



Иллюстрация: группа людей, идущая по дорожкам печатной платы, символизирующая взаимодействие человека и электроники.

ЭЛЕКТРОННЫЕ ЦИФРОВЫЕ СХЕМЫ

Изобретенная в 1907 году трехэлектродная электронная лампа вплоть до середины нашего века была единственным устройством, позволяющим усиливать электрические колебания различной частоты.

В настоящее время известны десятки принципов, которые могут быть применены для этих целей, а также сотни методов их реализации. Но самым распространенным активным элементом электронной техники остается пока транзистор. В электронных цифровых схемах, как правило, используется только одно его свойство: способность включать или выключать большой электрический ток при помощи малого тока управления. Современные способы построения электронных устройств на транзисторах во многом напоминают тиражирование газет и фотоснимков.

Линейные и нелинейные элементы

Большинство электронных цифровых схем представляет собой *электрические цепи* из резисторов, диодов и транзисторов.

Резистор — элемент, проводящий электрический ток. Он имеет два вывода и вполне определенную величину электрического сопротивления R . Зависимость тока I , проходящего через резистор, от приложенного к нему напряжения U , подчиняется закону Ома

$$I = \frac{U}{R}. \quad (5.1)$$

График этой зависимости представляет прямую линию (рис. 5.1 а), и резистор относится к так называемым *линейным* элементам.

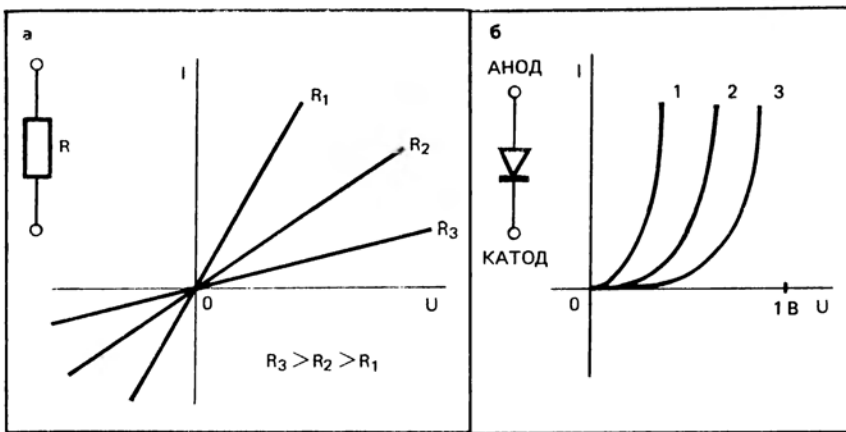


Рис. 5.1. Вольтамперные характеристики резисторов (а) и диодов (б): 1 — диод Шоттки, 2 — германиевый, 3 — кремниевый.

Простейший *нелинейный* элемент — *диод* также имеет два вывода. Он проводит ток, если к его аноду приложен положительный, а к катоду — отрицательный полюс источника электрического напряжения. В этом случае говорят, что диод смещен в прямом направлении.

Напряжение обратной полярности (плюс — к катоду, минус — к аноду) не вызывает тока через диод. Включенный таким образом диод считается смещенным в обратном направлении.

На рисунке 5.1, б представлены графически характеристики широко распространенных диодов: кремниевого, германиевого и диода, образованного переходом металл-полупроводник (диод Шоттки). Строго говоря, диод пропускает ток, хотя и очень малый, и в обратном направлении, но во многих случаях его можно не учитывать.

Транзистор — тоже нелинейный элемент.

5.2. Транзисторы

Транзистор — прибор с тремя внешними выводами: *эмиттером* (Э), *базой* (Б) и *коллектором* (К). Он изготавливается из полупроводникового материала, чаще всего из кремния. Наиболее быстродействующие транзисторы делаются из арсенида галлия, но пока они встречаются сравнительно редко.

