

1.14. БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Цель лекции: ознакомление с физическими основами реализации полупроводниковых транзисторов.

1.14.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Полупроводниковый триод, получивший впоследствии название транзистор, разработали американские ученые Дж. Бардин и В. Браттейн в 1948 г. Создание этого полупроводникового прибора имело огромное значение для развития электронной и вычислительной техники. Для работы транзистора требуются меньшие напряжения, чем для радиоламп, транзисторы имеют существенно меньшие габаритные размеры, отличаются более высокой надежностью, стоимость их производства значительно ниже. В настоящее время биполярные транзисторы являются базовыми элементами во многих усилительных схемах.

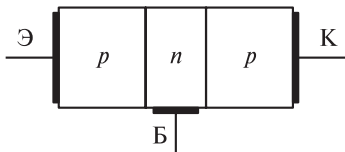


Рис. 1.44. Схема биполярного транзистора $p-n-p$ -типа:
Э — эмиттер; Б — база; К — коллектор

Назначение эмиттера — инжектирование в слой базы носителей заряда. В коллектор попадают носители заряда, прошедшие из эмиттера через базу. Конструктивно слой базы выполняют намного тоньше, чем остальные слои, чтобы носители заряда, прошедшие через базу, не успевали рекомбинировать

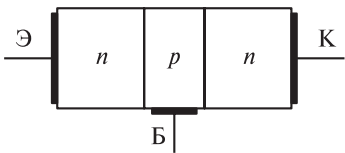


Рис. 1.45. Схема биполярного транзистора $n-p-n$ -типа:
Э — эмиттер; Б — база; К — коллектор

и достигали коллектора. Переход, образующийся между базой и эмиттером, получил название эмиттерного перехода, между базой и коллектором — коллекторного. Биполярным транзистором называется полупроводниковый прибор, имеющий трехслойную структуру и состоящий из двух $p-n$ -переходов, ток переносится двумя типами носителей заряда: электронами и дырками. Слои такой структуры называются эмиттером, базой и коллектором. Промышленность выпускает два типа биполярных транзисторов: $p-n-p$ -типа и $n-p-n$ -типа. На рис. 1.44 представлена схема биполярного транзистора $p-n-p$ -типа.

Переход, образующийся между базой и эмиттером, получил название эмиттерного перехода, между базой и коллектором — коллекторного.

Схема биполярного транзистора $n-p-n$ -типа приведена на рис. 1.45. Эмиттер изготавливают с высоким содержанием примеси, чтобы в нем было большое количество основных носителей заряда, благодаря чему становится возможна инжекция этих носителей в слой базы.

Основная идея работы транзистора заключается в том, что, управляя небольшим током базы, можно управлять большим током, протекающим через коллектор.

Транзисторы выпускают как в пластмассовых, так и в металлических корпусах, но все они имеют три вывода: эмиттер, базу и коллектор. База — управляющий вывод транзистора, коллектор для $n-p-n$ -транзисторов находится под положительным потенциалом, для $p-n-p$ -транзисторов — под отрицательным.

Эмиттер для $n-p-n$ -транзисторов находится под отрицательным потенциалом, для $p-n-p$ -транзисторов — под положительным.

1.14.2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

Каждый переход транзистора можно включить либо в прямом, либо в обратном направлении. Поэтому возможны следующие режимы работы транзистора.

1. Режим отсечки — оба $p-n$ -перехода закрыты. В этом случае между эмиттером и коллектором идет относительно небольшой ток. Управление транзистором в этом режиме невозможно.

2. Режим насыщения — оба $p-n$ -перехода открыты и через транзистор идет сравнительно большой ток. Управление транзистором в этом режиме также невозможно.

3. Активный режим — один из $p-n$ -переходов открыт, а другой закрыт. В этом режиме возможно эффективное управление транзистором.

