

Предисловие

Комплекс лабораторных работ по дисциплине «Электроника» включает в себя работы по исследованию характеристик и параметров выпрямительных полупроводниковых диодов, стабилитронов, туннельных диодов, биполярных транзисторов и полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом. Рассматриваются принципы работы этих приборов, их основные статические характеристики и параметры.

Студенты в процессе выполнения лабораторных работ проводят самостоятельные исследования этих характеристик и получают навыки экспериментальной работы с измерительными приборами.

В конце каждой лабораторной работы приведены вопросы для контроля знаний студентов.

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

- 1) название и цель работы;
- 2) схемы проведения измерений с указанием типов измерительных приборов;
- 3) графики полученных статических характеристик;
- 4) данные расчетов параметров приборов;
- 5) анализ полученных результатов и выводы о проделанной работе.

Лабораторная работа № 1

Исследование характеристик и параметров полупроводниковых диодов

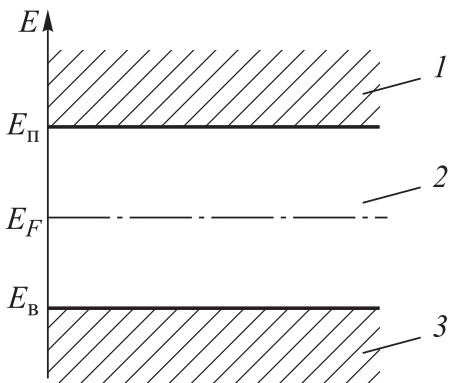
Краткие сведения о полупроводниковых диодах

Общие сведения

Полупроводниковые диоды относятся к приборам, свойства которых определяются поведением электронов в кристаллической решетке твердого тела (полупроводника) [1–3].

Согласно квантовой теории, электрон может находиться только в строго определенных состояниях на разрешенных энергетических уровнях. В твердом теле взаимодействие большого числа близко расположенных атомов вызывает расщепление энергетических уровней, которые образуют разрешенные и запрещенные энергетические зоны (рис. 1.1).

Электроны могут совершать перемещения на свободные энергетические уровни. Процесс перехода электронов является случайным. Вероятность P нахождения электрона на данном энергетическом уровне E при данной температуре T определяется функцией распределения Ферми — Дирака



$$P(E, T) = \left[\exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right) + 1 \right]^{-1},$$

где k — постоянная Больцмана.

Рис. 1.1. Зона проводимости (1), запрещенная (2) и валентная (3) зоны в твердом теле

Эта функция обладает центральной симметрией относительно так называемого уровня Ферми E_F — условного уровня, вероятность на-

хождения электрона на котором равна 0,5, если данный уровень является разрешенным. При абсолютном нуле ($T = 0$ К) нахождение электрона выше уровня Ферми невозможно, ниже все разрешенные уровни заполнены электронами.

В проводнике валентная зона перекрывается с зоной проводимости. Валентная зона полупроводника, как и диэлектрика, полностью заполнена при $T = 0$ К. От диэлектрика полупроводник отличается меньшей шириной запрещенной зоны (0,5...3 эВ).

Подвижными носителями заряда в твердом теле являются электроны, перешедшие из валентной зоны с верхним уровнем E_v в зону проводимости с нижним уровнем E_n . В проводнике этот переход совершается легко, в полупроводнике для такого перехода электрону требуется сообщить гораздо большую энергию. Электроны проводимости обеспечивают *электронную электрическую проводимость* твердого тела. В полупроводнике кроме электронов проводимости подвижными носителями заряда являются дырки — свободные энергетические уровни в валентной зоне (или незаполненная валентная зона), имеющие положительный заряд. Переход электрона в валентной зоне с заполненного уровня на свободный означает как бы перемещение дырки в обратном направлении. Проводимость полупроводника, созданная движением дырок, называется *дырочной*.

При данной температуре в результате динамического равновесия между случайными процессами генерации (при переходе электрона из валентной зоны в зону проводимости) и рекомбинации (при возвращении электрона в валентную зону) подвижных носителей заряда устанавливается некоторая средняя их концентрация — равновесная.

В собственном, т. е. беспримесном, полупроводнике количество электронов проводимости равно количеству дырок, и уровень Ферми лежит посередине запрещенной зоны (см. рис. 1.1). Электрическая проводимость такого полупроводника называется *собственной*.

Введение примесей в полупроводник увеличивает его электропроводность. Это объясняется появлением дополнительных энергетических уровней внутри запрещенной зоны основного полупроводника. Валентный электрон *донорной примеси* обладает более высокой энергией и занимает локальный донорный уровень

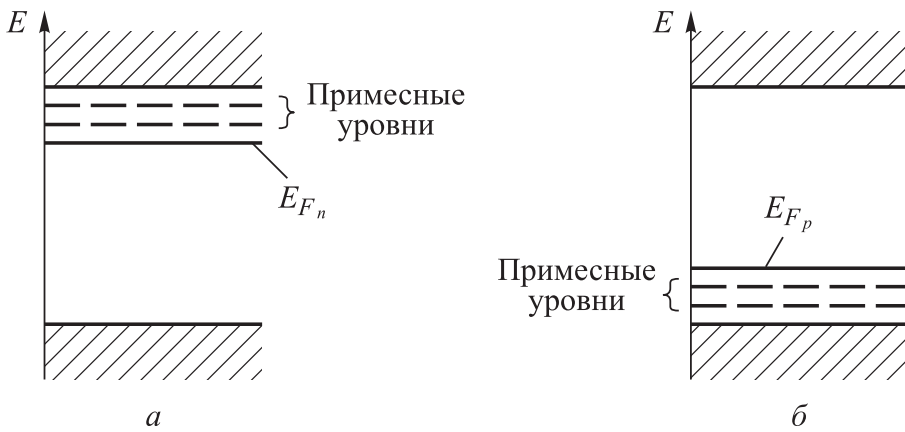


Рис. 1.2. Положение примесных уровней в полупроводнике n -типа (a) и p -типа (b)

