

Микропроцессорные реле защиты

Устройство, проблемы, перспективы



Владимир Гуревич

В.И. ГУРЕВИЧ

МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ РЕЛЕ ЗАЩИТЫ

Устройство, проблемы,
перспективы

Учебно-практическое пособие

**Инфра-Инженерия
Москва
2011**

УДК 621.316.925(075.8)

ББК 31.27-05

Г95

Гуревич В.И.

Г 95 Микропроцессорные реле защиты. Устройство, проблемы, перспективы. - М.: Инфра-Инженерия, 2011. - 336 с.

ISBN 978-5-9729-0043-5

В книге рассмотрены устройство и принцип действия микропроцессорных устройств релейной защиты (МУРЗ) на примерах конкретных типов современных МУРЗ ведущих мировых производителей. Для облегчения понимания текста энергетиками, работающими с МУРЗ, но не являющимися специалистами в области электроники, приведено подробное описание элементной базы МУРЗ, устройства и принципов действия транзисторов, тиристоров, оптронов, реле.

Рассматриваются конкретные проблемы надежности отдельных функциональных узлов МУРЗ, а также вопросы, касающиеся методики оценки надежности и эффективности МУРЗ. Подробно рассмотрены вопросы электромагнитных воздействий на МУРЗ как естественных, так и преднамеренных, кибербезопасности.

Книга рассчитана на инженеров и техников, занимающихся эксплуатацией релейной защиты, а также может быть полезна конструкторам, занимающимся разработкой МУРЗ, преподавателям и студентам соответствующих специальностей средних и высших учебных заведений.

© Гуревич В.И., 2011

© Издательство «Инфра-Инженерия», 2011

ISBN 978-5-9729-0043-5



Владимир Игоревич Гуревич родился в г. Харькове (Украина) в 1956 г.

В 1978 г. окончил факультет электрификации Харьковского национального технического университета им. П. Василенко по специальности «Электроснабжение с.х.». С 1980 по 1983 г. учился в аспирантуре.

В 1986 г. защитил кандидатскую диссертацию в Национальном техническом университете «Харьковский политехнический институт» по специальности «Электрические аппараты».

Работал преподавателем, и.о. доцента Харьковского национального технического университета им. П. Василенко, главным инженером и директором Научно-технического предприятия «Инвентор» (г. Харьков). Руководил несколькими проектами по разработке новых видов аппаратуры, выполняемых по заказам Министерств оборонных отраслей промышленности СССР, после распада СССР занимался разработкой и организацией производства устройств автоматики для электроэнергетики. В настоящее время работает в Электрической компании Израиля в должности инженера-специалиста, начальника сектора Центральной электрической лаборатории.

С 2006 г. Почетный профессор Харьковского национального технического университета им. П. Василенко. С 2007 г. эксперт комитета ТС-94 Международной электротехнической комиссии (МЭК).

В. Гуревич автор 6 книг, свыше 120 изобретений и 140 научно-технических статей.

Глава I. ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА

1.1. Полупроводниковые материалы и приборы

Как известно, все вещества в природе по электропроводности делятся на три большие группы: проводники (обычно металлы) с сопротивлением $10^{-6} - 10^{-3}$ Ом · см; диэлектрики с сопротивлением $10^9 - 10^{20}$ Ом · см и полупроводники (многие природные и искусственные кристаллы), занимающие огромный промежуточный диапазон значений удельного сопротивления.

Главной особенностью кристаллических веществ является характерная упорядоченная упаковка их атомов в своеобразные кубики — кристаллы. Каждый кристалл имеет несколько плоских симметричных поверхностей, а его внутреннее строение определяется закономерным взаимным расположением атомов, которое носит название кристаллической решетки. Как по своему внешнему виду, так и по внутреннему строению любой кристалл подобен всем другим кристаллам этого вещества. Кристаллы разных веществ различны. Например, кристалл поваренной соли имеет форму куба. Одиночный кристалл может быть как весьма большим по своим размерам, так и настолько малым, что его можно увидеть только в микроскоп. Вещества, не имеющие кристаллической структуры, называются аморфными. Например, стекло является аморфным, в отличие от кварца, который имеет кристаллическую структуру.

Из числа полупроводников, имеющих практическое применение в современной электронике, следует назвать германий, кремний, селен, окись меди, сульфид меди, сульфид кадмия, арсенид галлия, карборунд. Для изготовления полупроводниковых приборов, применяющихся в электронных реле, используются главным образом два первых элемента: германий и кремний.

Для того чтобы понять процессы, происходящие в полупроводниковых приборах, необходимо рассмотреть явления, происходящие в кристаллической структуре полупроводниковых материалов, которая обусловлена тем, что их атомы удерживаются в строго определенном взаимном положении друг относительно друга благодаря слабо связанным электронам, находящимся на их внешних оболочках. Эти электроны вместе с такими же электронами сосед-

них атомов образуют валентные связи между атомами. Электроны, участвующие в этих связях, называются валентными. В абсолютно чистом германии или кремнии при очень низких температурах нет свободных электронов, способных создать электрический ток, так как в этих условиях все четыре валентных электрона внешних оболочек каждого атома, которые могут участвовать в процессе переноса зарядов, прочно удерживаются валентными связями. Поэтому такое вещество является изолятором (диэлектриком) в полном смысле этого слова — оно совершенно не пропускает электрического тока.

При повышении температуры благодаря тепловому движению некоторые валентные электроны отрываются от своих связей и могут перемещаться по кристаллической решетке. Такие электроны называются свободными. Валентная связь, от которой оторван электрон, называется дыркой. Она обладает свойствами положительного электрического заряда, в противоположность электрону, имеющему отрицательный электрический заряд. Чем выше температура, тем больше количество освобожденных электронов, способных перемещаться по кристаллической решетке, тем больше проводимость вещества.

