

Лабораторная работа № 85 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНОГО ПЕРЕХОДА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Цель работы: изучить физические процессы в электронно-дырочном переходе; исследовать вольт-амперную характеристику и определить параметры полупроводникового диода.

1. Теоретическое введение

Изучите теоретическое введение к лабораторной работе № 82.

Многие полупроводниковые приборы основаны на использовании свойств электронно-дырочного перехода. *Электронно-дырочный переход*, который еще называют *p-n-переходом* – это граница между двумя областями полупроводника, одна из которых имеет электронную, а другая – дырочную проводимость. Обычно *p-n-переход* создают внутри кристалла полупроводника

путем такой его обработки и введения соответствующих примесей, что в одной его части формируется область с преобладанием акцепторной примеси, а в другой – донорной.

В p -области основными носителями заряда являются дырки, образованные в результате перехода электронов из валентной зоны на энергетические уровни акцепторной примеси. Кроме того, в этой области имеется небольшое количество неосновных носителей заряда – электронов, возникших вследствие перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости.

В n -области основными носителями заряда являются электроны, перешедшие в зону проводимости с энергетических уровней донорной примеси. Имеющий место вследствие теплового возбуждения переход электронов из валентной зоны в зону проводимости приводит к появлению в валентной зоне небольшого количества дырок, которые являются неосновными носителями заряда в данной области.

На рис. 85.1 показано распределение концентрации носителей заряда вдоль оси x , перпендикулярной границе p - n -перехода. Здесь приняты следующие обозначения: p_p и n_n – концентрации основных носителей – дырок в p -области и электронов в n -области, p_n и n_p – концентрации неосновных носителей заряда – дырок в n -области и электронов в p -области.

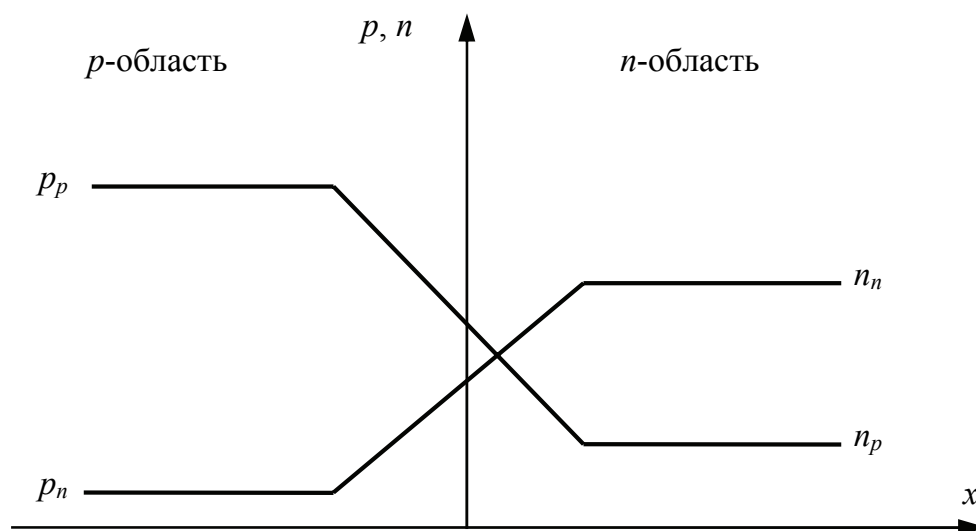


Рис. 85.1

В области p - n -перехода имеется градиент концентрации электронов и дырок, вследствие чего происходит диффузия электронов

из n -области в p -область и диффузия дырок из p -области в n -область. Этот ток электронов и дырок, обусловленный градиентом концентрации, получил название *диффузионного тока*. При этом приграничная область p -типа, получающая дополнительные электроны и теряющая дырки, будет заряжаться отрицательно, а приграничная область n -типа, отдающая электроны и приобретающая дополнительные дырки, – положительно. В результате в области p - n -перехода формируется двойной электрический слой, напряженность электрического поля которого направлена от n -области к p -области. Это электрическое поле препятствует дальнейшему диффузионному переходу электронов из n -области в p -область и обратному потоку дырок, но приводит к появлению *дрейфовых токов* неосновных носителей заряда: электронов из p -области в n -область и дырок из n -области в p -область. Результирующий ток через p - n -переход является суммой диффузионных и дрейфовых токов, текущих в противоположных направлениях.

