

Транзистор

Транзистор – прибор, используемый в электрических устройствах (схемах), предназначенных для усиления, генерации, преобразования и коммутации сигналов в электрических цепях. Термин «транзистор» происходит от англ. *transfer* – перенос и *resistor* – сопротивление. В названии устройства отображена его суть – возможность изменять сопротивление одной области прибора, управляя электрическим напряжением в другой его области.

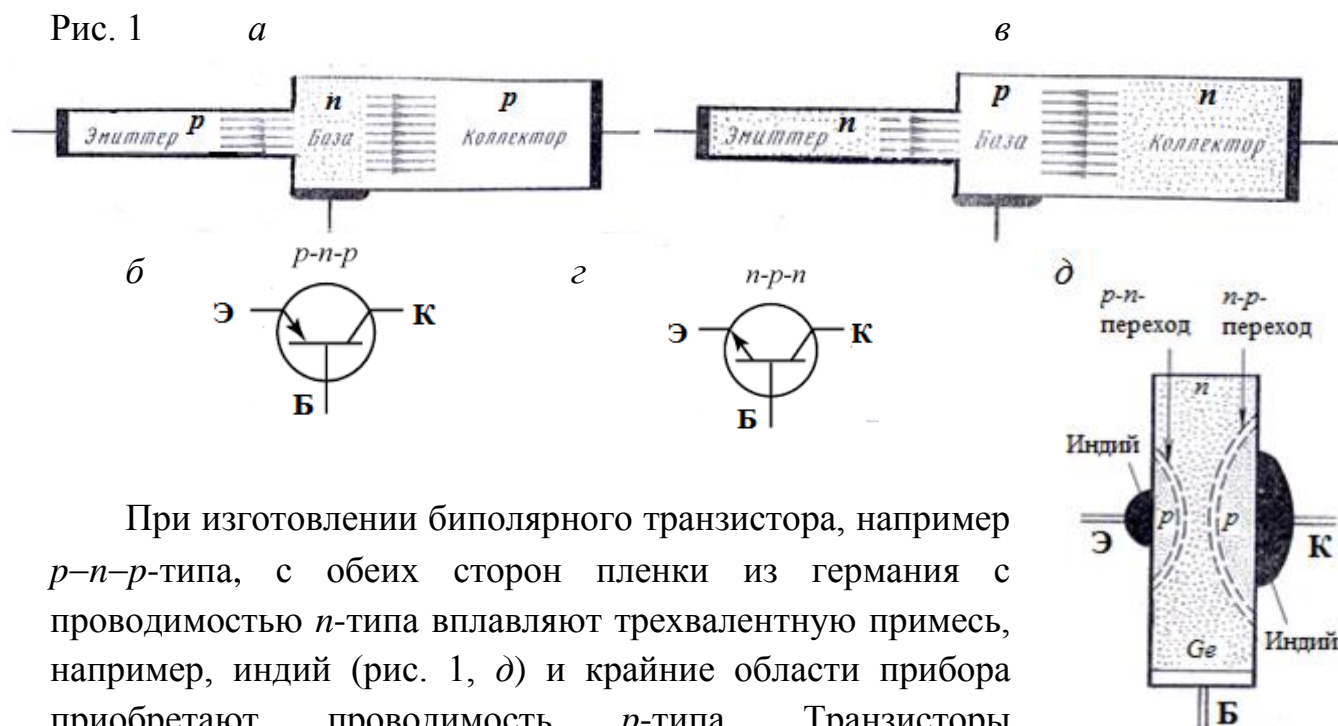
Промышленное применение транзисторов началось в середине XX века, в частности на телефонных коммутационных станциях. Однако чаще всего транзисторы используют для усиления электрических сигналов. Например, при приеме радио- и телесигналов слабый сигнал с антенны, мощность которого миллиардные доли ватта, усиливается для получения звука и изображения на экране. Мощность усиленного сигнала составляет несколько десятков и даже сотен ватт.

Различают биполярные и униполярные (полевые) транзисторы. Если в основе работы биполярного транзистора лежит использование носителей обоих знаков (электронов и дырок), то в полевых транзисторах – использование носителей одного какого-либо знака (поэтому их называют униполярными). Эти типы транзисторов различаются также и по областям применения. Биполярные транзисторы используют, в основном, в аналоговой технике, а полевые – в цифровой.

Первыми биполярный транзистор изобрели и изготовили ученые США Джон Бардин и Уолтер Хаузер Браттейн в 1948 г. Несколько позже их соотечественник Уильям Брэдфорд Шокли разработал теорию биполярного плоскостного транзистора. Вклад ученых в прогресс человечества был отмечен присуждением им Нобелевской премии по физике за 1956 г. с формулировкой: «За исследование полупроводников и открытие транзисторного эффекта».