Перемещаясь по кристаллической решетке, свободные электроны могут встретить дырки — валентные связи, в которых не хватает электронов, — и заполнить эти связи. Это явление носит название рекомбинации. При нормальной температуре в массе полупроводникового материала непрерывно появляются свободные электроны и происходят рекомбинации электронов и дырок.

Если кусок полупроводникового материала поместить в электрическое поле, например, приложив положительный и отрицательный потенциалы к его концам, то электроны будут двигаться через кристаллическую решетку к положительному электроду, а дырки — к отрицательному. Проводимость полупроводника можно значительно улучшить путем введения в него специально подобранных примесей, металлических или неметаллических. В кристаллической решетке атомы этих примесей будут замещать некоторое количество атомов полупроводников. Напомним, что внешние оболочки атомов германия и кремния содержат по четыре валентных электрона, а электроны могут быть вырваны только из внешней оболочки атома. В свою очередь, добавление электронов может происхо-

дить тоже только на внешнюю оболочку, причем максимально возможное число электронов на внешней оболочке равно восьми.

Если атом примеси имеет большее число валентных электронов, чем это требуется для образования валентных связей с соседними атомами полупроводника, то в кристаллической решетке появляются дополнительные свободные электроны, которые могут по ней перемещаться. В результате электропроводность полупроводника улучшается. Такие примеси называются донорными, поскольку они «отдают» электроны полупроводнику. Так как германий и кремний являются элементами четвертой группы периодической таблицы химических элементов, то для них донорными примесями могут быть элементы пятой группы, у которых на внешней оболочке атомов находится по пять электронов. К таким донорным примесям относятся фосфор, мышьяк, сурьма.

Если же атомы примеси имеют меньшее число электронов, чем это необходимо для образования валентных связей с окружающими его атомами полупроводника, то некоторые из этих связей окажутся незаполненными, в них образуются дырки. Примеси такого рода называются акцепторными, поскольку они поглощают свободные электроны. Для германия и кремния акцепторными примесями являются элементы третьей группы периодической таблицы химических элементов, у которых внешние оболочки атомов содержат по три валентных электрона. К акцепторным примесям относятся бор, алюминий, галлий и индий.

В кристаллической структуре чистого полупроводника все валентные связи соседних атомов оказываются полностью заполненными, и появление свободных электронов и дырок возможно только благодаря деформации кристаллической решетки, возникающей под действием теплового или иного излучения. Вследствие этого при нормальных условиях проводимость чистого полупроводника весьма мала.

В случае введения даже небольшого количества донорной примеси четыре электрона атома примеси совместно с таким же количеством электронов соседних атомов полупроводника образуют с последними заполненные валентные связи. Пятый электрон каждого атома примеси оказывается «избыточным», «лишним», вследствие чего может свободно перемещаться по кристаллической решетке.

При введении акцепторной примеси между каждым атомом примеси и соседними атомами полупроводника получаются только три заполненные валентные связи. Для заполнения четвертой связи не хватает одного электрона. Эта валентная связь оказывается свободной. В результате образуется дырка. Дырки могут перемещаться по кристаллической решетке как положительные заряды. Правда, при этом происходит перемещение не самого атома примеси, который имеет фиксированное и неизменное положение в кристаллической структуре полупроводника, а незаполненной валентной связи. Происходит это следующим образом. Как известно, элементарным носителем электрического заряда является электрон. Под действием различных причин электрон может вырваться из заполненной валентной связи, оставив дырку, которая представляет собой незаполненную валентную связь и проявляет себя как положительный заряд, численно равный отрицательному заряду электрона. Электрон другого атома вблизи этой дырки под действием силы притяжения ее положительного заряда может «впрыгнуть» в дырку. При этом происходит рекомбинация дырки и электрона, когда их заряды взаимно нейтрализуются и валентная связь заполняется. Дырка в данном месте кристаллической решетки полупроводника перестает существовать. В свою очередь, новая дырка, возникшая в той валентной связи, откуда вырвался электрон, может быть заполнена каким-либо другим электроном, также оставившим после себя дырку. Таким образом, перемещение электронов в кристаллической решетке полупроводника с акцепторной примесью и рекомбинацию их с дырками можно рассматривать как перемещение дырок. Для наглядности можно представить себе концертный зал, в котором по какой-то причине оказалось незаполненными несколько мест в первом ряду. И вот, зрители со второго ряда перемещаются на свободные места в первом ряду. Соответственно, их места занимают зрители третьего ряда и т.д. При этом можно сказать, что свободные места как бы перемещаются к концу зрительного зала, хотя физически все кресла остаются привинченными к полу. Движение дырок в кристалле очень похоже на движение этих свободных мест.

Полупроводники, электропроводность которых улучшилась благодаря образованию избытка свободных электронов при введении примеси, называются полупроводниками с электронной проводимостью, или сокращенно полупроводниками *n* типа.

Полупроводники, электропроводность которых обуславливается в основном движением дырок, называются полупроводниками с дырочной проводимостью, или сокращенно полупроводниками p типа.

Практически не существует полупроводников с чисто электронной или чисто дырочной проводимостью. В полупроводнике n типа электрический ток частично обуславливается движением дырок, возникающих в его кристаллической решетке вследствие выхода электронов из некоторых валентных связей, а в полупроводниках p типа ток частично создается движением электронов. Вследствие этого полупроводники n типа более правильно характеризовать как полупроводники, в которых основными носителями тока являются электроны, а полупроводники p типа — как полупроводники, в которых основными носителями тока являются дырки. Следовательно, полупроводник относится к тому или другому типу в зависимости от того, какой вид носителя тока является в нем основным. Исходя из этого, противоположный носитель заряда для полупроводника данного вида является неосновным носителем.