Присоединение эмиттер транзистора к проводу, потенциал которого равен нулю. Такой провод называют общим, «землей» или «корпусом». Если при этом коллектор должным образом подключен к источнику питания, то при некоторых условиях изменения тока базы приведут к точно таким же по характеру, но во много раз большим по величине, изменениям тока коллектора, т. е. ток

в цепи коллектора может быть во много раз увеличенной копией тока в цепи базы.

Переход база-эмиттер обладает ярко выраженными нелинейными свойствами. Его вольт-амперная характеристика подобна кривым на рисунке 5.1 б. Поэтому ток в цепи базы протекает только при положительных значениях переменного напряжения на базе. Отрицательные же значения напряжения независимо от их величины вообще не создадут никакого тока базы.

Для неискаженного преобразования напряжения на базе в ток переход база-эмиттер смещают в прямом направлении («приоткрывают») при помощи дополнительного источника постоянного напряжения — чаще всего части напряжения источника питания.

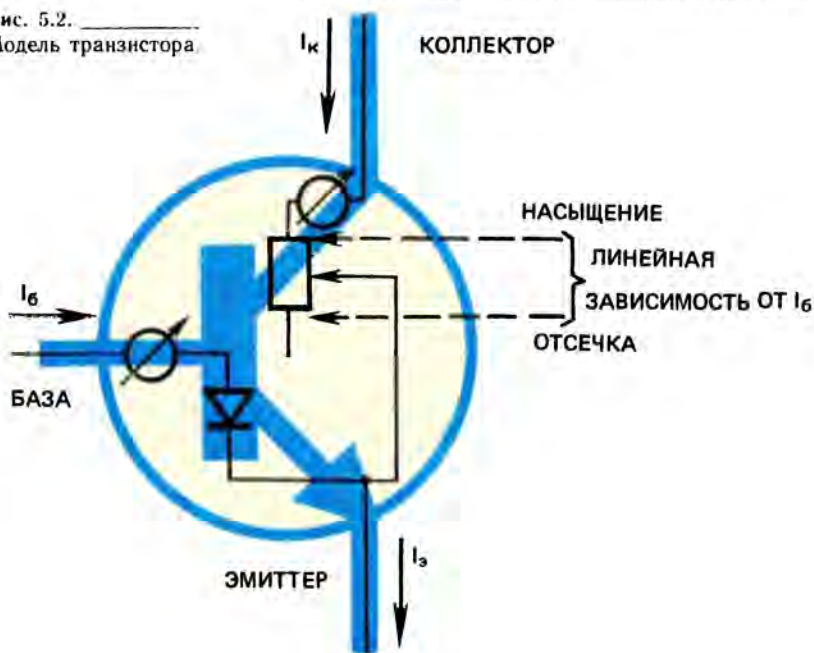
Цепь базы можно представить в виде диода, соединяющего базу с эмиттером, цепь коллектора — как переменный резистор между коллектором и эмиттером (рис. 5.2.). Таким образом, легко пояснить свойства транзистора в целом, но для этого нужно вообразить, что внутрь транзистора помещен... человек.

Человек смотрит на измеритель тока базы, умножает значение этого тока I_b на постоянный положительный коэффициент β и регулятором величины переменного резистора устанавливает в цепи коллектора ток

$$I_k = \beta \cdot I_b.$$

Заметим, что к такой модели прибегают даже в серьезных книгах для инженеров по радиоэлектронике, считая человека в транзисторе очень проворным, способным реагировать на изме-