Принцип работы биполярных транзисторов основан на использовании двух электронно-дырочных переходов. Один из переходов включен в прямом (пропускном) направлении (эмиттерный переход), а другой – в обратном (запирающем) направлении (коллекторный переход). Эти два перехода разделяют биполярные транзисторы на три области: эмиттер, базу и коллектор. Примесная проводимость базы транзистора может быть как электронной, так и дырочной. В зависимости от этого биполярные транзисторы подразделяют на два типа: $p-n-p$ (рис. 1, а) и $n-p-n$ (рис. 1, в). Наряду со схематическим изображением обоих типов биполярных транзисторов на рис. 1, б, г представлено условное обозначение этих приборов в электрических схемах.

Стрелкой всегда обозначают эмиттер. Ее направление указывает направление электрического тока в нормальном режиме работы прибора.



При изготовлении биполярного транзистора, например $p-n-p$ -типа, с обеих сторон пленки из германия с проводимостью n -типа вплавляют трехвалентную примесь, например, индий (рис. 1, д) и крайние области прибора приобретают проводимость p -типа. Транзисторы $n-p-n$ -типа устроены аналогичным образом, только материал базы у этих приборов обладает дырочной проводимостью, а эмиттера и коллектора – электронной (рис. 1, в). В результате диффузии основных носителей заряда через $n-p$ -переходы – электронов из электронной области транзисторов в дырочную и дырок из дырочной области в электронную – на границах этих областей образуются двойные слои разноименно заряженных ионов. Между областями с различным типом проводимости объемные заряды ионов создают электрические поля в эмиттерном и коллекторном переходах, значения напряжения U_K которых для германиевых $n-p$ -переходов примерно равно 0,35 В, а для кремниевых – около 0,6 В. На рисунках 1, а и 1, в представлено схематическое изображение линий напряженностей этих полей. Транзистор включают в электрическую схему с помощью металлических электродов, нанесенных на каждую из его областей.

Основным рабочим состоянием биполярного транзистора является активное состояние, когда к эмиттерному $n-p$ -переходу приложено напряжение в пропускном направлении, а к коллекторному – в запирающем. Потенциал коллектора транзистора $p-n-p$ -типа всегда должен быть меньше потенциала эмиттера (рис. 2, а), а потенциал коллектора транзистора $n-p-n$ -типа всегда больше потенциала эмиттера (рис. 2, б). Источник тока с ЭДС \mathcal{E}_K создает дополнительные электрические поля в областях коллекторного и эмиттерного

переходов, которые, накладываясь на электрические поля электронно-дырочных переходов, усиливают поле в коллекторном переходе и ослабляют в эмиттерном (рис. 2, а и 2, б).

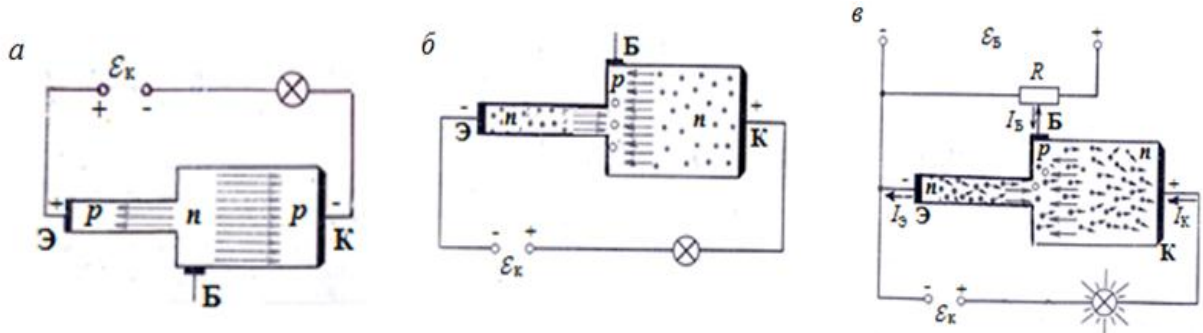


Рис. 2

На рисунке 2, в представлена схема цепи, в которой потенциал базы транзистора $n-p-n$ -типа можно регулировать потенциометром R . При положительном относительно эмиттера потенциале базы направление напряженности электрического поля, создаваемого источником тока с ЭДС \mathcal{E}_B в области эмиттерного перехода, противоположно направлению напряженности электрического поля $n-p$ -перехода. Таким образом, результирующее электрическое поле оказывается ослабленным. Основные носители заряда могут диффундировать через эмиттерный $n-p$ -переход – электроны из n -области (эмиттера) в p -область (базу) и дырки из p -области в n -область. Два этих встречных потока определяют силу тока эмиттера $I_Э$.