(примесный уровень) в запрещенной зоне вблизи зоны проводимости (рис. 1.2, a), а недостаток валентного электрона в *акцепторной примеси* создает свободный локальный акцепторный уровень в запрещенной зоне вблизи валентной зоны (рис. 1.2, b). При повышении температуры атомы примеси легко ионизируются: электроны с донорного уровня переходят в зону проводимости (дырки при этом не образуются), а из валентной зоны — на акцепторный уровень, не становясь при этом электронами проводимости. В результате образуются неподвижные заряды (ионы примеси) и подвижные носители заряда (электроны и дырки). В полупроводнике с донорной примесью (типа n) электроны являются основными (преобладающими) носителями, а дырки — неосновными, в полупроводнике с акцепторной примесью (типа p) основные носители заряда — дырки, неосновные — электроны.

Энергия ионизации электронов примеси мала (около 0,01 эВ), поэтому при комнатной температуре (300 К) практически все атомы примеси ионизированы и концентрация основных носителей заряда в примесном полупроводнике на несколько порядков выше концентрации неосновных носителей. Уровень Ферми E_F не лежит посередине запрещенной зоны, а находится ближе к локальным примесным уровням (см. рис. 1.2). Положение уровня Ферми для примесного полупроводника не является постоянным и зависит от температуры. Например, в полупроводнике n -типа при 0 К уровень Ферми (E_{F_n}) лежит между локальным донорным уровнем и зоной

проводимости, а в полупроводнике p -типа (E_{F_p}) — между акцепторным уровнем и валентной зоной. С повышением температуры он смещается к середине запрещенной зоны. При одной и той же температуре с увеличением концентрации примеси уровень Ферми располагается дальше от середины запрещенной зоны.

При направленном движении носителей заряда в полупроводнике возникает электрический ток — *дрейфовый* под действием электрического поля и *диффузионный*, вызванный градиентом (различием) концентрации подвижных носителей заряда.

Если в кристалле полупроводника существуют две области с разными типами проводимости, то между ними возникает особый слой — электронно-дырочный, или p - n -переход. Разница в концентрации носителей заряда на границе двух областей вызывает диффузионный ток. Дырки перемещаются из p -области в n -область, а электроны — в обратном направлении. В результате ухода основных носителей заряда вблизи границы остаются нескомпенсированные неподвижные заряды ионов примеси: «отрицательные» в p -области и «положительные» в n -области (рис. 1.3, *а*). Возникший объемный заряд p - n -перехода создает контактную разность потенциалов $\phi_{\text{конт}}$, которая препятствует диффузионному току основных носителей и вызывает дрейфовый ток неосновных носителей.

При отсутствии внешнего электрического поля уровень Ферми системы, состоящей из p - и n -областей, должен быть единым. В пределах p - n -перехода вследствие образовавшейся разности потенциалов происходит относительное смещение границ энергетических зон на высоту *потенциального барьера* $e\phi_{\text{конт}}$, который

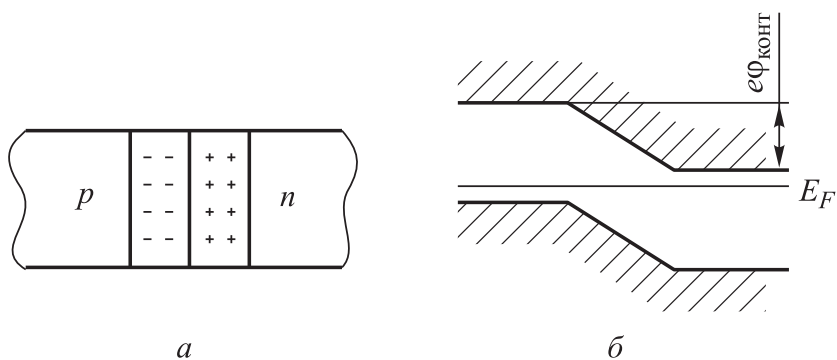


Рис. 1.3. Схема запирающего слоя (*а*) и энергетическая диаграмма p - n -перехода (*б*)

должны преодолеть носители заряда при их диффузионном движении (рис. 1.3, б). Высота $e\varphi_{\text{конт}}$ зависит от положения уровня Ферми в p - и n -областях. Между диффузионным и дрейфовым током устанавливается равновесие, суммарный ток через переход равен нулю.

При включении внешнего напряжения динамическое равновесие между токами нарушается. Поскольку сопротивление перехода,

обедненного подвижными носителями заряда, много больше сопротивления остальных областей кристалла полупроводника, можно считать, что внешнее напряжение приложено к переходу.

