

## Лекция 5

### Полупроводниковый диоды и биполярные транзисторы

Полупроводниковый диод — полупроводниковый прибор, в широком смысле — электронный прибор, изготовленный из полупроводникового материала, имеющий два электрических вывода (электрода). В более узком смысле — полупроводниковый прибор, во внутренней структуре которого сформирован один p-n-переход.



#### Схема полупроводникового кремниевого диода.

Ниже приведено его символическое изображение на электрических принципиальных схемах. В отличие от других типов диодов, например, вакуумных, принцип действия полупроводниковых диодов основывается на различных физических явлениях переноса зарядов в твердотельном полупроводнике и взаимодействии их с электромагнитным полем в полупроводнике.

#### Основные характеристики и параметры диодов



Диод ДГ-Ц25. 1959 г.

Вольт-амперная характеристика

Максимально допустимое постоянное обратное напряжение

Максимально допустимое импульсное обратное напряжение

Максимально допустимый постоянный прямой ток

Максимально допустимый импульсный прямой ток

Номинальный постоянный прямой ток

Прямое постоянное напряжение на диоде при номинальном токе (т. н. «падение напряжения»)

Постоянный обратный ток, указывается при максимально допустимом обратном напряжении

Диапазон рабочих частот

Ёмкость

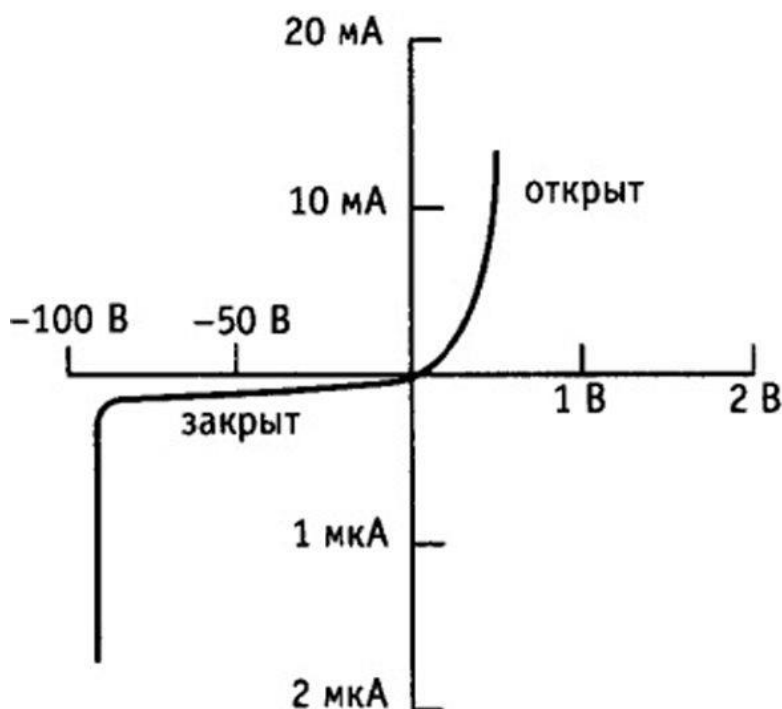
Пробивное напряжение (для защитных диодов и стабилитронов)

Тепловое сопротивление корпуса при различных вариантах монтажа

Максимально допустимая мощность рассеивания

### **Свойства и вольт-амперная характеристика диода.**

Если к аноду приложить положительное напряжение, то диод откроется, и его можно рассматривать как проводник, работающий в «одну сторону». При смене полярности диод закрывается. Поведение диода при различных значениях протекающего тока, значения и полярности приложенного напряжения представляется как вольт-амперная характеристика полупроводникового диода



Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода

Часть графика, находящаяся в правой верхней части, соответствует прямому направлению тока. В левом третьем квадранте отображается зависимость тока от напряжения обратной полярности (диод в закрытом состоянии). Обратный ток исчезающе мал, его не принимают во внимание до тех пор, пока он не начинает быстро расти при росте обратного напряжения до недопустимой для конкретного диода величины. Большинство диодов не могут работать при таких значениях обратного напряжения, поскольку резко растёт температура и диод выходит из строя. Значение обратного напряжения, при котором происходит пробой диода, приводится в технической документации.