Следует иметь в виду, что любой полупроводник можно сделать полупроводником n или p типа путем добавления в него соответствующих примесей. Причем для получения необходимой проводимости достаточно ввести чрезвычайно малое количество примеси, примерно один атом примеси на 10 млн. атомов полупроводника. Все это налагает особые требования на чистоту очистки исходного полупроводникового материала и точность дозировки введения примеси. Следует учесть, что скорость движения носителей тока в полупроводнике меньше, чем в проводнике. Движение электронов замедляется встречающимися на их пути препятствиями в виде неоднородностей в кристалле. Движение дырок примерно вдвое медленнее, поскольку их перемещение связано с перескоком электронов в незаполненные валентные связи. Подвижность электронов и дырок в полупроводнике повышается с ростом температуры, что приводит к улучшению проводимости полупроводника.

В основе принципа действия подавляющего большинства полупроводниковых приборов лежат процессы, происходящие в переходном слое, образованном в полупроводнике на границе двух зон с проводимостями различного типа, p и n типа. Для простоты эту границу принято называть p - n переходом, или электронно-дырочным

переходом, что характеризует вид основных носителей зарядов в двух примыкающих друг к другу зонах полупроводника.

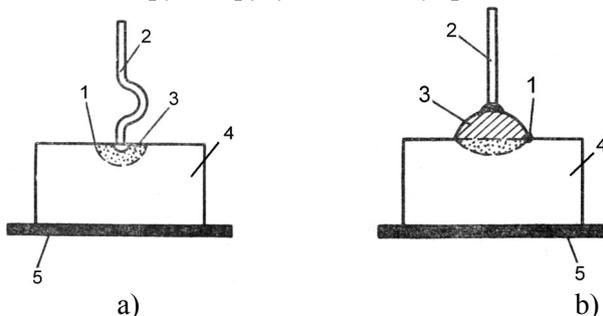


Рис. 1.1. Устройство точечного (а) и плоскостного (б) p - n переходов диода: 1 - p - n -переход; 2 – проволочный вывод; 3 – p -область; 4 – кристалл n -типа; 5 – металлическая основа

Различают два вида p - n переходов: плоскостной и точечный, схематическое условное изображение которых показано соответственно на рис. 1.1. Плоскостной переход получается путем помещения кусочка примеси, например, индия на поверхность германия n типа и последующего нагревания до расплава примеси. При поддержании определенной температуры в течение определенного времени происходит диффузия части атомов примеси в пластинку полупроводника на небольшую глубину. Создается зона с проводимостью, противоположной проводимости исходного полупроводника, в данном случае p типа для n германия.

Точечный переход получается в результате установления плотного электрического контакта тонкого проводника, имеющего, как известно, электронную проводимость, с поверхностью полупроводника p типа. Именно на этом принципе действовали первые кристаллические детекторы. Для уменьшения зависимости свойств диода от положения заостренного конца проволоочки на поверхности полупроводника и чистоты его поверхности в настоящее время точечные переходы получают путем сплавления конца тонкой металлической проволоки в поверхность полупроводника n типа. Сплавление осуществляется в момент подачи кратковременного мощного импульса электрического тока. Под действием тепла, которое образуется за этот короткий промежуток времени, часть элек-

тронов вырывается из атомов полупроводника, находящиеся вблизи точечного контакта, оставляя после себя дырки.

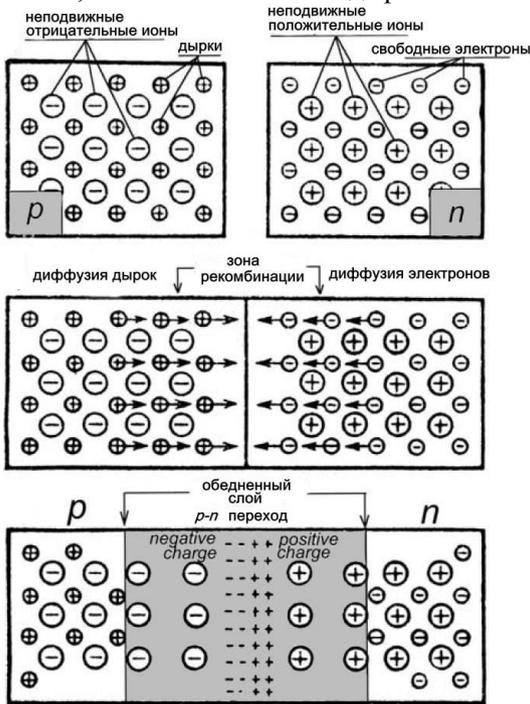


Рис. 1.2. Образование запирающего слоя при соединении полупроводников с разным типом проводимости

В результате этого небольшой объем полупроводника n типа в непосредственной близости от контакта превращается в полупроводник p типа (область 3 на рис. 1.1).

Каждая часть полупроводникового материала в отдельности (то есть до контактирования между собой) была нейтральной, так как имело место равновесие свободных и связанных зарядов (рис. 1.2). При этом в области n -типа концентрация свободных электронов велика, а дырок – мала. В области p -типа, наоборот, велика концентрация дырок и мала концентрация электронов. Соединение полупроводников с разной концентрацией основных носителей тока вместе вызывает *диффузию* этих основных носителей через место

соединения двух материалов: основные носители полупроводника p -типа – дырки-диффундируют в область n -типа, поскольку в ней концентрация дырок очень мала. И наоборот, электроны из полупроводника n -типа с высокой их концентрацией диффундируют в область p -типа, где их мало (рис. 1.2). При этом на границе раздела двух полупроводников с каждой стороны образуется тонкая зона с проводимостью, противоположной проводимости исходного полупроводника. В результате, на границе (которая называется p - n -переходом) возникает пространственный заряд, создающий электрическое поле (так называемый потенциальный барьер), препятствующий протеканию основных носителей тока после достижения состояния равновесия.