Рис. 5.2. _____
Модель транзистора



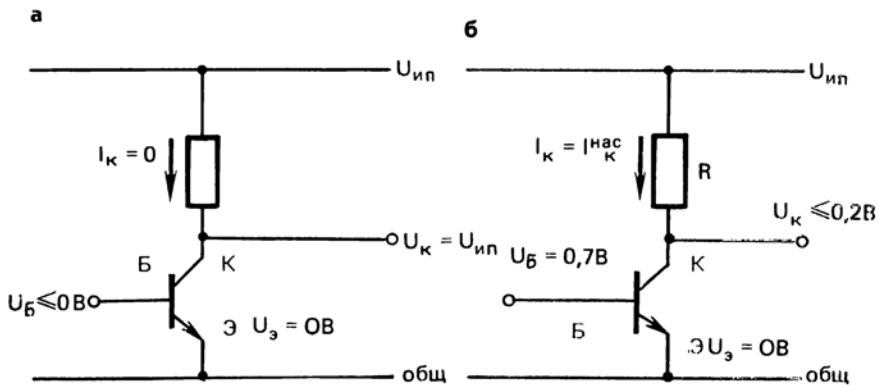


Рис. 5.3. Кремниевый транзистор в режиме отсечки (а) и насыщения (б).

нения тока с частотой в десятки и даже сотни миллионов раз в секунду.

Коэффициент β вполне конкретен для каждого транзистора и равен обычно 100—250. Поэтому при возрастании тока базы до некоторого значения регулятор резистора окажется передвинутым в крайнее верхнее положение, и дальнейшее увеличение тока коллектора станет невозможным. Такой наибольший для данного транзистора ток коллектора называется *током насыщения*. Обозначим его I_K^{max} . Другая крайность — самое нижнее положение регулятора. Цепь коллектора при этом разрывается, и ток коллектора становится равным нулю. В таком случае говорят, что ток отсекается или что транзистор находится в *состоянии отсечки*.

Итак, коротко:

1) в схемах, в которых эмиттер присоединен к общему проводу («земле») или, что то же самое, в *схемах с общим эмиттером* ток базы усиливается в цепи коллектора до значения $I_K = \beta \cdot I_B$

2) нулевое и отрицательное напряжения на базе соответствуют режиму отсечки, при котором $I_K = 0$;

3) начиная с некоторого значения тока базы $I_B^{нас}$, ток коллектора достигает насыщения, и дальнейший рост тока базы не влияет на величину тока коллектора.

В большинстве бытовых приборов — радиоприемниках, телевизорах, магнитофонах, усилителях наиболее важным считается линейный режим работы транзистора, т. е. такой, при котором нет, во-первых, искажения входного сигнала и, во-вторых, не достигается как режим отсечки, так и режим насыщения.

Иное дело в цифровой электронике. Отсечка и насыщение связаны здесь, как правило, с сигналами 1 и 0. На рисунке 5.3 приведены значения напряжений на кремниевом транзисторе в случаях отсечки и насыщения.

5.3. О том же, но строже

Действие диодов и транзисторов основано на свойствах *полупроводниковых материалов*.

Типичный полупроводник — элемент четвертой группы таблицы Менделеева кремний (Si). Во внешней электронной оболочке атома кремния имеются четыре валентных электрона. Атомы кремния способны объединяться в очень прочную кристаллическую решетку при помощи химических ковалентных связей. В такой решетке каждый атом окружен четырьмя соседними атомами кремния и находится как бы в центре тетраэдра, образованного ими. Все четыре валентных электрона этого атома кремния и четыре электрона окружающих атомов («по одному от каждого ближайшего соседа») образуют единую электронную «орбиту». Эти электроны достаточно прочно связаны с атомами решетки, и для того чтобы их оторвать от нее, требуется большая энергия — порядка 1 эВ. Эта энергия существенно больше энергии теплового движения, поэтому при обычных температурах тепловое движение не может сообщить электрону скорость (иными словами энергия не может возрасти) до величины, достаточной для того, чтобы электрон оторвался от решетки и стал свободным. Поэтому в идеальном протяженном полупроводнике, в отличие от металлов, нет свободных носителей электрического заряда, и такой полупроводник не проводит электрический ток.

Однако на краю кристалла и в местах, где имеются дефекты кристаллической решетки, а также в тех местах, где вместо атомов кремния в решетку попали инородные атомы, стройная система ковалентных связей нарушается. С точки зрения электрических свойств полупроводника эти нарушения могут привести к преобладанию одного из двух эффектов.