При подключении прямого напряжения $U_{\text{пр}}$ («+» к p -области, «-» к n -области) уменьшается контактная разность потенциалов и высота потенциального барьера (рис. 1.4, а). Объемный заряд перехода снижается, соответственно уменьшается ширина p - n -перехода. В n -области повышается, а в p -области — понижается энергия электронов, и, соответственно, в пределах p - n -перехода искривляется уровень Ферми. Дрейфовый ток уменьшается, диффузионный резко возрастает. Увеличение диффузионного тока приводит к *инжекции* (введению) неосновных носителей из одной зоны в другую, т. е. в результате диффузии дырки из p -области проникают через переход в n -область, а электроны

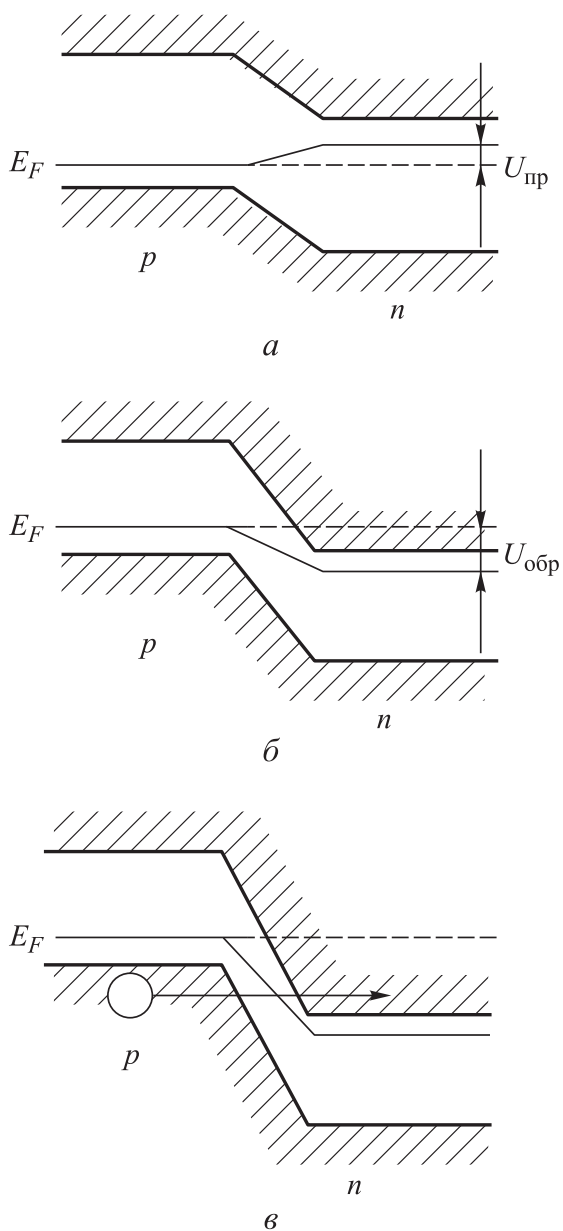


Рис. 1.4. Энергетические диаграммы при включении прямого и обратного напряжения

из n -области — в p -область, создавая повышенную неравновесную концентрацию неосновных носителей.

При подключении обратного напряжения $U_{\text{обр}}$ увеличиваются контактная разность потенциалов и высота потенциального барьера (рис. 1.4, б), соответственно, возрастают объемный заряд и ширина p - n -перехода. Увеличение электрического поля в переходе препятствует диффузионному току и повышает дрейфовый. В результате дрейфа происходят *экстракция* (уход) неосновных носителей и снижение их концентрации в пограничных с p - n -переходом областях.

Зависимость тока через p - n -переход от внешнего напряжения (вольт-амперная характеристика) несимметрична, так как обратный ток обеспечивают неосновные носители, а прямой — основные. При увеличении обратного напряжения концентрация неосновных носителей вблизи перехода быстро возрастает и дрейфовый ток достигает предельного значения (тока экстракции). При увеличении прямого напряжения концентрация основных носителей изменяется мало и диффузионный ток растет практически без ограничения. Теоретическая вольт-амперная характеристика имеет экспоненциальный вид (рис. 1.5):

$$I = I_{\text{обр}} \left[\exp\left(\frac{q_e U}{kT}\right) - 1 \right],$$

где q_e — заряд электрона; U — приложенное напряжение.

Вольт-амперная характеристика p - n -перехода зависит от температуры. При увеличении температуры сильно растет концентрация неосновных носителей, вызывая значительный рост обратного тока $I_{\text{обр}}$ через переход (примерно в геометрической прогрессии). При уменьшении температуры обратный ток снижается, концентрация основных носителей при комнатной тем-

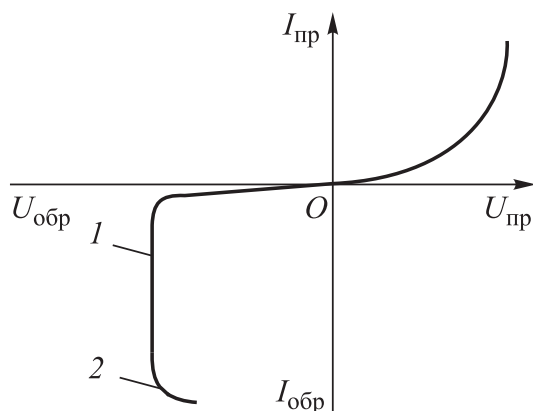


Рис. 1.5. Вольт-амперная характеристика p - n -перехода:
1 — электрической пробой; 2 — тепловой пробой

пературе незначительна и не влияет на значение прямого тока. Однако от концентрации неосновных носителей зависит положение уровня Ферми и, соответственно, контактная разность потенциалов. Поэтому, например, при повышении температуры требуется меньшее прямое напряжение для получения одного и того же тока.

Вольт-амперная характеристика p - n -перехода зависит также от скорости (частоты) изменения внешнего напряжения. При большой скорости ток изменяется медленнее, чем напряжение, т. е. переход проявляет емкостные свойства. Объемный заряд p - n -перехода инициирует *барьерную*, а инжекция неосновных носителей в приграничных с p - n -переходом областях — *диффузионную* емкость.

При некотором обратном напряжении резко увеличивается обратный ток и начинается пробой p - n -перехода. Различают электрический и тепловой пробой. Причин возникновения *электрического пробоя* две: лавинная ионизация атомов в переходе под действием высокой напряженности электрического поля и туннельный эффект.