Характерной особенностью p - n перехода является резко выраженная зависимость его электрической проводимости от полярности приложенного к нему внешнего напряжения, чего никогда не наблюдается в полупроводнике одной проводимости. Если приложенное извне напряжение создает электрическое поле, совпадающее с диффузионным, то переход будет оставаться в запертом положении и ток через него протекать не будет. Более того, при этом усиливается движение неосновных носителей, что ведет к расширению запирающего слоя и повышению потенциального барьера для основных носителей. В этом случае говорят, что переход *смещен в обратном направлении*. Движение неосновных носителей приводит к возникновению небольшого тока через запертый переход. Это так называемый *обратный ток* диода или *ток утечки*. Чем он меньше, тем диод лучше. При изменении полярности приложенного к переходу напряжения растет число основных носителей заряда в зоне перехода, которые нейтрализуют пространственный заряд запирающего слоя, уменьшая его ширину и снижая потенциальный барьер, который препятствовал движению основных носителей тока через переход. При этом говорят, что переход *смещен в прямом направлении*. Напряжение, необходимое для преодоления потенциального барьера в прямом направлении, составляет для германиевых диодов около 0.2 В, а для кремниевых 0.6 – 0.7 В.

Для преодоления потенциального барьера в обратном направлении требуются десятки, а иногда и тысячи вольт. Если этот барьер будет преодолен, происходит необратимое разрушение перехода, его *пробой*.

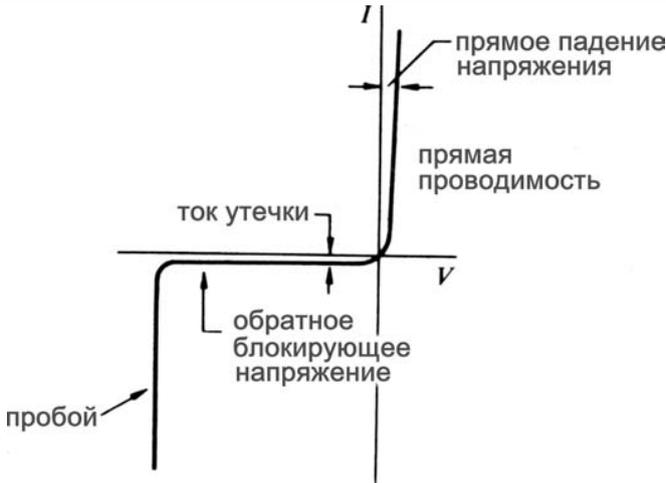


Рис. 1.3. Вольт-амперная характеристика одиночного $p-n$ -перехода (диода)

Поэтому обычно для переходов того или иного прибора указывается предельное значение обратного напряжения, а также прямого тока.

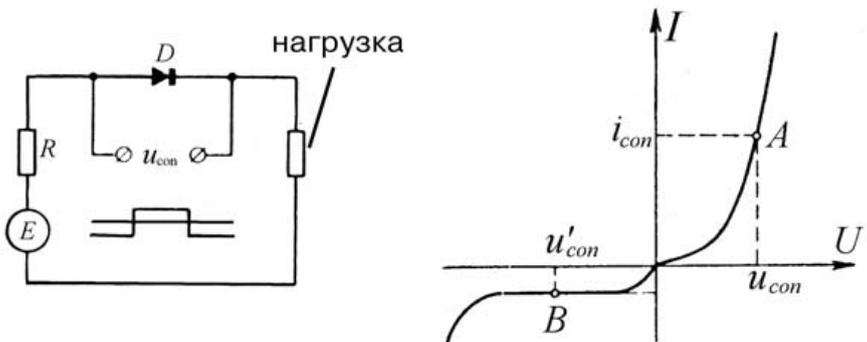


Рис.1.4. Диодный коммутатор сигналов и изменение положения рабочей точки диода на статической вольт-амперной характеристике в процессе работы

На рис. 1.3 приведена примерная вольт-амперная характеристика одиночного $p-n$ перехода, то есть зависимость тока через него

от полярности и величины внешнего напряжения, которое прикладывается к переходу. Величины токов в прямом и обратном направлении (до области пробоя) отличаются между собой в десятки – сотни раз. Как правило, плоскостные переходы выдерживают большие напряжения и токи, чем точечные.

1.2. Принцип действия транзистора

Идея об использовании полупроводников была выдвинута еще перед второй мировой войной, но знания о том, как они работали, был весьма скудным, и процесс производства чистых полупроводников был очень сложным.

В 1945 г. вице-президентом известной корпорации Bell Laboratories была создана группа исследователей, которой было поручено исследование возможностей применения полупроводников в электронике. Группу в составе Уолтера Браттэйна, Джона Бардина и других физиков, работавших в области квантовой теории в твердых телах, возглавил Уильям Шокли.

В 1947 г. Уильям Шокли с коллегами Джоном Бардином и Уолтером Браттэйном сделали первое успешное устройство из полупроводника для усиления электрического сигнала. Они назвали его *транзистором* (производное от "**транс**форматора" и "**резистора**"). Дальнейшее развитие этого устройства и технологии его производства привело и созданию кремниевого чипа, без которого сегодня немислимо существование многих областей техники. За создание транзистора Шокли, Бардин и Браттэйн были удостоены в 1956 г. Нобелевской премии.

Из рис. 1.5 видно, что транзистор представляет собой, по существу, два полупроводниковых диода, включенных встречно и имеющих общую область. Крайние два слоя полупроводника (один из них называется «эмиттером» а другой «коллектором») имеют проводимость *p*-типа с высокой концентрацией дырок, а средний слой (называемый «базой») – проводимость *n*-типа со слабой концентрацией электронов.

В электрических схемах к первому (эмиттерному) *p-n* переходу приложено небольшое напряжение, поскольку этот переход включен в прямом (пропускном) направлении, а ко второму (коллектор-

ному) n - p переходу приложено значительно большее напряжение в обратном (запорном) направлении.