В первом случае, который может быть обусловлен примесями третьей группы таблицы Менделеева, появляются «лишние» электроны. Энергия их связи с решеткой примерно в 100 раз меньше, чем у тех, которые участвуют в ковалентных связях, т. е. равна приблизительно 0,01 эВ. Поскольку энергия теплового движения при обычных температурах лежит в пределах 0,02—0,03 эВ, то, обладая такой энергией, эти лишние для химической связи электроны свободно перемещаются по кристаллу, т. е. становятся *свободными носителями заряда*.

Во втором случае, который может быть обусловлен вкраплением в решетку пентавалентных атомов, появляются «лишние связи». На них достаточно свободно переходят электроны с соседних атомов, а освободившуюся в результате такого перехода связь занимает электрон «другого атома» и т. д. Иными словами, по кристаллу может бродить «пустая связь», или *дырка*. Дырка эквивалентна потере электрона нейтральным атомом и обладает поэтому положительным зарядом. Энергия ее связи с решеткой также порядка 0,01 эВ.

Так в первом приближении может быть объяснено существова-

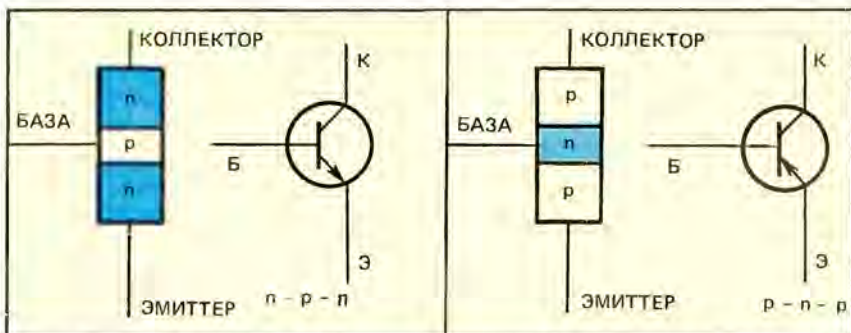


Рис. 5.4. Структура и обозначение биполярных транзисторов.

ние полупроводников двух типов — электронных, или *n-типа* и дырочных, или *p-типа* (от лат. *negativ* и *positiv* — отрицательный и положительный).

Если в одном кристалле создать граничащие между собой области проводимости *p*- и *n*-типа, то переход между ними (*p — n-переход*) обладает способностью проводить электрический ток только в одном направлении. Именно на основе *p — n-переходов* и изготавливаются полупроводниковые диоды, причем вывод от *p*-области называется по аналогии с вакуумными приборами *анодом*, а *n*-области — *катодом*.

Рассмотренный в 5.2 транзистор называется *биполярным*, т. е. использующим носители заряда обоих знаков. Его действие основано как на токе основных носителей (дырок в *p*-области или электронов в *n*-области), так и на токах неосновных носителей (дырок в *n*-области или электронов в *p*-области).

Биполярный транзистор представляет собой два близко расположенных *p — n-перехода* (рис. 5.4). Толщина центральной области (базы) составляет всего 1—2 микронметра и даже менее.

Проанализируем работу транзистора типа *n-p-n*. Основными носителями в эмиттерной и коллекторной областях являются электроны, в базовой — дырки.

При отключенном коллекторе переход база — эмиттер представляет собой обыкновенный диод и при положительном напряжении на базе через этот диод протекает электрический ток. Если же при этом подать на коллектор значительно большее положительное напряжение, то электроны эмиттера, попавшие в базу и продвинувшиеся на некоторое расстояние в сторону коллектора, окажутся в зоне действия сильного электрического поля коллектора. В реальных транзисторах из-за очень малой толщины базы большинство этих электронов будет собрано коллектором и лишь незначительная их часть (менее 1 %) нейтрализуется, объединяясь (рекомбинируя) с основными носителями базы — дырками.