Лавинная ионизация наблюдается в достаточно широких переходах, возникающих в высокоомных полупроводниках с малой концентрацией примесей, и развивается следующим образом. При большой напряженности электрического поля в переходе электроны и дырки приобретают достаточно большую энергию, чтобы вызвать ионизацию атомов полупроводника. В результате рождается новая пара электрон—дырка. Время дрейфа носителей заряда в широких переходах относительно велико, а вновь созданные носители заряда успевают за время движения в переходе приобрести энергию, необходимую для дальнейшей ионизации атомов. При достаточно большой напряженности поля, когда одна исходящая пара носителей порождает в среднем более одной пары, ионизация приобретает лавинный характер. Обратный ток резко возрастает и ограничивается только сопротивлением внешней цепи.

В узких (тонких) p - n -переходах, образующихся в полупроводниках с высокой концентрацией примесей, даже при значительной напряженности поля носители заряда не успевают за время нахождения в переходе приобрести энергию, достаточную для разрыва валентных связей. Возрастание обратного тока в тонких переходах происходит в результате *туннельного эффекта* — прохождения

электронами p - n -перехода без изменения энергии. Необходимым условием туннельного прохождения электронами потенциального барьера является наличие энергетического уровня с одной стороны барьера и свободного уровня равной энергии с другой стороны барьера. В этом случае электронам требуется сообщить энергию меньшую, чем высота потенциального барьера, чтобы они проникли сквозь барьер, не поднимаясь над его уровнем, пользуясь как бы своеобразным туннелем. При увеличении обратного напряжения энергетические уровни в p - n -переходе смещаются так сильно, что напротив зоны проводимости в n -области оказывается валентная зона p -области (рис. 1.4, в). Возникает туннельный пробой. Туннельный пробой имеет место при меньшем обратном напряжении, чем лавинный. При отсутствии внешнего напряжения (в состоянии равновесия) напротив валентной зоны p -полупроводника лежит зона проводимости n -полупроводника (на рис. 1.6, а заштрихованы уровни, заполненные при $T = 0$ К в отдельно взятой p - или n -области полупроводника). Возникает туннельный ток из p -полупроводника в n -полупроводник и в обратном направлении. Результирующий ток через переход, состоящий из дрейфового, диффузионного и туннельного токов, равен нулю.

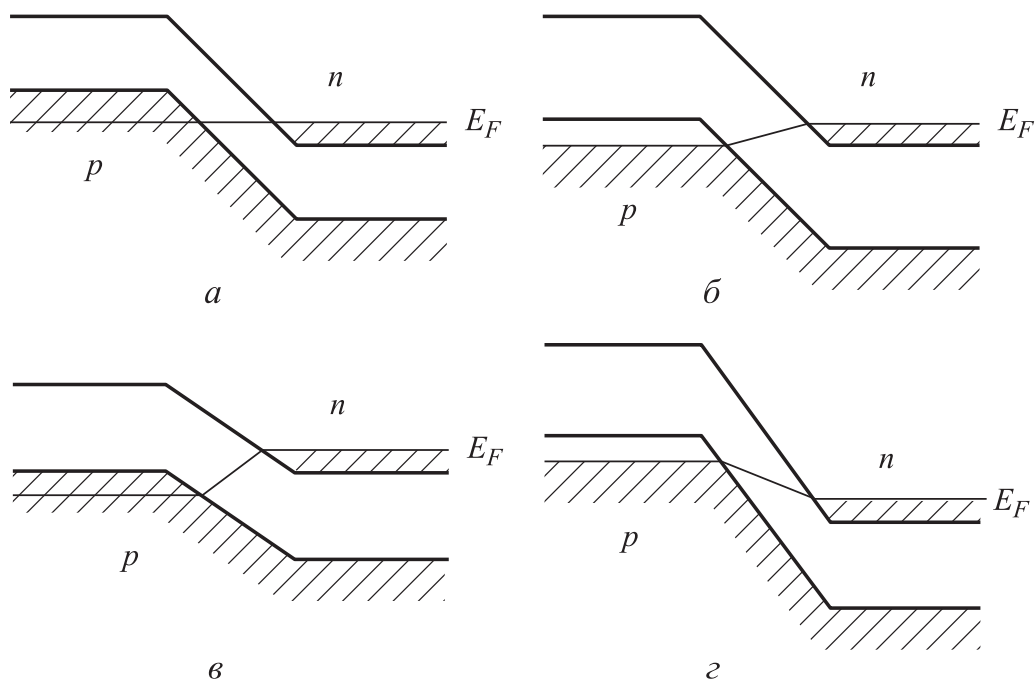


Рис. 1.6. Энергетические диаграммы для разных напряжений на p - n -переходе при туннельном эффекте

При включении небольшого прямого напряжения энергетические уровни смещаются так, что напротив свободных уровней в валентной зоне p -полупроводника оказываются заполненные уровни в зоне проводимости n -полупроводника (рис. 1.6, б). Равновесие нарушается, увеличивается туннельный ток электронов с заполненных уровней n -области на свободные уровни p -области.

При большом обратном токе через p - n -переход выделяющаяся на нем теплота может превысить отводимую. Тогда пробой переходит в тепловой, при котором генерация носителей заряда в переходе происходит вследствие возрастания температуры перехода. Увеличение концентрации носителей заряда и тока через переход еще больше разогревает переход. Тепловой пробой необратим и приводит к разрушению p - n -перехода (рис. 1.7).

Максимум прямого туннельного тока наблюдается при таком внешнем напряжении, при котором напротив уровней с наибольшим числом электронов в n -полупроводнике располагается наибольшее число свободных уровней в p -полупроводнике (см. рис. 1.6, б и точку б на рис. 1.7).