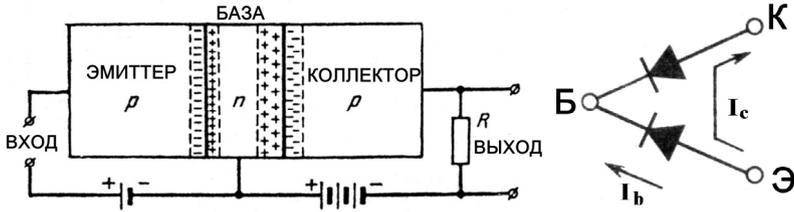
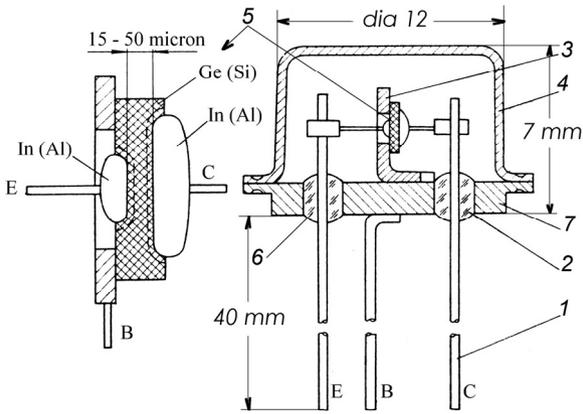
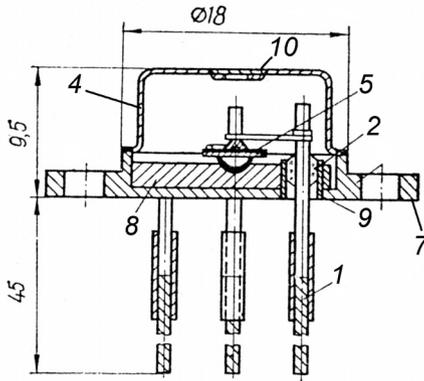


Рис. 1.5. Схема включения и принцип действия транзистора

Коллекторный переход остается запертым до тех пор, пока нет тока в цепи эмиттер – база. При этом сопротивление всего кристалла (от эмиттера до коллектора) очень высоко. Но как только входная цепь (рис. 1.5) будет замкнута, дырки из эмиттера как бы впрыскиваются («эмиттируют») в базу, быстро насыщая ее (включая область, прилегающую к коллектору). Поскольку концентрация дырок в эмиттере намного больше, чем концентрация электронов в базе, после рекомбинации в области базы остается еще очень много свободных дырок, которые под действием высокого напряжения (единицы – десятки вольт), приложенного между базой и коллектором, свободно преодолевают запирающий слой между базой и коллектором. Повышенная концентрация дырок в запертом коллекторном переходе приводит к тому, что сопротивление этого перехода резко падает и он начинает проводить ток в обратном направлении. Высокая напряженность электрического поля в переходе «база-коллектор» обуславливает очень высокую чувствительность сопротивления этого перехода в обратном (запертом) состоянии к концентрации в нем дырок. Поэтому даже очень незначительное количество дырок, инжектированных с эмиттера под действием слабого входного тока, приводит к резким изменениям проводимости всей структуры и появлению значительного тока в цепи коллектора. Отношение тока коллектора к току базы называется коэффициентом усиления транзистора. У маломощных транзисторов этот коэффициент имеет значения десятков – сотен, а у мощных транзисторов единиц – десятков.



а)



б)

Рис. 1.6. Транзисторы производства 70-х годов:
а) маломощный; б) мощный:

- 1 – выводы; 2 и 6 – стеклянные изоляторы; 3 – кристаллодержатель; 4 – защитный колпачок; 5 – кристалл кремния (германия); 7 – фланец; 8 – медный теплоотвод; 9 – коваровая втулка; 10 – отверстие для удаления газов после сварки корпуса и диск для герметизации

1.3. Некоторые другие типы транзисторов

В 70-х годах транзисторная техника развивается очень бурно. Появляются сотни типов транзисторов, новые их разновидности, (рис. 1.6), в том числе и с проводимостью обратного типа, то есть *p-n*, а также *однопереходные транзисторы* (из-за наличия только одного перехода такой транзистор иногда называют *двухбазовым диодом*), (рис. 1.7).

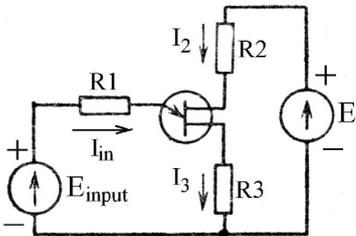
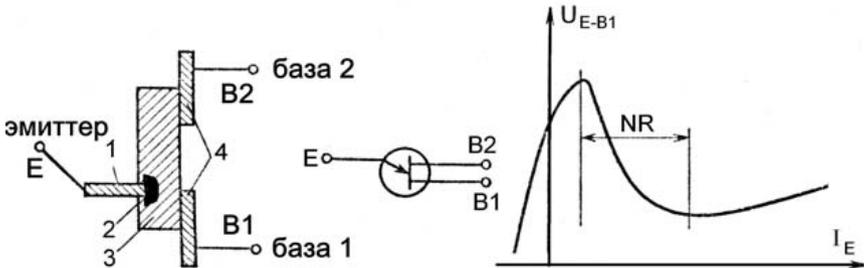
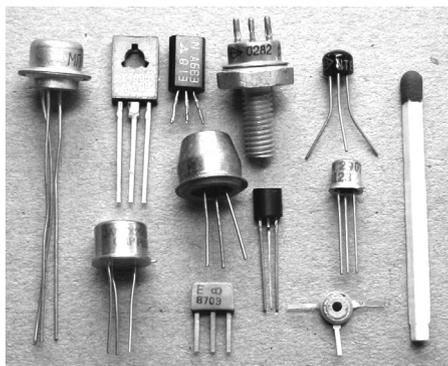