В состоянии динамического равновесия диффузионный ток электронов полностью компенсируется их обратным дрейфовым током, а диффузионный ток дырок – их обратным дрейфовым током, так что результирующий ток через p - n -переход равен нулю. Наряду с этим выравниваются уровни Ферми в p - и n -областях, а энергетические зоны искривляются так, что энергетические уровни p -полупроводника оказываются поднятыми относительно уровней n -полупроводника (рис. 85.2).

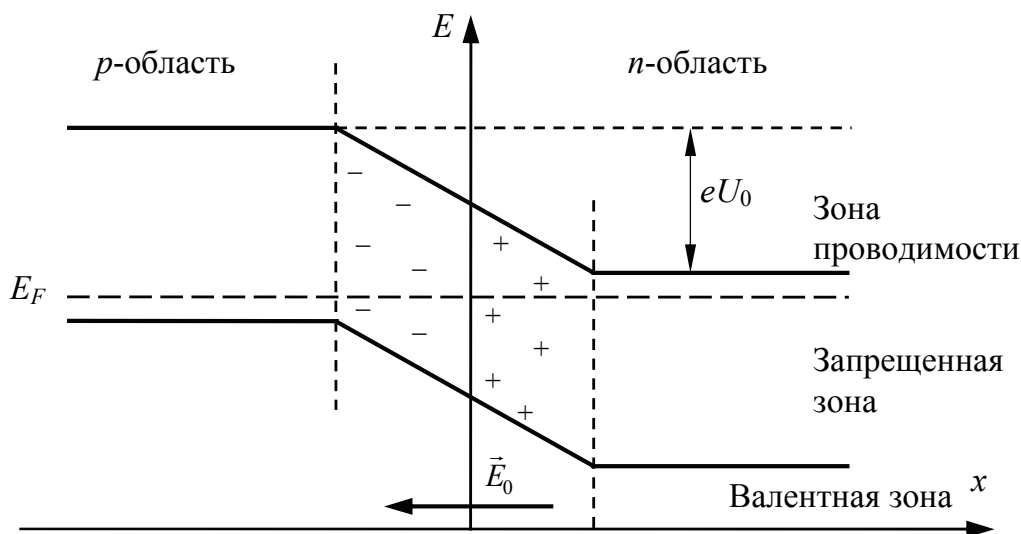


Рис. 85.2

Двойной электрический слой p - n -перехода характеризуется контактной разностью потенциалов U_0 и потенциальным барьером, высота которого eU_0 равна разности энергий уровней Ферми в p - и n -областях при отсутствии двойного электрического слоя.

Дрейфовые токи дырок I_{p_n} и электронов I_{n_p} через p - n -переход пропорциональны соответствующим концентрациям неосновных носителей заряда:

$$I_{p_n} = C_p p_n; \quad (85.1)$$

$$I_{n_p} = C_n n_p, \quad (85.2)$$

где C_p и C_n – коэффициенты пропорциональности.

Диффузионные токи дырок I_{p_p} и электронов I_{n_n} через p - n -переход пропорциональны произведению соответствующих концентраций основных носителей заряда и вероятности того, что носитель обладает энергией, достаточной для преодоления потенциального барьера высотой eU_0 , которая выражается больцмановским множителем $\exp(-eU_0/kT)$:

$$I_{p_p} = C_p p_p e^{-\frac{eU_0}{kT}}; \quad (85.3)$$

$$I_{n_n} = C_n n_n e^{-\frac{eU_0}{kT}}. \quad (85.4)$$

В состоянии динамического равновесия диффузионный и дрейфовый токи равны по величине, поэтому равновесные дырочный I_{p0} и электронный I_{n0} токи будут равны:

$$I_{p0} = I_{p_n} = I_{p_p} = C_p p_p e^{-\frac{eU_0}{kT}}; \quad (85.5)$$

$$I_{n0} = I_{n_p} = I_{n_n} = C_n n_n e^{-\frac{eU_0}{kT}}. \quad (85.6)$$

Рассмотрим p - n -переход, к которому приложена внешняя разность потенциалов U . Имеется два способа подключения источника тока к p - n -переходу: в одном случае на p - n -переходе возникает запирающая разность потенциалов, а в другом – пропускная. Когда к p - n -переходу приложена запирающая разность потенциалов, то n -область заряжается положительно по отношению к p -области. В результате уровень Ферми в n -области снижается на величину eU , а высота потенциального барьера, который вынуждены

преодолевают основные носители заряда, идущие через p - n -переход, повышается на эту же величину eU (рис. 85.3). Внешнее электрическое поле совпадает по направлению с полем двойного электрического слоя, препятствуя движению через p - n -переход основных носителей заряда и способствуя движению неосновных. Так как концентрация неосновных носителей заряда мала, то и величина тока через p - n -переход в случае запирающей разности потенциалов тоже мала.