Когда в результате приложения возрастающего прямого напряжения верхний уровень валентной зоны p -полупроводника

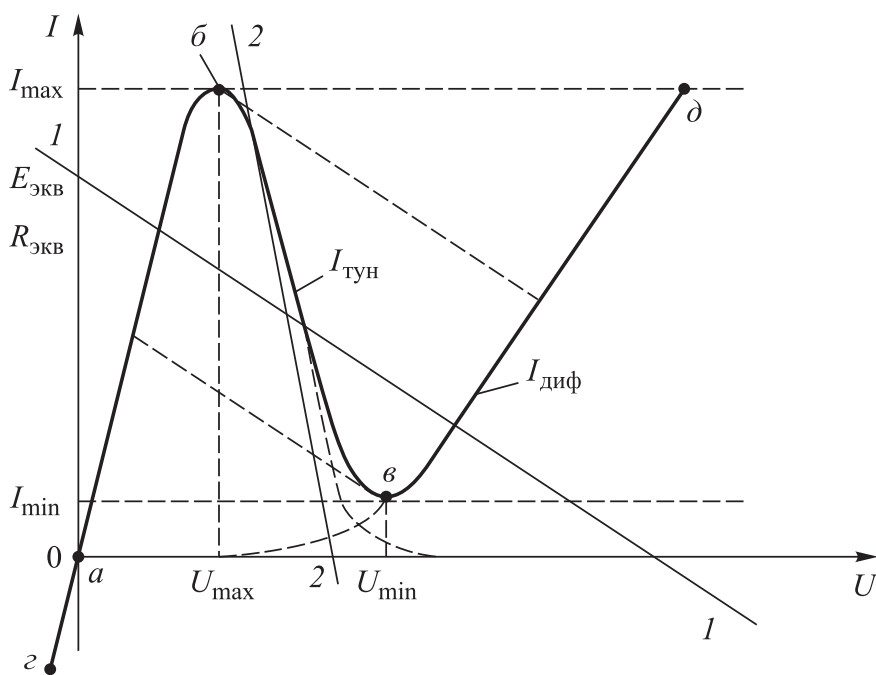


Рис. 1.7. Вольт-амперная характеристика p - n -перехода в сильнолегированных полупроводниках

сравнивается с нижним уровнем зоны проводимости n -полупроводника, туннельный эффект прекратится (рис. 1.6, v и точка v на рис. 1.7). Результирующий ток через переход определяется далее диффузионной составляющей, как в обычном p - n -переходе (точка d на рис. 1.7).

Включение обратного напряжения приводит к увеличению туннельного тока валентных электронов p -полупроводника на свободные уровни n -полупроводника (рис. 1.6, z и точка z на рис. 1.7). Даже при малых обратных напряжениях обеспечиваются высокие плотности тока. Обратное сопротивление p - n -перехода при туннельном эффекте меньше, чем прямое.

Следует отметить, что поскольку при туннельном эффекте нет инжекции неосновных носителей и ширина перехода мала, то он обладает лучшими частотными свойствами по сравнению с переходом в менее легированных полупроводниках.

На использовании характерных особенностей p - n -перехода основано действие различных полупроводниковых диодов: выпрямительных, стабилитронов, туннельных, обращенных и др.

Полупроводниковый выпрямительный диод

Вольт-амперная характеристика реального диода несколько отличается от теоретической. При прямом включении внешнее напряжение распределяется между переходом и остальными областями диода, в результате одному и тому же значению тока соответствует большее напряжение на реальной характеристике, чем на теоретической. Особенно сильно это проявляется при больших прямых напряжениях, когда сопротивление перехода уменьшается. При увеличении обратного напряжения к току экстракции в реальном диоде добавляется ток носителей заряда, генерируемых в p - n -переходе (тепловой ток). Эти отличия встречаются в диодах, изготовленных из полупроводников с малой концентрацией собственных носителей заряда, например кремниевых.

Кроме вольт-амперной характеристики для оценки основных свойств диода используют параметры. При постоянных или медленно изменяющихся напряжениях измеряют статические параметры:

$R_i = dU/dI$ — дифференциальное сопротивление, или сопротивление переменному току;

$R_0 = U/I$ — сопротивление постоянному току.

Статические параметры зависят от положения рабочей точки на вольт-амперной характеристике.

Для выпрямительных диодов вводят дополнительные параметры:

$R_{пр}$ — прямое сопротивление постоянному току при заданном (номинальном) значении прямого тока;

$R_{обр}$ — обратное сопротивление при заданном обратном напряжении.

Работу диода в выпрямительном режиме определяют, кроме того, предельные электрические параметры:

$U_{пр}$ — постоянное прямое напряжение, выше которого не поднимается прямое напряжение на диоде;

$I_{обр\ ср}$ — средний обратный ток при напряжении $U_{обр} = U_{обр\ доп}$, выше которого не поднимается обратный ток;

$U_{обр\ доп}$ — допустимое обратное напряжение, превышение которого может привести к пробое диода;

$I_{пр\ доп}$ — допустимый средний выпрямленный ток, превышение которого может привести при переключении диода на обратное напряжение к тепловому пробое в результате перегрева диода током.

Температурные параметры:

T_{max} — максимальная рабочая температура, ограниченная допустимым возрастанием обратного тока;

T_{min} — минимальная рабочая температура, ниже которой проводимость полупроводника очень мала, так как атомы примеси еще не ионизированы.

Полупроводниковый стабилитрон

Основным рабочим режимом полупроводниковых стабилитронов является электрический пробой (см. рис. 1.5) [4, 5]. Для стабилизации напряжения используют кремниевые стабилитроны, так

как в германиевых переходах электрический пробой легко переходит в тепловой и полупроводник разрушается.

