников, которые необходимо протянуть между БИС, образующими большие ЭВМ.

Новые материалы для изготовления транзисторов разрабатываются сейчас главным образом на основе селективно-легированных структур. За этим новым даже для специалистов термином скрывается такая красивая и плодотворная идея, что мы расскажем об этих структурах подробнее.

Как известно из школьного курса физики, подвижность носителей тока зависит от того, как часто они испытывают столкновения при движении внутри кристалла. Чем эти столкновения реже, тем выше подвижность электронов и дырок.

Важным источником столкновений являются примеси, существующие в полупроводниковом кристалле. Чем меньше примесей содержит полупроводник, тем выше в нем подвижность носителей. Таким образом, казалось бы, ясно, в чем должен состоять главный путь совершенствования полупроводниковых материалов, — в максимальной очистке от примесей.

Дело, однако, обстоит не так просто. Для создания полевых и биполярных транзисторов требуется материал с довольно высокой концентрацией свободных носителей ($\sim 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$). А свободные носители в полупроводнике возникают при введении в него примесей. Электроны — при введении донорской примеси, дырки — акцепторной. Получается заколдованный круг: хочешь иметь в полупроводнике желаемую концентрацию носителей — вводи примеси. А введешь примесь, — понизится подвижность.

Идея селективно-легированных структур состоит в том, чтобы пространственно разделить примеси и носители, которые благодаря этим примесям создаются. Примесь (например, донорная) вводится в полосу материала 1 (рис. 3). Возникшие электроны переходят в расположенную в непосредственной близости полосу материала 2, в которую примесь не вводится. И полоска материала 2, содержащая электроны, но не содержащая примеси, служит каналом полевого транзистора. (Такие структуры поэтому иногда называют еще и структурами с пространственным переходом электронов.)

Разумеется, не любые два материала годятся для изготовления такого «бутерброда», или, как часто говорят, «сэндвич-структуры». Заслуга исследователей, предложивших структуру с селективным легированием, и состоит в том, что они поняли, какие именно материалы могут образовать пару с желаемыми свойствами. Ими оказались GaAs и тройное соединение GaAlAs.

На основе селективно-легированных структур, использующих свойства гетероперехода GaAs/GaAlAs уже созданы полевые транзисторы с уникальными свойствами. Время переключения их составляет 0,01 нс, а энергия, потребляемая при переключении, — всего 10 фДж (1 фДж (читается фемтоджоуль) $= 10^{-15} \text{ Дж}$).

Какой большой выигрыш в подвижности позволяет получить использование селективно-легированных структур, можно видеть из рис. 4.

На рис. 5 показан полевой транзистор, выполненный на основе селективно-легированной структуры. При концентрации электронов в канале полевого транзистора $\sim 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ подвижность их выше, чем в GaAs-транзисторе примерно в 2 раза при комнатной температуре (300 К) и примерно в 100 раз при температуре 80 К.

Помимо структуры GaAs/GaAlAs, исследуются возможности создания полевых транзисторов на основе других селективно-легированных структур.

Создание новых элементов для ЭВМ будущих поколений

Объемные интегральные схемы. Сегодня на кремниевой пластине размером $5 \times 5 \text{ мм}$ удается разместить до 500 000 транзисторов. Предполагается, что к концу 80-х годов на кремниевой (и арсенид-галлиевой) пластине такого же размера будет размещаться несколько миллионов транзисторов. Однако для ЭВМ будущих поколений даже такая огромная плотность упаковки окажется недостаточной. Поэтому уже сейчас ведется работа над

созданием интегральных схем нового типа — объемных ИС, каждая из которых должна содержать десятки и сотни миллионов полупроводниковых приборов.

Объемная ИС напоминает слоеный пирог. Каждый слой этого пирога — уже знакомая нам плоская ИС.

После того как заканчивается формирование обычной плоской ИС на полупроводниковой пластине: изготавливаются все транзисторы, соединения между ними, внешние выводы и т. д., сверху наращивается слой диэлектрика. Затем поверх диэлектрика наращивается слой полупроводника. На этом полупроводниковом слое создается вторая ИС и т. д.