Именно эта малая (~1 %) часть электронов (точнее — рекомбинирующих с электронами дырок) образует ток базы

I_6 , а пропорциональная этому току, но значительно большая часть электронов, беспрепятственно преодолевающих область базы, образует ток коллектора I_k . Отношение приращений этих токов и есть коэффициент

$$\beta = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_6} \quad (5.2)$$

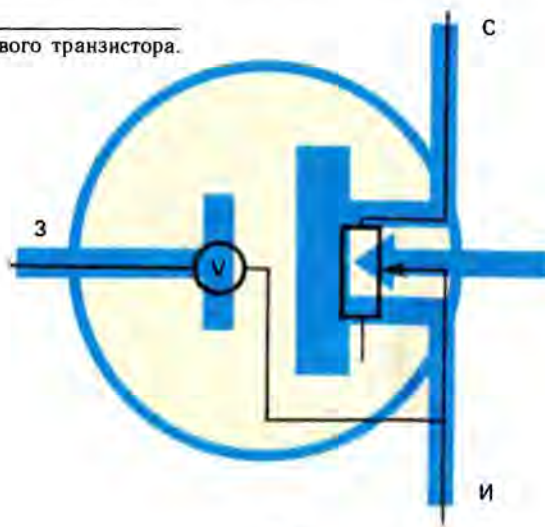
5.4. Полевые транзисторы

Полевые транзисторы иногда называют МДП или МОП по первым буквам слов *металл-диэлектрик-полупроводник*, *металл-оксид-полупроводник*, отражающих технологию их изготовления. МОП- и МДП- транзисторы лишь отдельные представители транзисторов, в которых током управляет электрическое поле.

Полевой транзистор имеет три основных вывода: *исток* (И), *затвор* (З) и *сток* (С). Управляющим электродом служит затвор. У МДП-транзисторов есть еще один внешний вывод — *подложка* (П), его обычно соединяют с истоком и не рассматривают отдельно. В простейшем случае исток подключается к общему проводу. К стоку подводится напряжение от источника питания. Ток между истоком и стоком зависит от напряжения на затворе, точнее от напряжения затвор-подложка, так как именно это напряжение обуславливает величину электрического поля, в котором находится зона перехода от истока к стоку. В отличие от биполярных транзисторов управление происходит, практически, без затраты мощности управляющего сигнала.

В модели полевого транзистора с человеком-регулировщиком (рис. 5.5) человек должен следить не за током, а за напряжением на затворе и в зависимости от величины этого напряжения

Рис. 5.5. _____
Модель полевого транзистора.



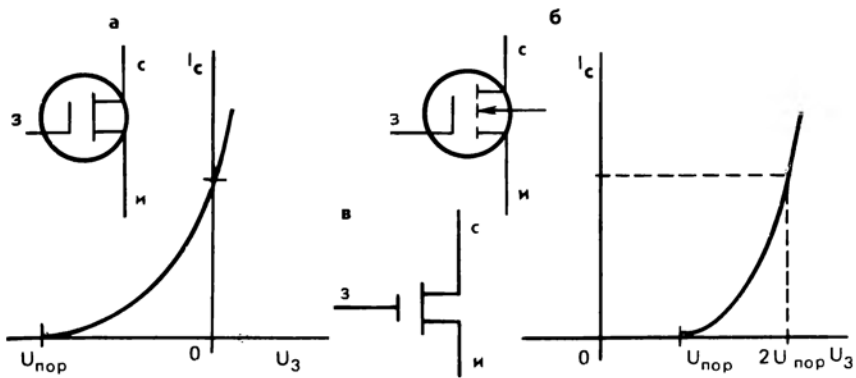


Рис. 5.6. Обозначение и передаточные характеристики полевых транзисторов: *а* обедненного (нормально открытого), *б* обогащенного (нормально закрытого). В первом случае максимально допустимый ток наблюдается при $U_з = 0$, во втором — при $U_з = 2U_{пор}$. Нередко для обозначения всех видов полевых транзисторов применяют общий символ (*в*).