Электрические параметры стабилитрона следующие:

$U_{\text{ст}}$ — напряжение стабилизации (напряжение на диоде в рабочем режиме электрического пробоя);

$R_i = dU/dI$ — дифференциальное сопротивление на рабочем участке;

$R_0 = U_{\text{ст}}/I_{\text{ст}}$ — среднее сопротивление постоянному току (рассчитывают для середины рабочего участка).

К предельным параметрам относятся:

P_{max} — наибольшая рассеиваемая мощность, превышение которой приводит к тепловому пробую;

$I_{\text{стmin}}$ — минимальный ток стабилизации (соответствует точке возникновения электрического пробоя);

$I_{\text{стmax}}$ — максимальный ток стабилизации, $I_{\text{стmax}} = P_{\text{max}}/U_{\text{ст}}$.

Туннельный диод

Эти диоды работают на основе туннельного эффекта. Поскольку вольт-амперная характеристика при туннельном эффекте имеет падающий участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением, туннельный диод используют для усиления и генерирования колебаний, а также в качестве прибора с двумя устойчивыми состояниями (в высокоскоростных переключателях).

Параметры туннельного диода следующие:

I_{max} , I_{min} — ток в максимуме и в минимуме соответственно (см. рис. 1.7);

$U_{I_{\text{max}}}$ — напряжение, соответствующее максимуму тока;

$U_{I_{\text{min}}}$ — напряжение, соответствующее минимуму тока;

$R_- = dU/dI$ — отрицательное сопротивление падающего участка вольт-амперной характеристики;

$I_{\text{max}}/I_{\text{min}}$ — относительный перепад участка с отрицательным наклоном;

C_d — емкость перехода.

Описание лабораторного оборудования

Лабораторную работу выполняют на стенде СПЭ-7, который состоит из лабораторного стола, приборного щита и автономного макета. Приборный щит содержит автономные источники питания и измерительные приборы с выносными клеммами. В автономный макет вмонтированы постоянные и переменные сопротивления, а также панели для включения электронных приборов. С помощью соединительных проводов схему измерения собирают на макете и подключают к источникам питания и измерительным приборам на щите.

Схемы измерения характеристик выпрямительного диода

При прямом включении диода (рис. 1.8, *а*) его сопротивление мало, сравнимо с сопротивлением миллиамперметра и много меньше сопротивления милливольтметра. Чтобы исключить в результатах измерения падение напряжения на миллиамперметре, милливольтметр подключают непосредственно к электродам диода. При обратном включении диода (рис. 1.8, *б*) сопротивление его велико, сравнимо с сопротивлением вольтметра и много больше сопротивления микроамперметра. Чтобы исключить из результатов измерения ток вольтметра, вольтметр включают к последовательно соединенным диоду и микроамперметру.

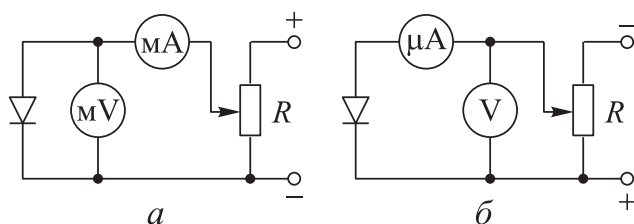


Рис. 1.8. Схемы прямого (*а*) и обратного (*б*) включения диода

Схемы измерения характеристик полупроводникового стабилитрона

При измерении рабочего участка характеристики на стабилитрон подается обратное напряжение (рис. 1.9).

Для ограничения обратного тока в режиме пробоя включается сопротивление $R_6 = 100$ Ом. При снятии обратной ветви характеристики диода следует учесть, что на участке пробоя дифференциальное сопротивление стабилитрона соизмеримо с сопротивлением миллиамперметра. Для уменьшения ошибки измерения вольтметр подключают непосредственно к электродам стабилитрона.

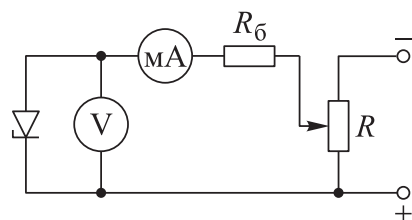


Рис. 1.9. Схема обратного включения стабилитрона

Схема измерения прямой ветви характеристики стабилитрона не отличается от схемы измерения прямой ветви характеристики выпрямительного диода (см. рис. 1.8, а).

Схема измерения характеристик туннельного диода

Измерение падающего участка вольт-амперной характеристики туннельного диода связано с определенными экспериментальными трудностями. Рассмотрим схему измерения прямой ветви характеристики обычного диода (см. рис. 1.8, а). Если здесь миллиамперметр и милливольтметр заменить эквивалентными сопротивлениями R_A и R_V соответственно, пересчитать часть схемы без диода для эквивалентного источника напряжения, то она примет вид, представленный на рис. 1.10. Для такой цепи должно выполняться равенство, составленное по второму правилу Кирхгофа: $E_{\text{экв}} = IR_{\text{экв}} + U$, где I — ток; U — напряжение на диоде.

В координатах вольт-амперной характеристики диода этому равенству соответствует так называемая нагрузочная прямая (см. рис. 1.7, прямая $I-I$). Рабочая точка диода (I, U) может находиться

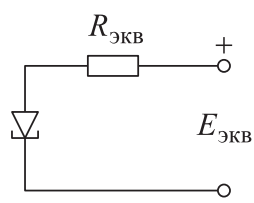


Рис. 1.10. Эквивалентная схема измерения параметров туннельного диода

только на нагрузочной прямой. При увеличении ЭДС источника питания и, соответственно, $E_{\text{экв}}$ нагрузочная прямая перемещается параллельно самой себе вверх и рабочая точка по участку ab — тоже вверх. Как только нагрузочная прямая окажется касательной к характеристике диода вблизи максимума, рабочая точка скачком переместится на участок bd . При уменьшении ЭДС источника питания нагрузочная прямая смещается вниз и рабочая точка перемещается

ется вниз по участку $дв$. Как только нагрузочная прямая станет касательной к характеристике диода вблизи минимума, рабочая точка скачком займет положение на участке $аб$. При указанном положении нагрузочной прямой (если $|R_-| < R_{эКВ}$) падающий участок измерить невозможно.