Различают два варианта включения транзистора: нормальное и инверсное. При нормальном включении на эмиттерном переходе напряжение подключается в прямом направлении, а на коллекторном — в обратном. При инверсном включении полярность обратная.

В активном режиме работы эмиттерный переход транзистора смещен в прямом направлении (открыт), а коллекторный переход — в обратном. Рассмотрим $n-p-n$ -транзистор (рис. 1.46), все рассуждения будут аналогичны для случая $p-n-p$ -транзистора, с заменой слова «электроны» на «дырки», а «дырки» на «электроны», а также с заменой всех напряжений на противоположные по знаку.

Предположим, что транзистор $n-p-n$ -типа (см. рис. 1.46) работает в активном режиме без нагрузки (статический режим). Напряжения на эмиттерном и коллекторном переходах задаются внешними источниками постоянного напряжения: E_B и E_K соответственно. Их полярность и значения напряжения обеспечивают смещение эмиттерного перехода в прямом направлении, а коллекторного перехода — в обратном. В активном режиме работы E_B составляет десятые доли вольта, E_K — единицы или даже сотни вольт, в зависимости от марки транзистора. Потенциал базы меньше потенциала коллектора, следовательно, коллекторный переход смещен в обратном направлении, при этом сопротивление эмиттерного перехода мало, а коллекторного перехода велико.

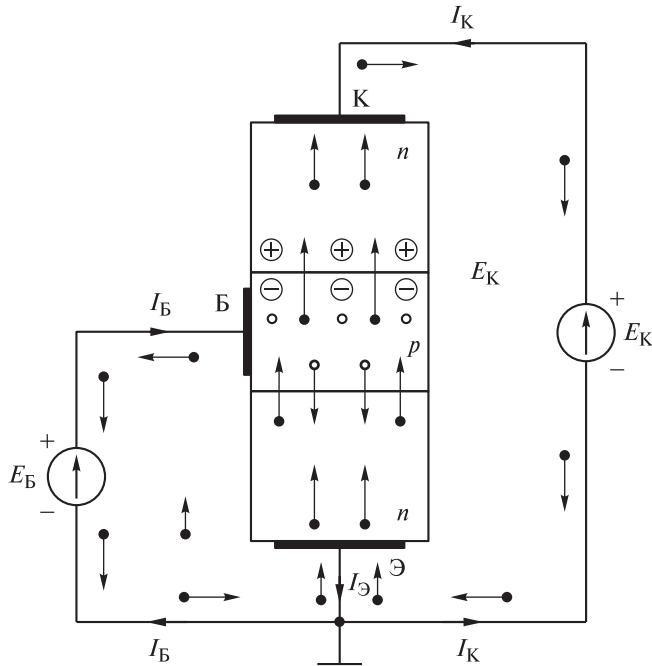


Рис. 1.46. Схема работы транзистора $n-p-n$ -типа

Поскольку эмиттерный переход смещен в прямом направлении, потенциальный барьер перехода понижен, поэтому электроны его легко преодолевают и инжектируются из эмиттера в базу. Небольшая часть электронов (несколько процентов) в базе успевает рекомбинировать с дырками и в результате возникает сравнительно небольшой базовый ток I_B (дырок в базе мало, так как толщина базы мала), а большая часть оставшихся электронов достигает коллекторного перехода. Поскольку коллекторный переход смещен в обратном направлении, на этом переходе образуется область пространственных зарядов (подобно обычному $p-n$ -переходу при обратном напряжении). На рис. 1.46 эта область показана в виде кружочков со знаками «плюс» и «минус». Направление электрического поля в области пространственного заряда (от «плюса» к «минусу») способствует продвижению электронов из эмиттера через коллекторный переход. Пройдя коллекторный переход, электроны стремятся через коллектор к положительному полюсу источника питания. Эти электроны и создают коллекторный ток. Ток коллектора I_K меньше тока эмиттера $I_Э$ на величину тока базы I_B . В соответствии с законом Кирхгофа между токами всегда справедливо соотношение: $I_Э = I_K + I_B$, так как $I_B \ll I_Э$, то $I_Э \approx I_K$.

