Наиболее интересные явления происходят при контакте полупроводников п- и р -типов. Эти явления используются в большинстве полупроводниковых приборов.

р-п-Переход. Рассмотрим, что будет происходить, если привести в контакт два одинаковых полупроводника, но с разным типом проводимости: слева полупроводник п-типа, а справа полу­проводник р-типа (рис. 16.10).

Контакт двух полупроводников с разным типом проводимости называют р- п- или п- р-переходом.

Электроны на рисунке изображены голубыми кружочками, дырки - серыми.

В левой части много свободных электронов, а в правой их концентрация очень мала. В правой части, наоборот, много дырок, т. е. вакантных мест для электронов. Как только полупроводники приводят в контакт, начинается диффузия электронов из области с проводимостью п-типа в область с проводимостью р-типа и соответственно переход дырок в обратном направлении. Перешедшие в полупроводник р-типа электроны занимают свободные места, происходит процесс рекомбинации электронов и дырок, а попавшие в полупроводник п·типа дырки также исчезают благодаря электронам, занимающим вакантное место. Таким об­ разом, вблизи границы раздела полупроводников с разным типом проводимости возникает слой, обеднённый носителями тока (его называют контактным слоем). Этот слой фактически представляет собой диэлектрик, его сопротивление очень велико. При этом полупроводник п·типа заряжается положительно, а полупроводник р·типа - отрицательно. В зонд контакта возникает стационарное электрическое поле напряжённостью Ек, препятствующее дальнейшей диффузии электронов и дырок.

Суммарное сопротивление приведённых в контакт полупроводников складывается из сопротивления полупроводника п-типа, р- n-перехода и полупроводника р-типа: R = Rn + Rp n + RP . Так как сопротивления областей с n· и р-тиnами проводимости малы (там много носителей заряда - электронов и дырок), ·то суммарное сопротивление определяется в основном сопротивлением р- п-nерехода.

Включим полупроводник с р-п-переходом в электрическую цепь так, чтобы потенциал полупроводника р-типа был положительным, а п-типа - отрицательным (рис. 16.11). В этом случае напряжённость внешнего поля будет направлена в сторону, противоположную напряжённости контактного слоя. Модуль суммарной напряжённости Е = Ек - Евнеш · Так как поле, удерживающее носители тока, ослабевает, то у электронов уже достаточно энергии, чтобы его преодолеть.

Через переход пойдёт ток, при этом он будет создан основными носителями - из области с п-типом проводимости в область с р-типом проводимости идут электроны, а из области с р-типом в область с п-типом - дырки. В этом случае р- п-переход называется прямым.

Отметим, что электрический ток идёт во всей цепи: от положительного контакта через область р-типа к р- п-переходу, затем через область п-типа к отрицательному контакту (рис. 16.12). Проводимость всего образца велика, а сопротивление мало. Чем больше подаваемое на контакт напряжение, тем больше сила тока.

Зависимость силы тока от разности потенциалов - вольт-амперная характеристика прямого перехода - изображена на рисунке 16.13 сплошной линией.

Отметим, что изменение подаваемого напряжения приводит к резкому увеличению силы тока. Так, увеличение напряжения на 0,25 В может привести к увеличению силы тока в 20 ООО раз.

При прямом переходе сопротивление запирающего слоя мало, и оно также зависит от подаваемого напряжения, с увеличением которого сопротивление уменьшается.

Изменим теперь полярность подключения батареи. В этом случае напряжённости внешнего и контактного полей направлены в одну сторону (рис. 16.14) и модуль суммарной напряжённости Е == Ек + Евнеш · Внешнее поле оттягивает электроны и дырки от контактного слоя, в результате чего он расширяется. В связи с этим у электронов уже не хватает энергии для того, чтобы преодолеть этот слой. Теперь переход через контакт осуществляется неосновными носителями, число которых мало.

Сопротивление контактного слоя очень велико. Ток через р - п-переход не идёт. Образуется так называемый запирающий слой. Такой переход называется обратным.

Вольт-амперная характеристика обратного перехода изображена на рисунке 16.13 штриховой линией.

р-п-Переход по отношению к току оказывается несимметричным: в прямом направлении сопротивление перехода значительно меньше, чем в обратном. Таким образом, р- п-переход можно использовать для выпрямления электрического тока.

Устройство, содержащее р- n-переход и способное пропускать ток в одном направлении и не пропускать в противоположном, называется полупроводниковым диодом.

Если на контакты полупроводникового диода подать переменное напряжение, то ток по цепи пойдёт только в одну сторону.

Полупроводниковые диоды изготовляют из германия, кремния, селена и других веществ.

Рассмотрим, как создают р- п­ переход, используя германий, обладающий проводимостью п-типа, с небольшой добавкой донорной примеси. Этот переход не удаётся получить путём механического соединения двух полупроводников с различными типами проводимости, так как при этом получается слишком большой зазор между полупроводниками. Толщина же р-п-перехода должна быть не больше межатомных расстояний, поэтому в одну из поверхностей образца вплавляют индий. Для создания полупроводникового диода полупроводник с примесью р·типа, содержащий атомы индия, нагревается до высокой температуры. Пары примеси п-типа (например, мышьяка) осаждаются на поверхность кристалла. Вследствие диффузии они внедряются в кристалл, и на поверхности кристалла с проводимостью р·типа образуется область с электронным типом проводимости (рис. 16.15).