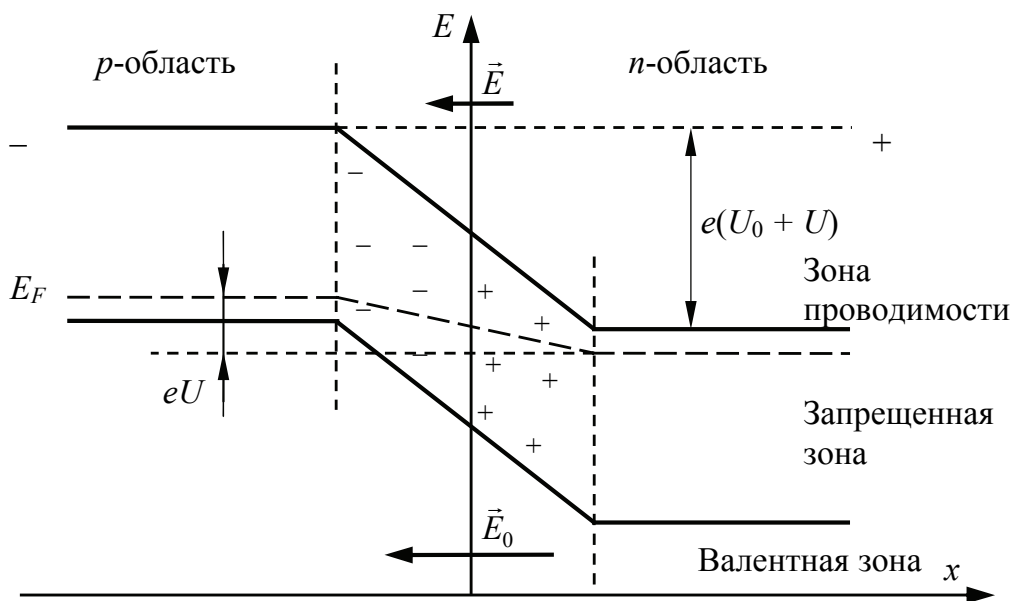


Рис. 85.3

Если к p - n -переходу приложена пропускная разность потенциалов, то n -область заряжается отрицательно и уровень Ферми в n -области повышается на величину eU , что соответствует снижению высоты потенциального барьера для основных носителей заряда на эту же величину eU (рис. 85.4). Внешнее электрическое поле компенсирует внутреннее поле двойного электрического слоя, способствуя тем самым перемещению через p - n -переход основных носителей заряда. Это приводит к росту силы тока в цепи.

Получим выражение для результирующего тока дырок через p - n -переход, к которому приложена разность потенциалов U . Очевидно, что этот ток будет определяться выражением

$$I_p = I_{p_p} - I_{p_n}, \quad (85.7)$$

где I_{p_n} – сила тока неосновных носителей заряда, которая очень мала и в первом приближении равна равновесной силе тока (85.5); I_{p_p} – сила тока основных носителей заряда, которая пропорциональна произведению их концентрации p_p на вероятность преодоления носителем заряда потенциального барьера высотой $e(U_0 - U)$ и определяется выражением

$$I_{p_p} = C_p p_p e^{-\frac{e(U_0 - U)}{kT}} = I_{p_0} e^{\frac{eU}{kT}}. \quad (85.8)$$