Поскольку базу выполняют очень тонкой, уменьшая тем самым концентрацию примесей (дырок), ток базы I_B будет небольшим.

Коэффициент α , связывающий ток эмиттера и ток коллектора ($I_K = \alpha I_Э$), называется коэффициентом передачи тока эмиттера. Численное значение

коэффициента $\alpha = 0,9...0,999$, чем больше коэффициент α , тем лучше транзистор. Этот коэффициент мало зависит от напряжения коллектор — база и база — эмиттер.

Вследствие обратного смещения коллекторного перехода возникает обратный ток коллектора, который состоит из неосновных носителей заряда коллектора. Значение обратного тока коллектора определяется процессами термогенерации неосновных носителей, т. е. зависит от температуры коллектора. Обратный ток коллектора также называют тепловым током.

Качество биполярного транзистора значительно зависит от теплового тока: чем он меньше, тем транзистор качественнее.

При увеличении прямого входного напряжения между базой и эмиттером понижается потенциальный барьер в эмиттерном переходе и, соответственно, возрастает ток через этот переход, при уменьшении напряжения ток уменьшается. Таким образом, изменяя ток в цепи база — эмиттер, можно управлять выходным током коллектора. Причем незначительное изменение тока базы приводит к значительному изменению коллекторного тока. На рис. 1.47 представлены условные обозначения транзисторов на принципиальных схемах.

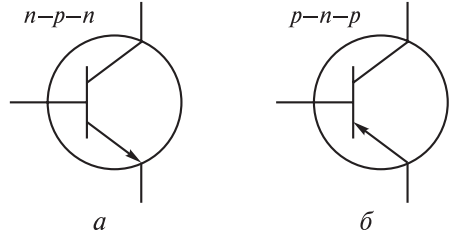


Рис. 1.47. Условные обозначения транзисторов:

a — транзистор *n-p-n*; *б* — транзистор *p-n-p*

1.14.3. СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Транзистор имеет три вывода и для его нормальной работы требуется два источника питания. Один вывод транзистора будет подключен к двум источникам питания одновременно, отсюда следует, что существуют три возможных варианта подключения биполярного транзистора: ОБ — с общей базой, ОЭ — с общим эмиттером, ОК — с общим коллектором. Каждый вариант подключения обладает как преимуществами, так и недостатками. Соответствующий вариант подключения выбирают в зависимости от области применения и требуемых характеристик. Название варианта включения определяется по выводу (электроду) транзистора, который является общим для входной и выходной цепей по переменному току. Для каждой из схем включения транзистора имеются свои характеристики. Наиболее распространены ВАХ для схем ОЭ и ОБ, которые обычно приводятся в справочниках.

Схема включения с ОБ. Данный вариант подключения (рис. 1.48) обеспечивает хорошую частотную характеристику, одна-

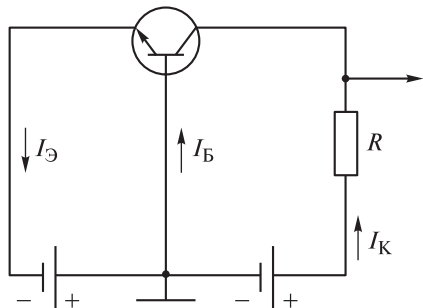


Рис. 1.48. Схема включения с ОБ

ко не позволяет получить такого большого усиления сигнала по напряжению, как при включении ОЭ.

Усиления по току не возникает, поэтому данную схему включения иногда называют «токовый повторитель» из-за того, что она имеет свойство стабилизации тока. В схеме с общей базой не происходит изменение фазы выходного сигнала относительно входного.