Чтобы измерить падающий участок, нагрузочная прямая при любом значении ЭДС источника питания не должна пересекать характеристику диода более чем в одной точке (см. рис. 1.7, прямая 2–2), т. е. должно выполняться условие $|R_-| > R_{эКВ}$, что возможно при очень малом внутреннем сопротивлении источника питания. В обычной схеме выполнить это условие не удастся, однако можно в мостовой. В лабораторной работе используется мостовая схема, построенная на двух эмиттерных повторителях (рис. 1.11). В диагональ моста между эмиттерами двух транзисторов включен исследуемый диод. Схема собрана в специальной приставке (обведена штриховой линией на рисунке).

На базу одного транзистора подают фиксированное смещение, на базе другого транзистора смещение регулируют с помощью потенциометра, находящегося на автономном макете. Это позволяет плавно изменять значение и полярность напряжения в диагонали

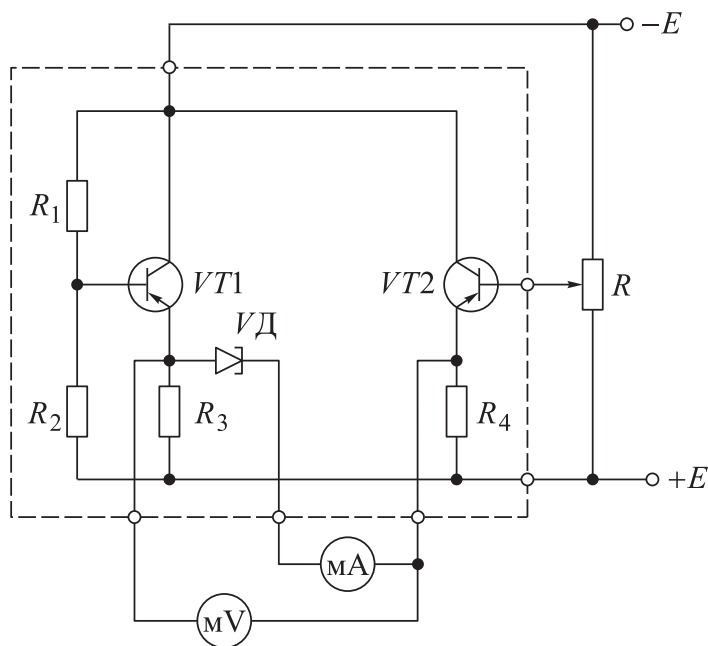


Рис. 1.11. Мостовая схема, построенная на двух эмиттерных повторителях

моста. При пересчете данной схемы к эквивалентной (см. рис. 1.10) эквивалентное сопротивление оказывается примерно равным сопротивлению миллиамперметра ($R_{\text{экв}} = R_{\text{МА}} = 4 \text{ Ом}$).

Порядок выполнения работы

Выпрямительный диод

1. Начертить схему снятия прямой ветви вольт-амперной характеристики полупроводникового диода (см. рис. 1.8, а). Указать полярность включения приборов, которая устанавливается в соответствии с направлением тока через прибор. Выбрать на приборном щите приборы и пределы измерения в соответствии со справочными данными (см. приложение). Собрать схему для исследования диода типа Д7Ж и снять прямую ветвь его характеристики $I_{\text{пр}} = f(U_{\text{пр}})$. Напряжение изменять от 0 до значения, при котором $I_{\text{пр}} = 75 \text{ мА}$, через 100 мВ.

2. Начертить схему для снятия обратной ветви вольт-амперной характеристики диода (см. рис. 1.8, б). Указать полярности включения приборов. Выбрать измерительные приборы и пределы измерений. Собрать схему для исследования диода типа Д7Ж и снять обратную ветвь его характеристики $I_{\text{обр}} = f(U_{\text{обр}})$. Обратное напряжение изменять от 0 до 100 В через 5 В.

3. Определить по измеренным вольт-амперным характеристикам прямое сопротивление диода при заданном прямом токе и обратное сопротивление при заданном обратном напряжении. Построить графики их зависимостей от температуры.

Стабилитрон

4. Начертить схему для снятия обратной ветви характеристики стабилитрона (см. рис. 1.9). Указать полярность включения приборов. Выбрать на приборном щите приборы и пределы измерения в соответствии со справочными данными стабилитрона (см. приложение) и заданием. Собрать схему для исследования стабилитрона типа Д814 А и снять обратную ветвь его характеристики $I_{\text{обр}} = f(U_{\text{обр}})$. Обратное напряжение изменять от 0 до значения, при котором $I_{\text{обр}} = 5 \text{ мА}$.

5. Начертить схему для снятия прямой ветви характеристики стабилитрона (рис. 1.8, а). Указать полярность включения приборов. Выбрать на приборном щите приборы и пределы измерения в соответствии со справочными данными стабилитрона (см. приложение) и заданием. Собрать схему стабилитрона и снять прямую ветвь его характеристики $I_{\text{пр}} = f(U_{\text{пр}})$. Прямое напряжение изменять от 0 до 600 мВ.

6. Рассчитать дифференциальное сопротивление и сопротивление постоянному току стабилитрона. Расчет проводить для середины участка стабилизации $I_{\text{ст}} = 0,5I_{\text{стmax}}$ по формулам $R_i = \Delta U / \Delta I$, $R_0 = U_{\text{ст}} / I_{\text{ст}}$.