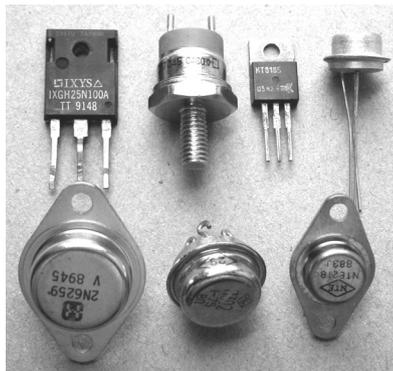
Рис. 1.7. Однопереходной транзистор (или двухбазовый диод) и схема его включения:
 1 – стержень *p*-типа; 2 – *p-n*-переход;
 3 – пластина *n*-типа; 4 – омические контакты; NR – область отрицательного сопротивления

Это транзистор с одним переходом, созданный путем вплавления стерженька из *p*-материала в монокристаллическую пластинку из материала *n*-типа (кремний). К пластинке присоединены два вывода, играющие роль баз. Стерженьек, расположенный несимметрично относительно баз, называется эмиттером. Сопротивление между базами составляет около нескольких тысяч Ом. Обычно база B_2 смещена в положительную сторону относительно базы B_1 . При подведении к эмиттеру соответствующего положительного напряжения протекает большой ток эмиттера (при небольшом падении напряжения между эмиттером E и базой B_1). При этом на эмиттерной характеристике транзистора наблюдается область отрицатель-

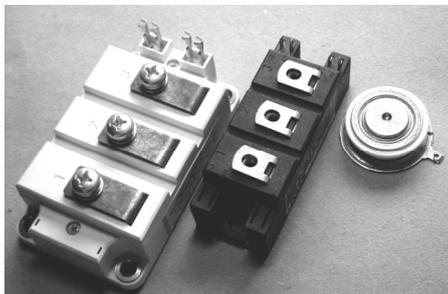
ного сопротивления (NR на рис. 1.7), в которой транзистор очень быстро скачком отпирается, то есть работает как реле. Современные транзисторы, рис. 1.8, характеризуются таким разнообразием, что описать их все в рамках данной книги, посвященной реле, просто невозможно. Придется ограничиться описанием только нескольких самых распространенных типов современных полупроводниковых приборов и реле на их основе.



а



б



с

Рис. 1.8. Так выглядят современные транзисторы малой (а), средней (б) и большой (с) мощности

Помимо описанных выше транзисторов, называемых *биполярными* (рис. 1.9), большое распространение получили в последнее время так называемые *Field Effect Transistors (FET) – полевые транзисторы*, (рис. 1.10). Первую попытку изготовления мало-мощного полевого транзистора предпринял все тот же Уильям Шокли еще в 1948 г. Но потребовались годы дополнительных ис-

следований для того, чтобы в 1952 г. создать работающий FET с управляющим p - n переходом, который назывался в то время “unitron” (Unipolar Transistor).

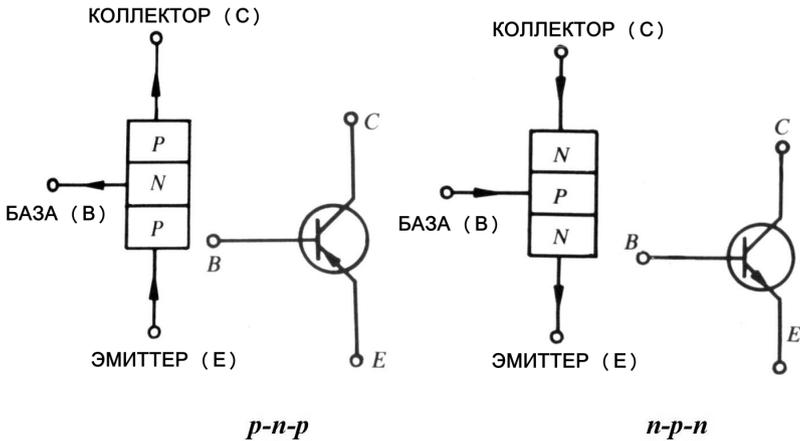


Рис. 1.9. Структура и условное обозначение на схемах биполярных транзисторов p - n - p и n - p - n типов

Такой транзистор представляет собой полупроводниковый трехэлектродный прибор, в котором управление током, создаваемым направленным движением носителей заряда одного знака между двумя электродами, достигается с помощью электрического поля (отсюда и название «полевые»), приложенного к третьему электроду. Электроды, между которыми протекает рабочий ток, носят название *истока* и *стока*, причем истоком считается тот электрод, через который носители втекают в прибор. Третий электрод называется *затвором*. Изменение величины рабочего тока в униполярном транзисторе осуществляется путем изменения эффективного сопротивления токопроводящего участка, полупроводникового материала между истоком и стоками, называемого *каналом*. Это изменение производится путем уменьшения или увеличения области 5, (рис. 1.10). Увеличение напряжения начального смещения перехода приводит к расширению области обедненного слоя. В результате этого оставшаяся площадь сечения электропроводного канала в кремнии уменьшается и транзистор запирается. И, наоборот,

при уменьшении величины запирающего напряжения на затворе область 5, обедненная носителями тока, сжимается, превращаясь в острый клин. При этом увеличивается сечение электропроводного канала и транзистор отпирается.

В зависимости от типа проводимости полупроводникового материала канала различаются униполярные транзисторы с p и n каналом. То обстоятельство, что управление величиной рабочего тока униполярных транзисторов осуществляется с помощью канала, дало им второе наименование — *канальные транзисторы*. Третье название того же самого полупроводникового прибора — *полевой транзистор* характеризует то, что управление рабочим током осуществляется электрическим полем (напряжением), а не электрическим током, как это имеет место в биполярном транзисторе. Эта последняя особенность униполярных транзисторов, дающая возможность получать очень высокое входное сопротивление приборов, исчисляемое десятками и сотнями мегом, и определила их основное распространенное название: полевые транзисторы.