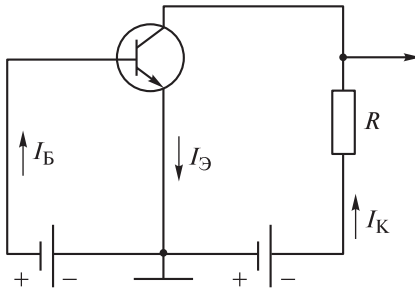


Рис. 1.49. Схема включения с ОЭ

Схема включения с ОЭ. Данный вариант подключения (рис. 1.49) позволяет получить максимальное усиление как по току, так и по напряжению, а следовательно, и по мощности. Особенностью данного варианта подключения является смещение по фазе выходного переменного напряжения на 180° относительно входного. Основной недостаток данной схемы — это низкая частотная характеристика, что накладывает определенные ограничения на использование при высокочастотном входном сигнале.

В случае напряжения между коллектором и эмиттером $U_{КЭ} = 0$ входная ВАХ $p-n-p$ -транзистора (рис. 1.50, а) представляет собой прямую ветвь ВАХ двух параллельно включенных диодов. При $U_{КЭ} < 0$ кривые на графике сдвигаются вправо и вниз по сравнению с предыдущим случаем. Смещение кривых вниз обусловлено протеканием навстречу вносимому базовому току обратного тока $I_{К0}$, и при $U_{БЭ} = 0$ значение $I_B < 0$. Смещение кривых вправо вызвано эффектом модуляции базы, а именно: с ростом $U_{КЭ}$ растет напряже-

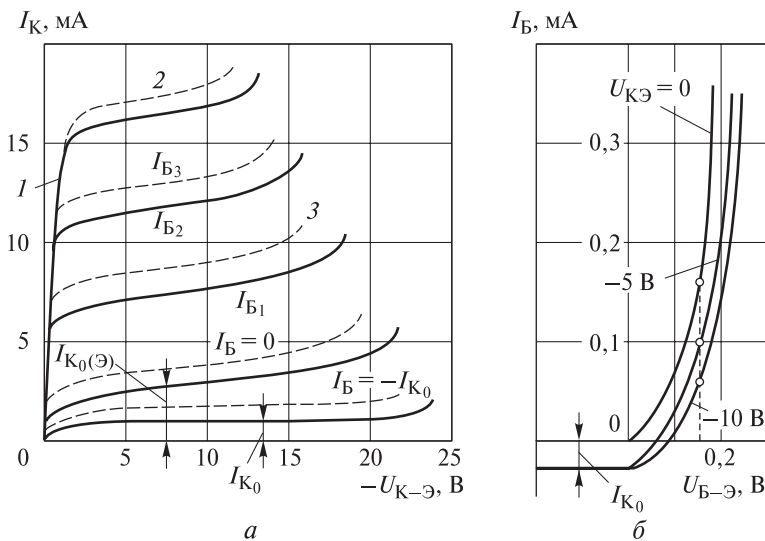


Рис. 1.50. Входная (а) и выходная (б) ВАХ $p-n-p$ -транзистора с общим эмиттером

ние между коллектором и базой $U_{КБ}$, поэтому толщина обратно смещенного коллекторного перехода увеличивается, а толщина базы уменьшается. В результате в базе рекомбинирует меньше носителей, и ток базы I_B уменьшается.

Рассмотрим выходные характеристики (рис. 1.50, б) режима отсечки, когда $U_{БЭ} < 0$ соответствует самая нижняя кривая. При этом эмиттерный и коллекторный переходы заперты ($I_B = -I_{К0}$) и из коллектора в базу течет тепловой ток $I_{К0}$. Вторая снизу кривая, соответствующая $I_B = 0$, равносильна режиму с «оторванной» базой, т. е. $I_K = \beta I_B + I_{К0(Э)} = I_{К0(Э)} = (1 + \beta)I_{К0}$. В этом случае из коллектора в эмиттер течет сквозной ток $I_{К0(Э)}$. На графике выходных характеристик можно выделить три области.