Для предотвращения вредных воздействий воздуха и света кристалл германия помещают в герметичный металлический корпус.

Полупроводниковые диоды применяют в детекторах приёмников для выделения сигналов низкой частоты, для защиты от неправильного подключения источника к цепи.

В светофорах используются специальные полупроводниковые диоды. При прямом подключении такого диода происходит активная рекомбинация электронов и дырок. При этом выделяется энергия в виде светового излучения.

Схематическое изображение диода приведено на рисунке 16.16. Полупроводниковые выпрямители обладают высокой надёжностью и имеют большой срок службы. Однако они могут работать лишь в ограничен­ ном интервале температур (от -70 до 125 °С).

Транзисторы. Ещё одно применение полупроводников с примесным типом проводимости - транзисторы - приборы, используемые для усиления электрических сигналов.

Рассмотрим один из видов транзисторов из германия или кремния с введёнными в них донорными и акцепторными примесями. Распределение примесей таково, что создаётся очень тонкая (толщиной порядка нескольких микрометров) прослойка полупроводника п-типа между двумя слоями полупроводника р-типа (рис. 16 .17). Эту тонкую прослойку называют основанием или базой.

В кристалле образуются два р-п-перехода, прямые направления которых противоположны. Три вывода от областей с различными типами проводимости позволяют включать транзистор в схему, изображённую на рисунке 16.17. В данной схеме при подключении батареи Бl левый р-п-переход является прямым. Левый полупроводник с проводимостью р-типа называют эмиттером. Если бы не было правого р- п-перехода, в цепи эмиттер - база существовал бы ток, зависящий от напряжения источников (батареи Бl и источника переменного напряжения) и сопротивления цепи, включая малое сопротивление прямого перехода эмиттер - база.

Батарея Б2 включена так, что правый п-р-переход в схеме (см. рис.16.17) является обратным. Правая область с проводимостью р-типа называется коллектором. Если бы не было левого р- п-перехода, сила тока в цепи коллектора была бы близка к нулю, так как сопротивление обратного перехода очень велико. При существовании же тока в левом р-п-переходе появляется ток и в цепи коллектора, причём сила тока в коллекторе лишь немного меньше силы тока в эмиттере. (Если на эмиттер подано отрицательное напряжение, то левый р-п-переход будет обратным, и ток в цепи эмиттера и в цепи коллектора будет практически отсутствовать.)

Это объясняется следующим образом. При создании напряжения между эмиттером и базой основные носители полупроводника р-типа (дырки) проникают в базу, где они являются уже неосновными носителями. Поскольку толщина базы очень мала и число основных носителей (электронов) в ней невелико, попавшие в неё дырки почти не объединяются (не рекомбинируют) с электронами базы и проникают в коллектор за счёт диффузии. Правый р-п-переход закрыт для основных носителей заряда базы - электронов, но не для дырок. В коллекторе дырки увлекаются электрическим полем и замыкают цепь. Сила тока, ответвляющегося в цепь эмиттера из базы, очень мала, так как площадь сечения базы в горизонтальной (см. рис. 16.1 7) плоскости много меньше сечения в вертикальной плоскости.

Сила тока в коллекторе, почти равная силе тока в эмиттере, изменяется вместе с током через эмиттер. Сопротивление резистора R мало влияет на ток в коллекторе, и это сопротивление можно сделать достаточно большим. Управляя током эмиттера с помощью источника переменного напряжения, включённого в его цепь, мы получим синхронное изменение напряжения на резисторе R.

При большом сопротивлении резистора изменение напряжения на нём может в десятки тысяч раз превышать изменение напряжения сигнала в цепи эмиттера. Это означает усиление напряжения. Поэтому на нагрузке R можно получить электрические сигналы, мощность которых во много раз превышает мощность, поступающую в цепь эмиттера.

Применение транзисторов. Современная электроника базируется на микросхемах и микропроцессорах, включающих в себя колоссальное число транзисторов.

Компьютеры, составленные из микросхем и микропроцессоров, фактически изменили окружающий человека мир. В настоящее время не существует ни одной области человеческой деятельности, где компьютеры не служили бы активными помощниками человека. Например, в космических исследованиях или высокотехнологичных производствах работают микропроцессоры, уровень организации которых соответствует искусственному интеллекту.

Транзисторы (рис. 16.18, 16.19) получили чрезвычайно широкое распространение в современной технике. Они заменили электронные лампы в электрических цепях научной, промышленной и бытовой аппаратуры. Портативные радиоприёмники, в которых используются такие приборы, в обиходе называются транзисторами. Преимуществом транзисторов (так же как и полупроводниковых диодов) по сравнению с электронными лампами является прежде всего отсутствие накалённого катода, потребляющего значительную мощность и требующего времени для его разогрева. Кроме того, эти приборы в десятки и сотни раз меньше по размерам и массе, чем электронные лампы.