Электроны (основные носители заряда в эмиттере), диффундируя через эмиттерный $n-p$ -переход, продолжают продвигаться из области с высокой концентрацией вблизи эмиттера в область с низкой концентрацией к коллектору. Достигнув коллекторного $n-p$ -перехода, электроны экстрагируются (втягиваются) его полем.

Попав в базу транзистора, электроны превращаются в неосновные носители заряда и некоторые из них могут рекомбинировать с основными носителями заряда в базе – дырками. Образно выражаясь, при рекомбинации происходит взаимное «уничтожение» пары носителей заряда – электрона и дырки. Чтобы свести последствия рекомбинации к минимуму, толщину базы делают значительно меньше длины свободного пробега носителей заряда, попадающих в нее из эмиттера, а концентрацию n основных носителей заряда в базе много меньше концентрации основных носителей в эмиттере (рис. 3). Чтобы максимально

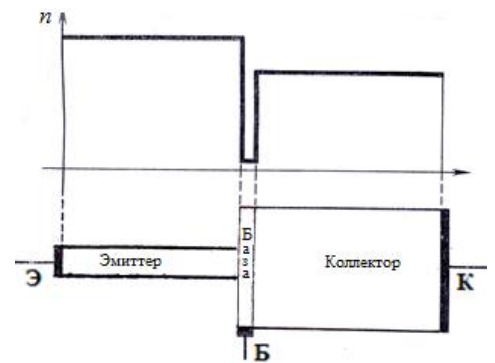


Рис. 3

перехватить поток носителей заряда, движущихся от эмиттера к коллектору, площадь коллекторного перехода делают в несколько раз больше площади эмиттерного (рис. 1, δ), а концентрацию основных носителей заряда в коллекторе несколько меньше концентрации основных носителей в эмиттере (рис. 3).

Однако, небольшая доля (1–5 %) носителей заряда, инжектированных (от англ. *inject* – впрыскивать, вводить) эмиттером в базу, рекомбинируют с основными носителями заряда в базе, убыль которых восполняется через базовый вывод (электрод). Концентрация основных носителей заряда в эмиттерной области транзистора в сотни раз превышает концентрацию основных носителей заряда в базе. Поэтому, когда эмиттерный переход включен в прямом направлении, ток через него образован в основном (около 99 %) диффузионным потоком носителей заряда, инжектируемых эмиттером в базу. Вклад встречного диффузионного потока, создаваемого носителями заряда, переходящими из базы в эмиттер, в ток эмиттера $I_{\text{Э}}$ не превышает 1 %. Применяв закон сохранения электрического заряда к транзистору в целом, получим: $I_{\text{Э}} = I_{\text{К}} + I_{\text{Б}}$. Ток, проходящий по эмиттерному выводу транзистора, находящегося в активном состоянии, равен сумме токов, проходящих по его коллекторному и базовому выводам (рис. 2, ϵ).

Соотношение между токами эмиттера $I_{\text{Э}}$, коллектора $I_{\text{К}}$ и базы $I_{\text{Б}}$ транзистора в активном состоянии в основном определяется условиями, при которых происходят диффузия и рекомбинация носителей заряда в базе. Эти условия существенно зависят от используемых при изготовлении транзисторов материалов и конструкции их составных частей. Совершенствование технологических процессов при изготовлении транзисторов позволило уменьшить толщину базы с 10–50 мкм у первых образцов до десятых долей микрометра. Это привело не только к снижению доли рекомбинирующих в базе носителей заряда до 1 % в типичных транзисторах, но и к стабилизации условий диффузии носителей заряда.

Кроме того, соотношение между токами $I_{\text{Э}}$, $I_{\text{К}}$ и $I_{\text{Б}}$ транзистора в активном состоянии практически не зависит от коллекторного и базового напряжений. Поэтому транзистор можно использовать и как устройство, распределяющее ток, проходящий по одному из его электродов – эмиттеру, в определенном соотношении между двумя другими электродами – базой и коллектором, и как ключ, который при подаче соответствующего напряжения между эмиттером и базой позволяет включать и выключать цепи десятки и даже сотни тысяч раз в секунду.

Благодаря появлению транзисторов, получили в свое время мощный толчок к развитию системы обработки данных и системы связи. Без транзисторов невозможна работа компьютеров, которые в современном мире повсеместно используют для обработки и хранения информации. Транзисторы и интегральные схемы на транзисторах применяют в электронной аппаратуре, различного рода гаджетах, в приборах автоматического управления и вычислительной техники в качестве бесконтактных переключательных элементов – электронных ключей.