1. Режим насыщения. При малых значениях напряжения $U_{КЭ} > 0$ и $U_{БЭ} > 0$ коллекторный переход смещен в прямом направлении. При этом наблюдается нелинейная область с сильной зависимостью I_K от $U_{КЭ}$.

2. Активный режим. В этом режиме коллекторный переход смещен в обратном направлении, наблюдается слабая зависимость I_K от $U_{КЭ}$. Это так называемая линейная область. Некоторый подъем кривых объясняется эффектом модуляции базы. При увеличении $U_{КЭ}$ происходит уменьшение толщины базы, которое приводит к уменьшению тока I_B , но поскольку ток базы необходимо поддерживать постоянным ($I_B = \text{const}$), приходится увеличивать $U_{БЭ}$. За счет этого ток I_B увеличивается, и ток $I_K = I_B \beta$ также возрастает.

3. Область пробоя коллекторного перехода. В подавляющем большинстве случаев это нерабочая область за исключением транзисторов специальных типов.

Схема включения с ОК. Данный вариант подключения (рис. 1.51) имеет усиление по току почти такое же, как при подключении с ОЭ, а усиление по напряжению немного меньше единицы. Смещение напряжения по фазе отсутствует, поэтому данную схему называют «эмиттерный повторитель», так как напряжение на выходе соответствуют входному напряжению.

Вольт-амперные характеристики биполярного транзистора в активном режиме.

Выходные характеристики биполярного транзистора в активном режиме, включенного по схеме с ОБ, представлены на рис. 1.52. Видно, что кривая зависимости тока эмиттера от приложенного напряжения между эмиттером и базой значительно зависит от этого напряжения (рис. 1.52, а). На рис. 1.52, б видно, что выходные ВАХ имеют две характерные области: левая часть графика — сильная зависимость I_K от $U_{КБ}$; далее горизонтальный участок с небольшим подъемом кривых — слабая зависимость I_K от $U_{КБ}$.

Семейства входных и выходных ВАХ биполярных транзисторов используются для оценки их работы в широком диапазоне импульсных и постоянных токов, мощностей и напряжений, а также для расчета цепи смещения и стабилизации режима.

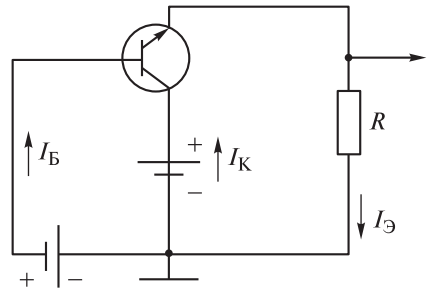


Рис. 1.51. Схема включения с ОК

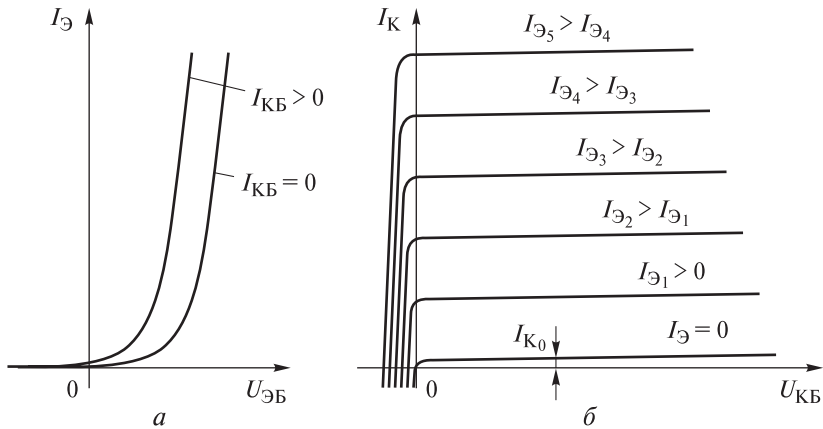


Рис. 1.52. Выходные характеристики биполярного транзистора в активном режиме, включенного по схеме с ОБ ($I_{Э1} \dots I_{Э5}$ — соответственно первое — пятое значение тока эмиттера)

1.14.4. ГЕТЕРОПЕРЕХОДЫ

Гетеропереходом называется переход, образующийся на границе двух полупроводников с различной шириной запрещенной зоны. На границе гетероперехода происходят изменения свойств полупроводника — изменяются структура энергетических зон, ширина запрещенной зоны, подвижности и эффективные массы.