## **Классификация диодов**

### **Типы диодов по назначению**

Выпрямительные диоды - предназначены для преобразования переменного тока в постоянный.

Импульсные диоды - имеют малую длительность переходных процессов, предназначены для применения в импульсных режимах работы.

Детекторные диоды - предназначены для детектирования сигнала

Смесительные диоды - предназначены для преобразования высокочастотных сигналов в сигнал промежуточной частоты.

Переключательные диоды - предназначены для применения в устройствах управления уровнем сверхвысокочастотной мощности.

Параметрические диоды - предназначены для усиления слабых колебаний

Ограничительные диоды - предназначены для защиты радио и бытовой аппаратуры от повышения сетевого напряжения.

Умножительные

Настроечные

Генераторные

### **Типы диодов по частотному диапазону**

Низкочастотные

Высокочастотные

СВЧ

## Типы диодов по размеру р-n перехода

Плоскостные

Точечные

Микросплавные

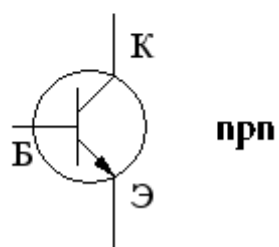
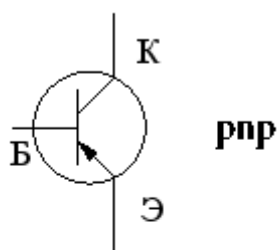
Другая класификация

По назначению	Светодиоды
	Фотодиоды
	Полупроводниковые лазеры
	Выпрямительные
	Импульсные
	Высокочастотные
	Сверхвысокочастотные
	Стабилитроны
Светодиоды	Суперлюминесцентный диод
	Органический светодиод
	Синий светодиод
	Белый светодиод
Выпрямительные	Селеновый выпрямитель
	Медно-закисный выпрямитель
Генераторные диоды	Лавинно-пролётный диод
	Туннельный диод
	Диод Ганна

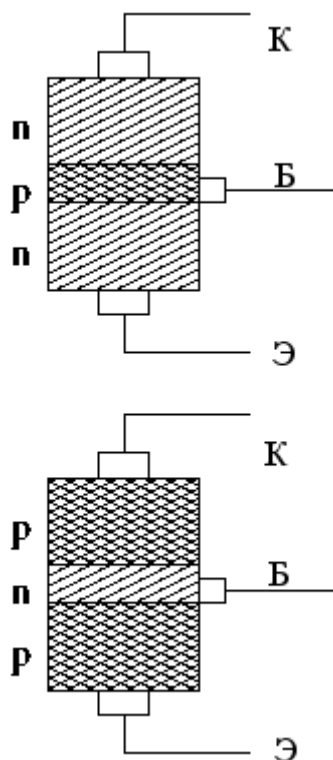


Источники опорного напряжения	Стабилитрон
	Со скрытой структурой
	Лавинный диод
	Стабистор
Прочие	Диод Шоттки
	Обращённый диод
	pin-диод
	Фотодиод
	Лавинный фотодиод
	Фотоматрица
	Варикап
	Варактор
	Магнитодиод
	Точечный диод

## Биполярные транзисторы



Обозначение биполярных транзисторов на схемах. Направление стрелки показывает направление тока через эмиттерный переход, и служит для идентификации n-p-n и p-n-p транзисторов. Наличие окружности символизирует транзистор в индивидуальном корпусе, отсутствие — транзистор в составе микросхемы.

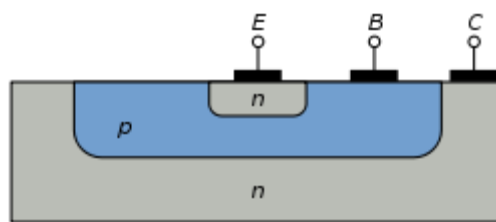


Простейшая наглядная схема устройства транзистора

Биполярный транзистор — трёхэлектродный полупроводниковый прибор, один из типов транзисторов. В полупроводниковой структуре сформированы два р-п-перехода, перенос заряда через которые осуществляется носителями двух полярностей — электронами и дырками. Именно поэтому прибор получил название «биполярный» (от англ. bipolar), в отличие от полевого (униполярного) транзистора.

Применяется в электронных устройствах для усиления или генерации электрических колебаний, а также в качестве коммутирующего элемента (например, в схемах ТТЛ).