7. Начертить схему для измерения прямой ветви характеристики туннельного диода типа ГИ305А. Указать полярность включения приборов. Выбрать на приборном щите приборы и пределы измерения в соответствии с заданием и справочными данными диода (см. приложение).

7.1. Собрать схему. Соединительными проводами подключить к приставке с туннельным диодом потенциометр с макета, источник питания и милливольтметр. Установить ручку потенциометра на макете в положение, соответствующее нулевому напряжению на базе относительно общей точки.

7.2. Включить источник питания. Плавно вращая ручку регулятора напряжения на передней панели источника, добиться максимума отклонения стрелки милливольтметра в выбранном пределе измерения (не более 1,5 В). **В дальнейшем эту ручку и тумблер источника питания не трогать!** Сбалансировать мостовую измерительную схему с помощью потенциометра на макете. Для этого вращать движок потенциометра до достижения нулевого (**нуль не переходить!**) показания милливольтметра.

7.3. Включить миллиамперметр. Снять прямую ветвь характеристики туннельного диода. Напряжение $U_{\text{пр}}$ изменять от 0 до 600 мВ.

8. Начертить схему для измерения обратной ветви характеристики туннельного диода (от предыдущей данная схема отличается полярностью включения приборов).

8.1. Собрать схему. С помощью потенциометра на макете установить нуль показаний на милливольтметре в собранной ранее схеме (см. п. 7.1). Поменять полярность включения милливольтметра и миллиамперметра. Напряжение $U_{обр}$ изменять от 0 до 60 мВ.

8.2. Снять обратную ветвь характеристики туннельного диода $I = f(U_{обр})$. Перестроить вольт-амперную характеристику туннельного диода, исключив влияние сопротивления миллиамперметра $R_{МА} = 4$ Ом. При перестроении экспериментальной характеристики в истинную нужно от абсциссы каждой точки экспериментальной кривой вычесть значение падения напряжения на миллиамперметре $U_{ист} = U_{эксп} - R_{МА} I$, где I — ток в рассматриваемой точке кривой.

9. Определить по истинной характеристике параметры туннельного диода: I_{max} , I_{min} , U_{max} , U_{min} , ΔI , ΔU , I_{max}/I_{min} , R_- , R_{cp} . Здесь ΔI , ΔU — перепады тока и напряжения соответственно на участке с отрицательным наклоном (см. рис. 1.7); R_- — отрицательное дифференциальное сопротивление участка $бв$ (см. рис. 1.7); $R_{cp} = U_{max}/I_{max}$.

10. Построить график зависимости дифференциального сопротивления от приложенного напряжения $R_i = f(U)$. Дифференциальное сопротивление рассчитать для прямой и обратной ветвей вольт-амперной характеристики туннельного диода.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Чем отличаются энергетические диаграммы металлов (проводников), полупроводников и диэлектриков?
2. Что такое собственная, электронная и дырочная проводимость полупроводников?
3. Где на энергетических диаграммах полупроводников с собственной, электронной и дырочной проводимостью располагается уровень Ферми?
4. Как зависит концентрация основных и неосновных носителей заряда в полупроводнике от температуры?
5. Как зависит положение уровня Ферми на энергетических диаграммах полупроводника от температуры и концентрации примеси?
6. Нарисуйте энергетические диаграммы p - n -перехода в состоянии равновесия, при его включении в прямом и обратном направлении.

7. Что такое контактная разность потенциалов и чем определяется ее значение?
8. Из каких компонентов состоит ток, протекающий через $p-n$ -переход? Какие компоненты преобладают при включении перехода в прямом и обратном направлении?
9. Как зависит вольт-амперная характеристика $p-n$ -перехода от температуры?
10. Укажите основные отличия вольт-амперной характеристики реального диода от теоретической характеристики перехода, а также их причины.
11. Что такое ширина $p-n$ -перехода и как она зависит от значения и полярности приложенного напряжения?
12. Что такое емкость $p-n$ -перехода? Из каких составляющих она складывается?
13. Назовите основные параметры полупроводникового выпрямительного диода.
14. Нарисуйте и объясните схемы для измерения прямой и обратной ветвей вольт-амперной характеристики диода.
15. Назовите основные виды пробоя $p-n$ -перехода. Объясните их механизм.
16. Какой вид пробоя используется в полупроводниковых стабилитронах?
17. Нарисуйте вольт-амперную характеристику стабилитрона. Какие физические процессы определяют форму его характеристики на разных участках?
18. Назовите основные параметры стабилитрона.
19. Почему в качестве материала для стабилитронов выбран кремний, а не германий?
20. Нарисуйте и объясните схемы измерения прямой и обратной ветвей вольт-амперной характеристики стабилитрона.
21. Что такое туннельный эффект?
22. Нарисуйте энергетические диаграммы $p-n$ -перехода туннельного диода в состоянии равновесия и при различных внешних напряжениях.
23. Объясните разницу в характере движения носителей заряда в диоде при работе на туннельном и диффузионном участках вольт-амперной характеристики туннельного диода.
24. Нарисуйте вольт-амперную характеристику туннельного диода.

25. Чем различаются характеристики обычного и туннельного диодов?
26. Какой из видов пробоя происходит при подаче на туннельный диод обратного напряжения?
27. Назовите параметры туннельного диода.
28. Каковы экспериментальные трудности, возникающие при снятии характеристик туннельного диода?
29. Чем объясняется возможность применения туннельных диодов на высоких частотах?
30. Назовите области применения туннельного диода.
31. Нарисуйте схему измерения вольт-амперной характеристики туннельного диода.