На возможность использования специфических свойств такого контакта для повышения эффективности инжекции эмиттеров биполярных транзисторов указывалось в патенте Шокли в 1948 г. В настоящее время гетеропереходы находят столь широкое применение при создании высокочастотных транзисторов и оптоэлектронных приборов, что работы российского ученого Ж.И. Алферова и Г. Кремера (США) в области исследования гетеропереходов были отмечены присуждением им совместно с изобретателем интегральной схемы Дж. Килби Нобелевской премии по физике в 2000 г.

Различают анизотропные и изотропные гетеропереходы. Анизотропные переходы создаются в результате контакта полупроводников с дырочной и электронными типами проводимости. Изотропные гетеропереходы возникают при контакте полупроводников одного типа проводимости.

В гетеропереходах наблюдаются скачки энергии в зонах проводимости и валентной зоне. Гетероструктуры представляют собой комбинации различных гетеропереходов.

Вследствие разрывов зон высота потенциальных барьеров, которые при инжекции преодолевают электроны и дырки, становится различной, что приводит к изменению соотношения токов инжектируемых электронов и дырок. Отношение тока инжекции электронов к току инжекции дырок существенно возрастает. Наличие разрывов в положении краев энергетических зон при-

водит к тому, что в гетеропереходах происходит практически односторонняя инжекция из широкозонного в узкозонный полупроводник.

Если из-за разрыва в положении края зоны инжектируемые носители при переходе в узкозонный полупроводник увеличивают свою кинетическую энергию, то при больших прямых смещениях концентрация носителей, инжектированных в узкозонный полупроводник, может даже превышать концентрацию свободных носителей в широкозонном слое. Данные свойства гетероперехода широко используются в полупроводниковых лазерах, некоторых транзисторах и других приборах, принцип работы которых требует односторонней инжекции носителей.

Различие параметров кристаллической решетки контактирующих материалов приводит к появлению на гетерогранице оборванных связей, дислокаций несоответствия и других дефектов, энергетические уровни которых выступают как центры рекомбинации. Поэтому задача выбора материалов для создания гетеропереходов оказывается достаточно сложной. Необходимо, чтобы различие параметров решетки двух контактирующих полупроводников при температуре выращивания было невелико при близких температурных коэффициентах линейного расширения.

Рассмотрим зонную диаграмму между арсенидом галлия и арсенидом галлия алюминия $\text{GaAs}-\text{Al}_x\text{Ga}_x\text{As}$ (рис. 1.53). Величина x характеризует содержание алюминия. С ростом x увеличивается ширина запрещенной зоны твердого раствора $\text{Al}_x\text{Ga}_x\text{As}$. Для $x = 0,3$ ширина запрещенной зоны твердого раствора $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ равна 1,8 эВ.