### Устройство



Упрощенная схема поперечного разреза планарного биполярного n-p-n транзистора.

Биполярный транзистор состоит из трёх полупроводниковых слоёв с чередующимся типом примесной проводимости: эмиттера (обозначается «Э», англ. E), базы («Б», англ. B) и коллектора («К», англ. C). В зависимости от порядка чередования слоёв различают n-p-n (эмиттер — n-полупроводник, база — p-полупроводник, коллектор — n-полупроводник) и p-n-p (эмиттер — p-полупроводник, база — n-полупроводник, коллектор — p-полупроводник) транзисторы. К каждому из слоёв подключены проводящие невыпрямляющие контакты[1].

С точки зрения типов проводимостей эмиттерный и коллекторный слои не различимы, но при изготовлении они существенно различаются степенью легирования для улучшения электрических параметров прибора. Коллекторный слой легируется слабо, что повышает допустимое коллекторное напряжение. Эмиттерный слой — сильно легированный: величина пробойного обратного напряжения эмиттерного перехода не критична, так как обычно в электронных схемах транзисторы работают с прямосмещённым эмиттерным переходом. Кроме того, сильное легирование эмиттерного слоя обеспечивает лучшую инжекцию неосновных носителей в базовый слой, что увеличивает коэффициент передачи по току в схемах с общей базой. Слой базы легируется слабо, так как располагается между

эмиттерным и коллекторным слоями и должен иметь большое электрическое сопротивление.

Общая площадь перехода база-эмиттер выполняется значительно меньше площади перехода коллектор-база, что увеличивает вероятность захвата неосновных носителей из базового слоя и улучшает коэффициент передачи. Так как в рабочем режиме переход коллектор-база обычно включён с обратным смещением, в нём выделяется основная доля тепла, рассеиваемого прибором, и повышение его площади способствует лучшему охлаждению кристалла. Поэтому на практике биполярный транзистор общего применения является несимметричным устройством (то есть инверсное включение, когда меняют местами эмиттер и коллектор, нецелесообразно).

Для повышения частотных параметров (быстродействия) толщину базового слоя делают меньше, так как этим, в том числе, определяется время «пролёта» (диффузии в бездрейфовых приборах) неосновных носителей. Но при снижении толщины базы снижается предельное коллекторное напряжение, поэтому толщину базового слоя выбирают исходя из разумного компромисса.

В первых транзисторах в качестве полупроводникового материала использовался металлический германий. Полупроводниковые приборы на его основе имеют ряд недостатков, и в настоящее время (2015 г.) биполярные транзисторы изготавливают в основном из монокристаллического кремния и монокристаллического арсенида галлия. Благодаря очень высокой подвижности носителей в арсениде галлия приборы на его основе обладают высоким быстродействием и используются в сверхбыстродействующих логических схемах и в схемах СВЧ-усилителей.

### **Принцип работы**

В активном усилительном режиме работы транзистор включён так, что его эмиттерный переход смещён в прямом направлении[2] (открыт), а коллекторный переход смещён в обратном направлении (закрит).

В транзисторе типа n-p-n[3] основные носители заряда в эмиттере (электроны) проходят через открытый переход эмиттер-база (инжектируются) в область базы. Часть этих электронов рекомбинирует (время рекомбинации относительно велико) с основными носителями заряда в базе (дырками). Однако, из-за того, что базу делают очень тонкой и сравнительно слабо легированной, бóльшая часть электронов, инжектированных из эмиттера, диффундирует в область коллектора. Сильное электрическое поле обратно



смещённого коллекторного перехода захватывает электроны (неосновные носители для базы) и переносит их в коллекторный слой. Ток коллектора, таким образом, практически равен току эмиттера, за исключением небольшой потери на рекомбинацию в базе, которая и образует ток базы ( $I_k = I_b + I_z$ ).

Коэффициент  $\alpha$ , связывающий ток эмиттера и ток коллектора ( $I_k = \alpha I_z$ ), называется коэффициентом передачи тока эмиттера. Численное значение коэффициента  $\alpha = 0,9—0,999$ . Чем больше коэффициент, тем эффективней транзистор передаёт ток. Этот коэффициент мало зависит от напряжения коллектор-база и база-эмиттер. Поэтому в широком диапазоне рабочих напряжений ток коллектора пропорционален току базы, коэффициент пропорциональности равен  $\beta = \alpha / (1 - \alpha)$ , от 10 до 1000. Таким образом, малый ток базы управляет значительно бóльшим током коллектора.