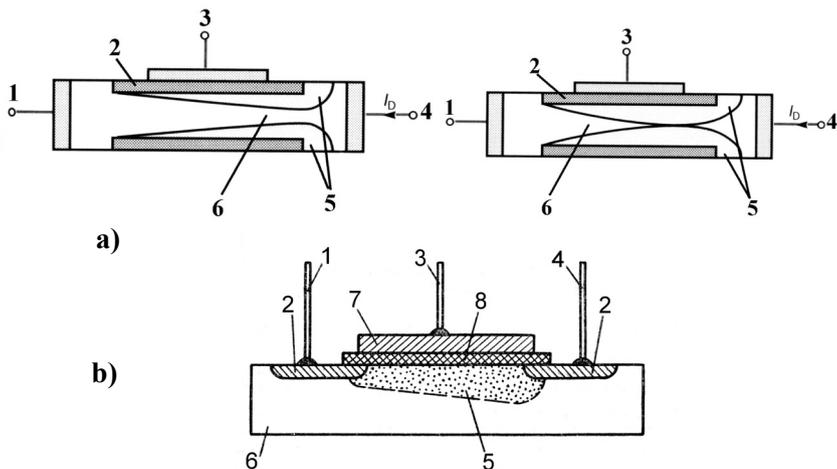


Рис. 1.10. Упрощенная структура FET (a) and MOSFET (b) транзисторов. 1 — «исток»; 2 — примесь n -типа; 3 — «gate»; 4 — «сток»; 5 — область, обедненная носителями тока; 6 — проводящий канал в кремнии p -типа; 7 — металл; 8 — двуокись кремния.

Следует отметить, что кроме полевых транзисторов с p - n переходом между затвором и каналом (FET) существуют и полевые

транзисторы с изолированным затвором: Metal Oxide Semiconductor Transistor (MOSFET). Последние были предложены в 1963 г. S. Hofstein F. и Heiman. Полевые транзисторы с изолированным затвором появились в результате поиска путей и средств дальнейшего повышения входного сопротивления и расширения частотного диапазона полевых транзисторов с $p-n$ переходом. От своих предшественников такие полевые транзисторы отличаются главным образом тем, что в них смещенный в обратном направлении переход заменен управляющей структурой металл — окисел — полупроводник, сокращенно MOSFET - структурой. Согласно рис. 1.10 основу прибора составляет монокристалл кремния, в данном случае p типа. Области истока и стока имеют проводимость, противоположную остальному кристаллу, то есть n типа. Расстояние между истоком и стоком очень мало, обычно около 1 мк. Область полупроводника, расположенная между истоком и стоком и при определенных условиях способная проводить ток, называется, как и в предыдущем случае, каналом. По существу, канал представляет собой область n типа, полученную путем диффузии малого количества донорной примеси в кристалл с проводимостью p типа. Собственно, затвор представляет собой металлическую пластинку, которая перекрывает зоны истока и стока. Она изолируется от монокристалла слоем диэлектрика толщиной всего 0,1 мк. Диэлектриком служит выращенная при высокой температуре пленка двуокиси кремния. Наличие этой пленки позволяет эффективно регулировать концентрацию основных носителей в области канала путем *изменения и величины, и полярности напряжения затвора*. В этом основное отличие MOSFET - транзисторов, (рис. 1.12) от рассмотренных ранее полевых транзисторов, (рис. 1.11), с $p-n$ переходом, которые могут хорошо работать лишь *при запирающем напряжении* затвора. Изменение полярности напряжения смещения приводит к отпираанию перехода и резкому снижению входного сопротивления транзистора.

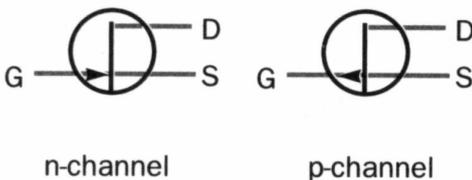


Рис. 1.11. Условное обозначение на схемах FET транзисторов n - и p -канальных:
G –затвор(gate); S – исток (source); D – сток (drain)

Основные преимущества MOSFET-транзисторов: во-первых, наличие изолированного затвора, позволяющего увеличить входное сопротивление, по крайней мере, в 1000 раз по сравнению с входным сопротивлением полевого транзистора с *p-n* переходом, доведя его до миллиарда мегом; во-вторых, емкости затвора и стока становятся значительно меньше и обычно не превышают 1—2 пф; в-третьих, предельная частота MOSFET-транзисторов может достигать величины $f_T = 700\text{—}1000 \text{ МГц}$, то есть, по крайней мере, в 10 раз выше, чем у обычных полевых транзисторов.

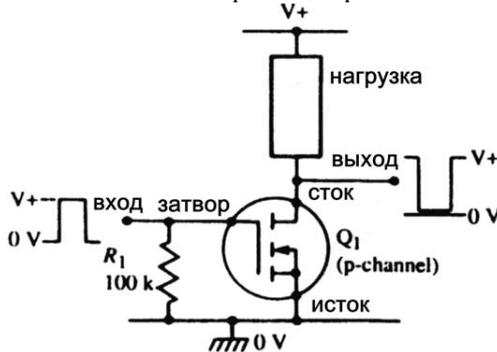


Рис. 1.12. Условное обозначение и схема включения MOSFET-транзистора.