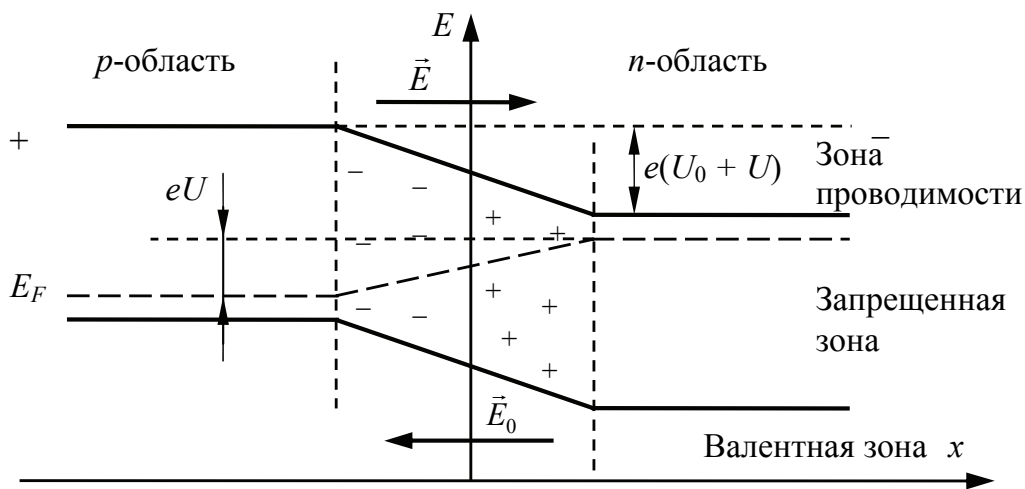


Рис. 85.4

Знак «минус» в выражении (85.7) показывает, что токи текут навстречу друг другу. Подставив в выражение (85.7) формулы (85.5) и (85.8), получим

$$I_p = I_{p_0} \left(\exp \frac{eU}{kT} - 1 \right). \quad (85.9)$$

Аналогичное выражение можно получить для результирующей силы тока электронов:

$$I_n = I_{n_0} \left(\exp \frac{eU}{kT} - 1 \right). \quad (85.10)$$

Суммарный ток через p - n -переход будет равен сумме тока дырок и электронов:

$$I = I_p + I_n = I_0 \left(\exp \frac{eU}{kT} - 1 \right), \quad (85.11)$$

где $I_0 = I_p + I_n$ – предельное значение обратного тока при $U \rightarrow -\infty$. Полученное выражение (85.11) описывает зависимость силы тока в p - n -переходе от внешнего напряжения U и является уравнением вольт-амперной характеристики p - n -перехода. Анализируя уравнение (85.11), можно сделать вывод, что p - n -переход обладает практически односторонней проводимостью. Если к p - n -переходу приложена пропускная разность потенциалов ($U > 0$), то увеличение напряжения U приводит к резкому экспоненциальному росту прямой силы тока I , тогда как при запирающей разности потенциалов ($U < 0$) рост абсолютного значения напряжения приводит лишь к незначительному росту обратного тока, который асимптотически стремится к предельному абсолютному значению I_0 . График вольт-амперной характеристики p - n -перехода показан на рис. 85.5 пунктирной линией.

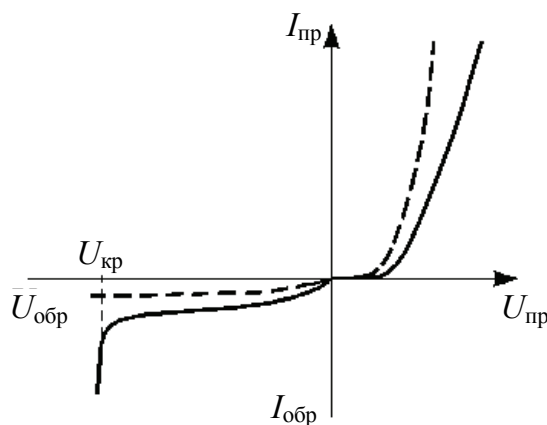


Рис. 85.5

2. Описание установки и метода измерений

Простейшим электронным прибором, содержащим электронно-дырочный переход, является полупроводниковый диод, принципиальная схема которого показана на рис. 85.6. Буквами p и n обозначены области полупроводника с проводимостями соответственно p -типа и n -типа. Обычно концентрации основных носителей заряда (дырок в p -области и электронов в n -области) сильно различаются. Одна из областей p - n -структуры, называемая эмиттером, обозначается на схеме знаком «+» и имеет бóльшую концентрацию основных носителей заряда, чем другая область, назы-

ваемая базой. Сопротивление базы намного больше сопротивления эмиттера. База и эмиттер образуют омические контакты с электродами. К электродам подсоединены металлические выводы, посредством которых диод включается в цепь.