## **Режимы работы**

### **Нормальный активный режим**

Переход эмиттер-база включен в прямом направлении (открыт), а переход коллектор-база — в обратном (закрыт):

$U_{эб} > 0$ ;  $U_{кб} < 0$  (для транзистора n-p-n типа), для транзистора p-n-p типа условие будет иметь вид  $U_{эб} < 0$ ;  $U_{кб} > 0$ .

### **Инверсный активный режим**

Эмиттерный переход имеет обратное смещение, а коллекторный переход — прямое:  $U_{кб} > 0$ ;  $U_{эб} < 0$  (для транзистора n-p-n типа).

### **Режим насыщения**

Оба p-n перехода смещены в прямом направлении (оба открыты). Если эмиттерный и коллекторный p-n-переходы подключить к внешним источникам в прямом направлении, транзистор будет находиться в режиме насыщения. Диффузионное электрическое поле эмиттерного и коллекторного переходов будет частично ослабляться электрическим полем, создаваемым внешними источниками  $U_{эб}$  и  $U_{кб}$ . В результате уменьшится потенциальный барьер, ограничивавший диффузию основных носителей заряда, и начнётся проникновение (инжекция) дырок из эмиттера и коллектора в базу, то есть через эмиттер и коллектор транзистора потекут токи, называемые токами насыщения эмиттера ( $I_{з. \text{нас}}$ ) и коллектора ( $I_{к. \text{нас}}$ ).

Напряжение насыщения коллектор-эмиттер ( $U_{кэ. \text{нас}}$ ) — это падение напряжения на открытом транзисторе. Аналогично, напряжение насыщения

база-эмиттер ( $U_{БЭ. нас}$ ) — это падение напряжения между базой и эмиттером на открытом транзисторе.

### Режим отсечки

В данном режиме коллекторный p-n переход смещён в обратном направлении, а на эмиттерный переход может быть подано как обратное, так и прямое смещение, не превышающее порогового значения, при котором начинается эмиссия неосновных носителей заряда в область базы из эмиттера (для кремниевых транзисторов приблизительно 0,6—0,7 В).

Режим отсечки соответствует условию  $U_{ЭБ} < 0,6—0,7 \text{ В}$ , или  $I_B = 0$ .

### Барьерный режим

В данном режиме база транзистора по постоянному току соединена накоротко или через небольшой резистор с его коллектором, а в коллекторную или в эмиттерную цепь транзистора включается резистор, задающий ток через транзистор. В таком включении транзистор представляет собой своеобразный диод, включенный последовательно с токозадающим резистором. Подобные схемы каскадов отличаются малым количеством комплектующих, хорошей развязкой по высокой частоте, большим рабочим диапазоном температур, нечувствительностью к параметрам транзисторов.

### Схемы включения

Любая схема включения транзистора характеризуется двумя основными показателями: Коэффициент усиления по току  $I_{вых}/I_{вх}$ .

Входное сопротивление  $R_{вх} = U_{вх}/I_{вх}$ .

#### Схема включения с общей базой.

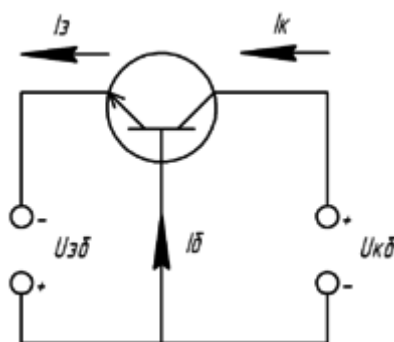


Схема включения с общей базой.

Среди всех трёх конфигураций обладает наименьшим входным и наибольшим выходным сопротивлением. Имеет коэффициент усиления по току, близкий к единице, и большой коэффициент усиления по напряжению. Не инвертирует фазу сигнала.

Коэффициент усиления по току:  $I_{\text{вых}}/I_{\text{вх}} = I_{\text{к}}/I_{\text{э}} = \alpha$  [ $\alpha < 1$ ].