В корпус помещается теперь не пластинка, а «кубик», содержащий много ИС. При этом соединения между плоскими ИС выполняются внутри «кубика» сразу в процессе изготовления объемной ИС. В результате число внешних соединений резко уменьшается. Возрастает надежность и уменьшается стоимость схемы.

Полупроводниковые элементы оптических ЭВМ. В ЭВМ информация, как мы знаем, хранится и обрабатывается в виде электрических сигналов. Однако уже с середины 70-х годов начались работы по созданию ЭВМ совсем иного типа — оптических ЭВМ.

В современных ЭВМ «нулю» и «единице» — двум числам, с помощью которых записывается вся хранимая и перерабатываемая машиной информация, условно соответствуют закрытое и открытое состояние транзисторов. В проектируемых оптических ЭВМ «единице» соответствует прохождение света через оптическую ячейку, «нулю» — поглощение света в ячейке.

Предполагается, что луч полупроводникового лазера, введенный в световод (рис. 6), будет направляться к полупроводниковым оптическим ячейкам, прозрачность которых может изменяться десятки миллиардов раз в секунду с малыми затратами энергии.

Удивительные элементы совершенно необычных ЭВМ

Природа подсказывает нам, что увеличение быстродействия — не единственный путь усовершенствования интеллектуальных возможностей ЭВМ. Клетки человеческого мозга — нейроны — переключаются за время, приблизительно в миллион раз большее, чем «клетки» современных ЭВМ. Однако именно Человек изобрел и ЭВМ и очень многие другие замечательные вещи.

Как устроен человеческий мозг, почему он работает с такой замечательной эффективностью — эти вопросы интенсивно изучаются и еще очень далеки от разрешения. Однако уже сегодня сделаны первые шаги по созданию биомолекулярных ИС — основы будущих биологических ЭВМ. Запатентован метод изготовления ИС на основе белкового материала — полилизина. Созданы молекулярные переключатели, белковые полевые транзисторы, биодатчики сигналов, срабатывающих при ядерных, биологических или химических воздействиях. Предполагается, что плотность упаковки элементов в таких биополимерных структурах приблизится к плотности упаковки структур, ответственных за фотосинтез в зеленых листьях растений и составит более миллиарда на 1 мм^2 . Есть основания надеяться, что биомолекулярные ИС будут не изготавливать, а выращивать, как живую ткань.

Впрочем, если эти надежды оправдаются, такие элементы не будут иметь отношения к полупроводникам.

Но в ближайшее десятилетие именно прогресс в области полупроводниковой электроники определит и уровень достижений в разработке современных ЭВМ.



Рис. 6. Полупроводниковый лазер на основе GaAlAs с длиной волны $\sim 1 \text{ мкм}$. Справа — оптическое волокно диаметром примерно 100 мкм , по которому проходит излучение.

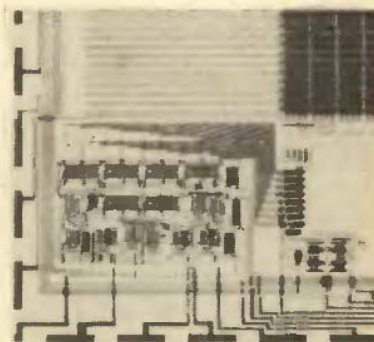


Рис. 7. Одно из перспективных направлений создания ЭВМ следующих поколений основано на использовании явления сверхпроводимости. В структурах из слоев сверхпроводника, разделенных пленкой диэлектрика («сэндвич-структуры»), при очень низких температурах наблюдается эффект Джозефсона. Такие структуры могут находиться в двух устойчивых состояниях — в зависимости от величины протекающего тока на них появляется или исчезает электрическое напряжение. Этим способом удалось создать элементы памяти с быстродействием $\sim 0,01 \text{ нс}$ и фантастически малым тепловыделением $\sim 0,1 \text{ фДж}$. На снимке показана часть интегральной схемы, разработанной в исследовательской лаборатории фирмы «IBM», в которую входят 2048 сверхпроводящих ячеек памяти.