устанавливать ток в цепи исток-сток при помощи переменного резистора.

Различают два основных типа полевых транзисторов (рис. 5.6). В первом из них зависимость тока стока I_c от напряжения на затворе $U_з$ имеет вид кривой (рис. 5.6, *а*). Такой транзистор называют *нормально открытым*, так как при напряжении затвора, равном нулю, он проводит ток. Второй тип полевого транзистора — *нормально закрытый*. При нулевом потенциале на затворе ток стока транзистора равен нулю (рис. 5.6, *б*).

В цифровых электронных устройствах используют преимущественно нормально закрытые полевые транзисторы.

Имеется определенная аналогия между биполярным *n-p-n*-транзистором и полевым нормально закрытым транзистором с каналом *n*-типа: оба они не проводят ток при нулевом (и отрицательном) смещении на управляющем электроде, оба открываются при положительном смещении на этом электроде, оба достигают тока насыщения.

Подобного рода аналогия можно усмотреть и в характеристиках биполярного *p-n-p*- транзистора и нормально закрытого полевого транзистора с каналом *p*-типа.

5.5. Базовые логические элементы

Базовый набор должен содержать элементы, из которых можно построить любое цифровое электронное устройство. Поэтому, в принципе, в таком наборе могут быть только двухвходовые схемы И-НЕ (или только ИЛИ-НЕ) при условии, что выход каждой из них можно подключать к любому количеству входов

других таких же схем. В действительности число таких подключений ограничено, и уже только по этой причине в базовом наборе должны содержаться схемы, позволяющие расширить возможности отдельного выхода. Они так и называются — *расширители выхода*, а с точки зрения логики представляют собой повторители сигналов. Обычно же в базовом наборе наряду с элементами И-НЕ (или ИЛИ-НЕ) содержатся и некоторые другие схемы. Всех их объединяет идентичность входных и выходных сигналов.

Выпускаемые промышленностью цифровые схемы имеют два типа выводов: к первым подключаются источники питания, ко вторым — логические входы и выходы.

В элементах *транзисторно-транзисторной логики* (ТТЛ) за 0 принято 0 В, за 1...5 В, напряжение источника питания также 5 В. Допускается и некоторое отклонение сигналов 0 и 1 от своих точных значений: до (0...0,4) В для 0 и (2,5...5) для 1 В свое время эти элементы получили столь широкое распространение, что для обмена сигналами между любыми цифровыми устройствами (ЭВМ, микропроцессорами и т. п.) приняты уровни логических сигналов ТТЛ.

Наименьшим потреблением энергии отличается *комплементарная МОП-логика* или сокращенно — КМОП-логика. В ней за логический 0 принято напряжение 0 В, за 1 — напряжение источника.

Комплементарной (т. е. взаимодополняющей) считают пару полевых транзисторов, имеющих одинаковые характеристики, но противоположную полярность питающих напряжений, сигналов управления и токов исток-сток (рис. 5.7). Если такую пару соединить так, как показано на рисунке 5.8 (обратите внимание, верхний транзистор «перевернут»), то:

Рис. 5.7.

Характеристики комплементарной пары полевых транзисторов идентичны и различаются лишь полярностью действующих напряжений и направлениями тока стока. На схемах их различают по стрелке четвертого вывода (подложки — П).