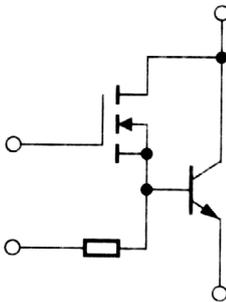
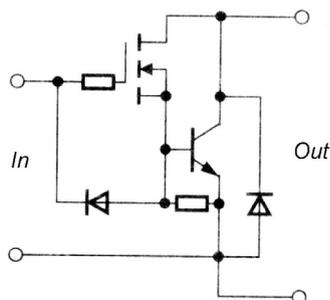


Рис. 1.13. Составная структура — “pobistor”

Стремление объединить в одном коммутационном устройстве положительные качества биполярного и полевого транзистора привели к созданию в 1978 г. некоторой составной структуры, названной “pobistor”, (рис. 1.13). Идея модульного соединения кристаллов биполярного и полевого транзисторов в общем корпусе была ис-

пользована фирмой “Mitsubishi Electric” для создания мощного коммутационного полупроводникового модуля, (рис. 1.14).

Рис. 1.14. Схема мощного ключевого модуля CASCADE-CD компании “Mitsubishi Electric” на рабочее напряжение 1000 В и токи свыше 100 А



Дальнейшее развитие технологии производства полупроводниковых приборов позволило создать однокристалльный прибор со сложной структурой, обладающий свойствами “robistora”: IGBT- транзистор. Биполярный транзистор с изолированным затвором (*Insulated Gate Bipolar Transistor - IGBT*) – электронный прибор, совмещающий в себе свойства и обычного биполярного транзистора (высокую коммутируемую мощность и высокое быстродействие), и полевого транзистора с изолированным затвором (управление напряжением). Иными словами, его выходные характеристики (переход коллектор-эмиттер) подобны характеристикам обычных биполярных транзисторов, а цепь управления такая же, как у MOSFET. Схема включения IGBT-транзистора приведена на рис. 1.15.

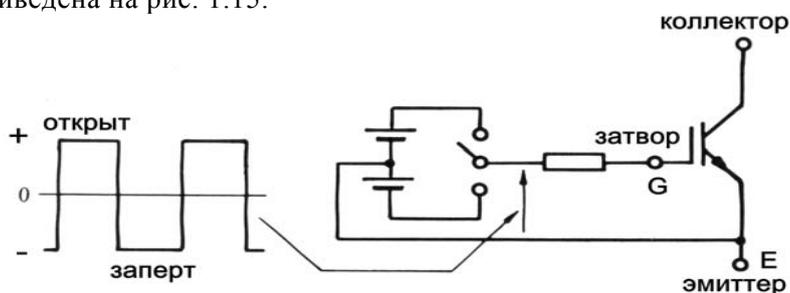


Рис. 1.15. Биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT)

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	4
Глава I. Элементная база	6
1.1. Полупроводниковые материалы и приборы	6
1.2. Принцип действия транзистора	15
1.3. Некоторые другие типы транзисторов	18
1.4. Основные режимы работы транзисторов	27
1.5. Логические элементы на транзисторах	35
1.6. Тиристоры	45
1.7. Оптроны	54
1.8. Электромагнитные реле	58
1.9. Полупроводниковые управляющие устройства (драйверы) для электромеханических реле	70
Глава II. Устройство микропроцессорных устройств релейной защиты	73
2.1. Общая структура и конструктивное исполнение микропроцессорных устройств релейной защиты(МУРЗ)	73
2.2. Модули аналоговых входов	79
2.3. Модули выходных реле	82
2.4. Модули цифровых (логических) входов	92
2.5. Модуль центрального процессора	99
2.5.1. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП)	102
2.5.2. Память	109
2.5.3. Микропроцессор	118
2.6. Внутренний источник питания	129
2.7. Система самодиагностики МУРЗ	142
2.8. Новая концепция построения МУРЗ	150
Литература к главе II	172
Глава III. Надежность МУРЗ: проблемы и решения	173
3.1. Мифы о надежности МУРЗ	173
3.1.1. Отсутствие в МУРЗ подвижных частей	174
3.1.2. Сравнительная надежность электромеханических, полупроводниковых и микропроцессорных реле	175
3.1.3. Надежность и самодиагностика	179
3.1.3.1. Элементы памяти	179
3.1.3.2. Источник питания	180
3.1.3.3. Узел аналоговых входов	181
3.1.4. МУРЗ содержит меньшее количество элементов	182

3.1.5. <i>Существование электроэнергетики сегодня невозможно без МУРЗ</i>	184
3.1.6. <i>Еще один класс проблем, о которых умалчивается</i>	189
3.2. Выходные электромагнитные реле: проблемы и решения	190
3.3. Логические входы: проблемы и решения	213
3.4. Реальные данные о надежности МУРЗ	223
3.5. Проблемы оценки надежности МУРЗ	233
Литература к главе III	242

Глава IV. Проблема электромагнитных воздействий на МУРЗ 248

4.1. Чувствительность МУРЗ к электромагнитным воздействиям	248
4.2. Грозовые разряды	252
4.3. Коммутационные процессы и электромагнитные поля от работающего оборудования	255
4.4. Проблемы экранирования контрольных кабелей	260
4.5. Искажения сигналов в цепях трансформаторов тока	268
4.6. Влияние на МУРЗ гармоник в измеряемом напряжении и токе ...	278
4.7. Качество напряжения в питающей сети	279
4.8. Преднамеренные деструктивные электромагнитные воздействия	281
4.8.1. <i>Актуализация проблемы электромагнитной совместимости для современной электроэнергетики</i>	281
4.8.2. <i>Классификация и особенности преднамеренных деструктивных электромагнитных воздействий</i>	282
4.8.3. <i>Воздействие ПДЭВ на МУРЗ</i>	295
4.8.4. <i>Возможные пути решения проблемы защиты МУРЗ от ЭМИ</i>	299
4.8.5. <i>Повышение живучести МУРЗ</i>	315
4.9. Кибербезопасность	319
Литература к главе IV	324