Входное сопротивление  $R_{\text{вх}} = U_{\text{вх}}/I_{\text{вх}} = U_{\text{бэ}}/I_{\text{э}}$ .

Входное сопротивление (входной импеданс) усилительного каскада с общей базой мало зависит от тока эмиттера, при увеличении тока — снижается и не превышает единиц — сотен Ом для маломощных каскадов, так как входная цепь каскада при этом представляет собой открытый эмиттерный переход транзистора.

Достоинства:

Хорошие температурные и широкий частотный диапазон, так как в этой схеме подавлен эффект Миллера.

Высокое допустимое коллекторное напряжение.

Недостатки:

Малое усиление по току, равное  $\alpha$ , так как  $\alpha$  всегда немного менее 1

Малое входное сопротивление

### Схема включения с общим эмиттером

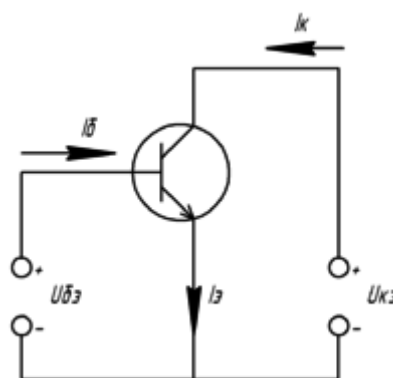


Схема включения с общим эмиттером.

$I_{\text{вых}} = I_{\text{к}}, I_{\text{вх}} = I_{\text{б}}, U_{\text{вх}} = U_{\text{бэ}}, U_{\text{вых}} = U_{\text{кэ}}$ .

Коэффициент усиления по току:  $I_{\text{вых}}/I_{\text{вх}} = I_{\text{к}}/I_{\text{б}} = I_{\text{к}}/(I_{\text{э}} - I_{\text{к}}) = \alpha/(1 - \alpha) = \beta$  [ $\beta \gg 1$ ].

Входное сопротивление:  $R_{\text{вх}} = U_{\text{вх}}/I_{\text{вх}} = U_{\text{бэ}}/I_{\text{б}}$ .

Достоинства:

Большой коэффициент усиления по току.

Большой коэффициент усиления по напряжению.

Наибольшее усиление мощности.

Можно обойтись одним источником питания.

Выходное переменное напряжение инвертируется относительно входного.

Недостатки:

Имеет меньшую температурную стабильность. Частотные свойства такого включения по сравнению со схемой с общей базой существенно хуже, что обусловлено эффектом Миллера.

### Схема с общим коллектором

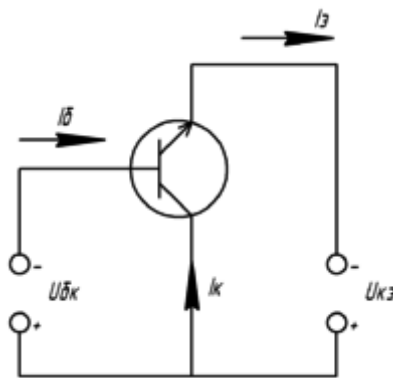


Схема включения с общим коллектором.

$I_{\text{вых}} = I_{\text{э}}, I_{\text{вх}} = I_{\text{б}}, U_{\text{вх}} = U_{\text{бк}}, U_{\text{вых}} = U_{\text{кэ}}.$

Коэффициент усиления по току:  $I_{\text{вых}}/I_{\text{вх}} = I_{\text{э}}/I_{\text{б}} = I_{\text{э}}/(I_{\text{э}} - I_{\text{к}}) = 1/(1 - \alpha) = \beta + 1$  [ $\beta \gg 1$ ].

Входное сопротивление:  $R_{\text{вх}} = U_{\text{вх}}/I_{\text{вх}} = (U_{\text{бэ}} + U_{\text{кэ}})/I_{\text{б}}.$

Достоинства:

Большое входное сопротивление.

Малое выходное сопротивление.

Недостатки:

Коэффициент усиления по напряжению немного меньше 1.

Схему с таким включением часто называют «эмиттерным повторителем».

### Основные параметры

Коэффициент передачи по току.

Входное сопротивление.

Выходная проводимость.

Обратный ток коллектор-эмиттер.

Время включения.