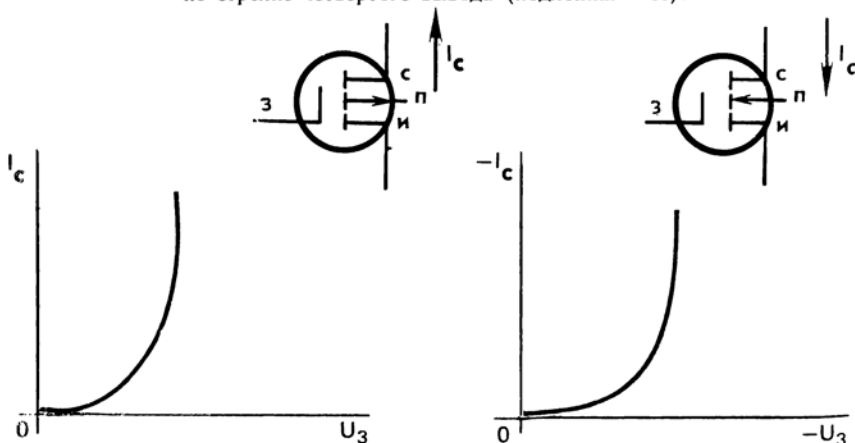
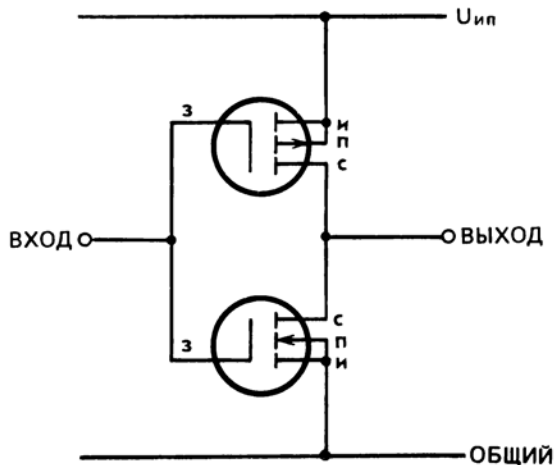


Рис. 5.8. КМОП инвертор (схема НЕ): 0 на входе закрывает верхний и открывает нижний транзистор, $1(U_{вх} = U_{ин})$ — наоборот.



1) при напряжении на объединенном затворе (входе), равном 0 В, верхний транзистор будет открыт, а нижний закрыт;

2) при напряжении на этом же входе, равном напряжению источника питания $U_{ин}$, наоборот, верхний открыт, а нижний — закрыт.

У открытого транзистора сопротивление исток-сток мало (в модели на рис. 5.5 регулятор переменного резистора находится в крайнем верхнем положении), у закрытого — велико (нижнее положение регулятора, т. е. разрыв цепи исток-сток), поэтому напряжение на выходе схемы на рис. 5.8 в первом случае будет $U_{ин}$, во втором 0 В. Схема представляет собой элемент НЕ.

Действие элементов И-НЕ и ИЛИ-НЕ КМОП-логики основано на следующем: во-первых, если группа транзисторов соединена параллельно (объединены истоки и стоки), то достаточно открыть хотя бы один транзистор и общее сопротивление исток-сток станет малым, т. е. цепь исток-сток окажется замкнутой; во-вторых, если группа транзисторов соединена последовательно (сток первого к истоку второго, сток второго — к истоку третьего и т. д.), то эта последовательная цепь разомкнута при условии, что хотя бы один транзистор закрыт. Помня об этом, нетрудно уяснить принцип действия элементов И-НЕ и ИЛИ-НЕ, показанных на рисунке 5.9. Заметим, что параллельно соединены транзисторы с индексом А, последовательно — с индексом В.

Системы логических элементов постоянно совершенствуются. Популярны в недавнем прошлом *резисторно-транзисторная логика (РТЛ)* и *диодно-транзисторная логика (ДТЛ)* вообще не применяются. Быстродействие схем ТТЛ удалось значительно повысить, благодаря введению в них диодов Шоттки. Задержка сигналов в элементах ТТЛ-Шоттки доведена до 2 нс. Однако самой быстродействующей остается пока *эмиттерно-связанная логика (ЭСЛ)*.