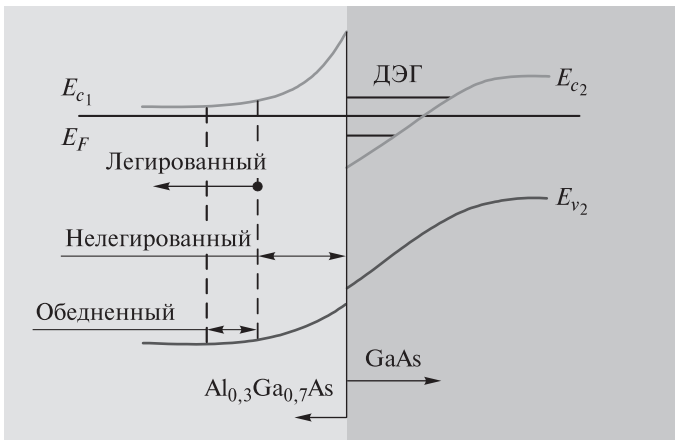


Рис. 1.53. Зонная диаграмма гетероперехода

У границы раздела двух полупроводников образуется квантовый колодец, или зона двумерного электронного газа (ДЭГ) (2D-газ). Двумерный электронный газ представляет собой систему электронов, энергетические уровни которых дискретны. Они могут перемещаться только в плоскости ДЭГ, не покидая потенциальной ямы. Характерным свойством ДЭГ является то, что

можно регулировать плотности электронов путем воздействия поперечного электрического поля. Электроны ДЭГ имеют повышенную эффективную концентрацию и подвижность.

При температуре 300 К для гетеропереходной пары GaAs–Al_{0,3}Ga_{0,7}As величина разрыва зоны проводимости и валентной зоны составит соответственно

$$\Delta E_c \approx 0,62\Delta E_g \approx 0,23 \text{ эВ};$$

$$\Delta E_v \approx 0,38\Delta E_g \approx 0,14 \text{ эВ}.$$

В этом случае отношения токов инжектируемых электронов и дырок составят $\exp(\Delta E_g/kT) \approx 2 \cdot 10^6$. Столь значительный эффект дает основание говорить о действительно одностороннем характере инжекции в гетеропереходе.

Тесты к лекции 1.14

1. Что такое гетеропереход?

- переход, образующийся на границе двух полупроводников с различной шириной запрещенной зоны;
- переход, образующийся на границе двух полупроводников с одинаковой шириной запрещенной зоны;
- переход, образующийся на границе соприкосновения металла и полупроводника.

2. Что такое анизотропный гетеропереход?

- гетеропереход, который получается в результате контакта полупроводников с дырочной и электронными типами проводимости;
- гетеропереход, который получается в результате контакта полупроводников с одинаковым типом проводимости;
- гетеропереход, который получается в результате контакта двух различных металлов.

3. Что такое изотропный гетеропереход?

- гетеропереход, возникающий при контакте полупроводников одного типа проводимости;
- гетеропереход, возникающий при контакте полупроводников разного типа проводимости;
- гетеропереход, возникающий при контакте полупроводников с благородными металлами.

4. Назовите схемы включения биполярного транзистора:

- с общей базой, общим эмиттером и общим коллектором;
- с параллельной базой, общим эмиттером и общим коллектором;
- с общей базой, общим эмиттером и последовательным коллектором.

5. Что представляет собой зона двумерного электронного газа в гетеропереходе?

- систему электронов, энергетические уровни которых дискретны, они могут перемещаться только в плоскости ДЭГ, не покидая потенциальной ямы;

б) облако ионов, энергетические уровни которых непрерывны, они могут перемещаться не только в плоскости ДЭГ, но и покидать потенциальную яму;

в) систему электронов, энергетические уровни которых непрерывны, они не могут перемещаться в плоскости ДЭГ, а покидают потенциальную яму.

6. Какой прибор называется биполярным транзистором?

а) полупроводниковый прибор, имеющий трехслойную структуру и состоящий из двух $p-n$ -переходов, в котором ток переносится двумя типами носителей заряда — электронами и дырками;

б) полупроводниковый прибор, состоящий из трех $p-n$ -переходов, в котором ток переносится двумя типами носителей заряда — электронами и дырками;

в) полупроводниковый прибор, имеющий четырехслойную структуру и состоящий из четырех $p-n$ -переходов, в котором ток переносится двумя типами носителей заряда — электронами и дырками.

7. Каково назначение эмиттера в биполярном транзисторе?

а) инжектирование в слой базы носителей заряда;

б) усиление тока в слое базы;

в) управление током в слое базы.