Предельная частота коэффициента передачи тока базы.

Обратный ток коллектора.

Максимально допустимый ток.

Граничная частота коэффициента передачи тока в схеме с общим эмиттером.

Параметры транзистора делятся на собственные (первичные) и вторичные. Собственные параметры характеризуют свойства транзистора, независимо от схемы его включения. В качестве основных собственных параметров принимают:

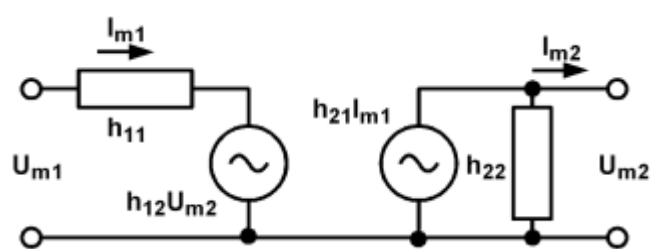
коэффициент усиления по току  $\alpha$ ;

сопротивления эмиттера, коллектора и базы переменному току  $R_э$ ,  $R_к$ ,  $R_б$ , которые представляют собой:

$R_э$  — сумму сопротивлений эмиттерной области и эмиттерного перехода;

$R_к$  — сумму сопротивлений коллекторной области и коллекторного перехода;

$R_б$  — поперечное сопротивление базы.



Эквивалентная схема биполярного транзистора с использованием  $h$ -параметров.

Вторичные параметры различны для различных схем включения транзистора и, вследствие его нелинейности, справедливы только для низких частот и малых амплитуд сигналов. Для вторичных параметров предложено несколько систем параметров и соответствующих им эквивалентных схем. Основными считаются смешанные (гибридные) параметры, обозначаемые буквой «h».

С повышением частоты заметное влияние на работу транзистора начинает оказывать ёмкость коллекторного перехода  $C_k$ . Его реактивное сопротивление уменьшается, шунтируя нагрузку и, следовательно, уменьшая коэффициенты усиления  $\alpha$  и  $\beta$ . Сопротивление эмиттерного перехода  $C_e$  также снижается, однако он шунтируется малым сопротивлением перехода  $R_e$  и в большинстве случаев может не учитываться. Кроме того, при повышении частоты происходит дополнительное снижение коэффициента  $\beta$  в результате отставания фазы тока коллектора от фазы тока эмиттера, которое вызвано инерционностью процесса перемещения носителей через базу от эмиттерного перехода к коллекторному и инерционностью процессов накопления и рассасывания заряда в базе. Частоты, на которых происходит снижение коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  на 3 дБ, называются граничными частотами коэффициента передачи тока для схем ОБ и ОЭ соответственно.

В импульсном режиме ток коллектора изменяется с запаздыванием на время задержки  $t_z$  относительно импульса входного тока, что вызвано конечным временем пробега носителей через базу. По мере накопления носителей в базе ток коллектора нарастает в течение длительности фронта  $t_f$ . Временем включения транзистора называется  $t_{вкл} = t_z + t_f$ .

### **Биполярный СВЧ-транзистор**

Биполярные СВЧ-транзисторы (БТ СВЧ) служат для усиления колебаний с частотой свыше 0,3 ГГц. Верхняя граница частот БТ СВЧ с выходной мощностью более 1 Вт составляет около 10 ГГц. Большинство мощных БТ СВЧ по структуре относится к n-p-n типу. По методу формирования переходов БТ СВЧ являются эпитаксиально-планарными. Все БТ СВЧ, кроме самых маломощных, имеют многоэмиттерную структуру (гребёнчатую, сетчатую). По мощности БТ СВЧ разделяются на маломощные (рассеиваемая мощность до 0,3 Вт), средней мощности (от 0,3 до 1,5 Вт) и мощные (свыше 1,5 Вт). Выпускается большое число узкоспециализированных типов БТ СВЧ.

### **Технологии изготовления транзисторов**

Эпитаксиально-планарная

Диффузионно-сплавная.

### **Применение транзисторов**

Усилители, каскады усиления

Генератор сигналов

Модулятор

Демодулятор (Детектор)

Инвертор (лог. элемент)

Микросхемы на транзисторной логике (см. транзисторно-транзисторная логика, диодно-транзисторная логика, резисторно-транзисторная логика)