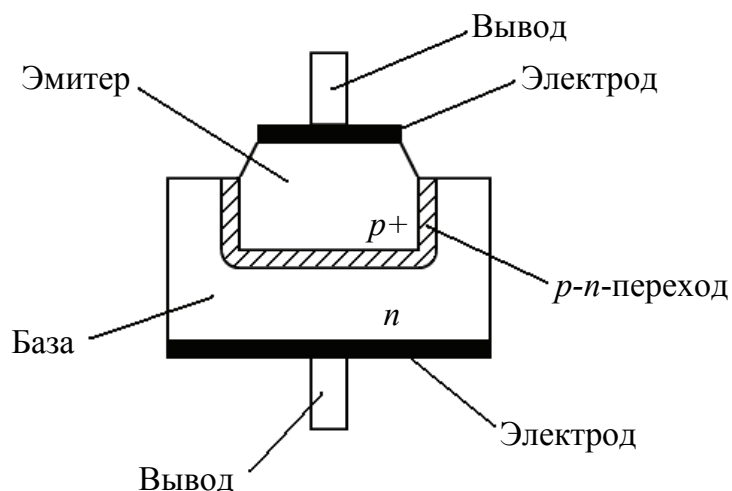


Рис. 85.6

Основной характеристикой полупроводникового диода является вольт-амперная характеристика (зависимость силы тока I от напряжения U), график которой показан на рис. 85.5 сплошной линией. Здесь же пунктиром нанесена теоретическая вольт-амперная характеристика электронно-дырочного перехода, уравнение которой имеет вид:

$$I = I_0 \left(\exp \left(\frac{eU_{pn}}{kT} \right) - 1 \right), \quad (85.12)$$

где I_0 – сила тока неосновных носителей заряда; e – заряд электрона; U_{pn} – напряжение на электронно-дырочном переходе; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура. Для наглядности обратные ветви характеристик на рис. 85.5 изображены в более крупном масштабе по току и в более мелком – по напряжению по сравнению с прямыми ветвями. В области малых токов реальная и теоретическая вольт-амперные характеристики совпадают. Но при больших прямых токах, а также при высоких запирающих напряжениях характеристики расходятся, что является следствием явлений, не учтенных при теоретическом анализе процессов в электронно-дырочном переходе. К таким явлениям можно отне-

сти: падение напряжения на сопротивлении базы диода, инжекцию носителей заряда из эмиттера в базу диода через p - n -переход, процессы генерации и рекомбинации носителей заряда в области p - n -перехода, поверхностную проводимость p - n -перехода.

Важными параметрами полупроводникового диода, которые могут быть рассчитаны по его вольт-амперной характеристике, являются: статическое сопротивление $R_{ст}$, динамическое сопротивление $R_{д}$, коэффициент выпрямления K , а также сопротивление базы диода $r_б$. Статическое сопротивление диода $R_{ст}$ – это отношение приложенного напряжения U к силе тока I , проходящего через диод:

$$R_{ст} = U/I. \quad (85.13)$$

Динамическим (дифференциальным) сопротивлением диода называется величина $R_{д}$, определяемая выражением

$$R_{д} = \frac{dU}{dI} \approx \frac{\Delta U}{\Delta I}, \quad (85.14)$$

где ΔU – малое изменение приложенного напряжения; ΔI – соответствующее изменение силы тока в диоде. Коэффициент выпрямления диода K – это отношение силы прямого тока в диоде $I_{пр}$ к силе обратного тока $I_{обр}$ при одинаковом (по модулю) приложенном напряжении:

$$K = I_{пр}/I_{обр}. \quad (85.15)$$

В области больших прямых токов реальная вольт-амперная характеристика диода (рис. 85.5) расположена ниже теоретической и является почти линейной. В диодах с большой толщиной базы инжекция носителей заряда через p - n -переход не оказывает заметного влияния на вольт-амперные характеристики. В этом случае отклонение экспериментальной вольт-амперной характеристики от теоретической связано главным образом с падением напряжения на сопротивлении базы диода $r_б$. В результате напряжение на электронно-дырочном переходе U_{pn} оказывается меньше напряжения U , приложенного к диоду, т. е.

$$U_{pn} = U - Ir_б. \quad (85.16)$$

С учетом выражения (85.16) уравнение вольт-амперной характеристики (85.12) в области больших прямых токов, когда $\exp(eU_{pn}/kT) \gg 1$, можно записать в виде

$$I = I_0 \exp\left(\frac{e(U - Ir_6)}{kT}\right). \quad (85.17)$$

Это уравнение позволяет произвести оценочный расчет сопротивления базы диода r_6 по двум экспериментальным точкам прямой ветви вольт-амперной характеристики. Чтобы получить расчетную формулу, выразим из уравнения (85.17) напряжение U :

$$U = Ir_6 + \frac{kT}{e} \ln \frac{I}{I_0}. \quad (85.18)$$

Тогда разность напряжений для двух точек прямой ветви вольт-амперной характеристики будет равна

$$U_2 - U_1 = (I_2 - I_1)r_6 + \frac{kT}{e} \ln \frac{I_2}{I_1}. \quad (85.19)$$

Выражая отсюда r_6 , получаем формулу для оценочного расчета сопротивления базы диода:

$$r_6 = \frac{U_2 - U_1}{I_2 - I_1} - \frac{kT}{e(I_2 - I_1)} \ln \frac{I_2}{I_1}. \quad (85.20)$$