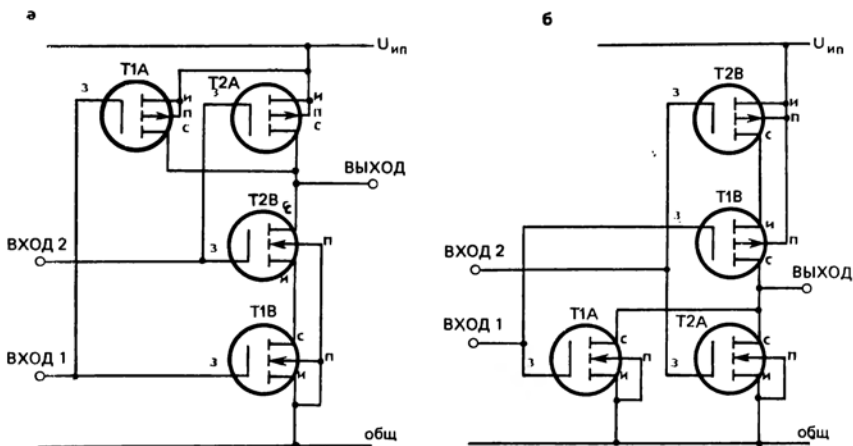


Рис. 5.9. Схемы ИЛИ-НЕ (а) и И-НЕ (б) типа КМОП.

Элементы так называемой *интегральной инжекционной логики* (I^2L) — наиболее экономичные из устройств на биполярных транзисторах. Однако, самое малое потребление энергии от источников питания обеспечивает КМОП-логика.

5.6. Интегральные схемы

Первый транзистор был изготовлен в 1948 году. Через 20 лет электронная промышленность мира выпускала в год сотни миллионов транзисторов различных типов, и сфера их применения все расширялась. Во многих случаях, например для изготовления цифровых логических схем, нет необходимости делать транзисторы в виде отдельного прибора с внешними выводами, или, что то же самое, выпускать транзисторы в дискретном исполнении. Более надежными, экономичными и существенно более компактными получаются устройства, в которых на одной полупроводниковой пластинке формируется много транзисторов, диодов и резисторов, а перемычки между ними получают путем металлизации, например методом вакуумного напыления металлических проводников через маску нужной конфигурации.

Устройства такого типа, заключенные в герметичный корпус с внешними выводами, называются *интегральными схемами* (ИС).

Современные ИС — результат освоения производством весьма совершенных технологических процессов, базирующихся на достижениях фундаментальных наук, прежде всего физики.

Материалом для большинства ИС служит самый распространенный на земле элемент — кремний, подвергнутый тщательной очистке. Чтобы представить степень этой очистки, заметим, что промышленностью освоено производство монокристаллов кремния, в которых на число атомов, равное населению Земли ($5 \cdot 10^9$), приходится всего 3—4 атома примеси.

Монокристалл кремния разрезают на очень тонкие пластины, которые шлифуются и полируются до зеркального блеска. На 1 мм^2 такой пластины получают более тысячи транзисторных структур. Некоторые большие ИС (БИС) на кристаллах размерами $5 \times 6 \text{ мм}^2$ содержат более 100 000 активных элементов и представляют собой целые универсальные ЭВМ.

Применяемую сейчас технологию производства интегральных схем можно назвать «одноэтажной», так как активные элементы образуют на полупроводниковой пластине только один слой. Она достигла высокой степени совершенства, и расчеты показывают, что плотность расположения компонентов, которую предполагают получить в ближайшие годы, сравняется с теоретически достижимым пределом.

Интенсивно ведется поиск принципиально новых способов построения интегральных схем, позволяющих создавать на одной подложке «многоэтажные» структуры и даже объемные.

Перспективы дальнейшего совершенствования интегральных схем связывают с целым рядом интересных физических явлений, новых материалов и технологий. Решительное повышение быстродействия сулит переход от электронных устройств к оптическим или хотя бы электронно-оптическим. Другое направление — работа при низких и очень низких (криогенных) температурах. В этом случае наряду с повышением быстродействия резко снижается потребляемая мощность, еще более уменьшаются габариты интегральных схем. Большие исследовательские группы ищут пути синтеза «интегральных схем» на молекулярном и субмолекулярном уровнях. Какое направление получит право на жизнь — покажет будущее.