При не очень высоких запирающих напряжениях основной причиной несоответствия теоретической и реальной вольт-амперных характеристик диода (рис. 85.5) являются процессы тепловой генерации и рекомбинации носителей заряда в области p - n -перехода. При росте запирающего напряжения увеличивается ширина p - n -перехода и возрастает число генерируемых в переходе носителей заряда, в результате чего обратный ток диода не достигает насыщения, как это следует из теоретической вольт-амперной характеристики, а медленно растет. Другой причиной роста обратного тока диода является поверхностная проводимость электронно-дырочного перехода.

Когда запирающее напряжение диода достигает определенного критического значения $U_{кр}$, сила тока начинает резко возрастать. Это явление называют пробоем диода. Напряжение, при котором наступает пробой p - n -перехода, зависит от типа диода и может иметь величину от единиц до сотен вольт.

Для снятия вольт-амперных характеристик p - n -переходов выпрямительных диодов используется лабораторная установка, электрическая схема которой представлена на рис. 85.7.

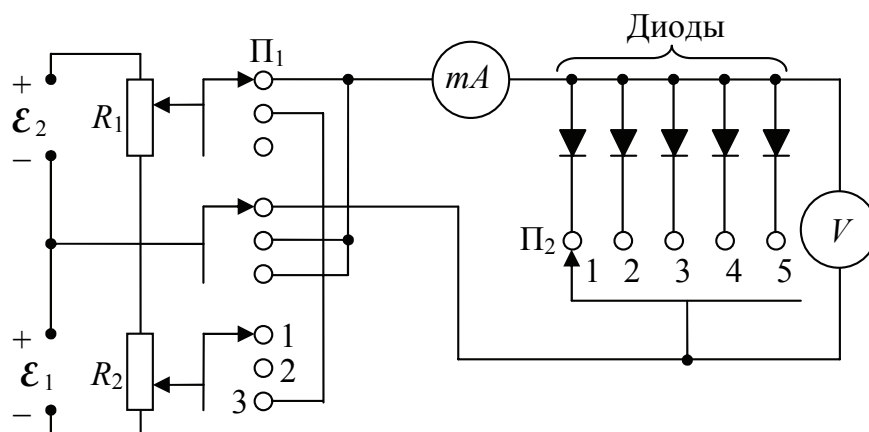


Рис. 85.7

Все элементы электрической схемы, за исключением миллиамперметра и вольтметра, собраны в одном корпусе. Схема содержит два источника постоянного напряжения \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 , которые подключаются к измерительной цепи посредством трехпозиционного переключателя Π_1 . Низковольтный источник \mathcal{E}_1 предназначен для исследования прямой ветви (положение 1 переключателя Π_1) и начального участка обратной ветви (положение 2 переключателя Π_1) вольт-амперной характеристики. Источник более высокого напряжения \mathcal{E}_2 используется при исследовании обратной ветви вольтамперной характеристики (положение 3 переключателя Π_1). При использовании источника \mathcal{E}_1 напряжение на диоде регулируется с помощью делителя напряжения R_1 , а при использовании источника \mathcal{E}_2 – с помощью делителя напряжения R_2 . Для подключения к измерительной схеме одного из исследуемых диодов служит переключатель Π_2 . Сила тока в диоде измеряется миллиамперметром mA , а напряжение – вольтметром V .

3. Порядок выполнения работы

1. Подготовьте таблицу для занесения результатов измерений.

i	Прямое подключение					Обратное подключение				K
	$U,$	$I,$	$R_{ст},$	$R_{д},$	$r_{б},$	$U,$	$I,$	$R_{ст},$	$R_{д},$	

2. Пользуясь схемой (рис. 85.7) и приложением к установке, ознакомьтесь с устройством установки, назначением и расположе-

нием измерительных приборов, изучите инструкцию пользования амперметром и вольтметром. Поверните рукоятки реостатов R_1 и R_2 в крайнее положение против хода часовой стрелки, что соответствует нулевому напряжению в измерительной цепи. Переключатель Π_1 установите в положение 1 (для снятия прямой вольт-амперной характеристики). При помощи переключателя Π_2 включите в измерительную схему исследуемый диод. С разрешения преподавателя или лаборанта подключите установку и приборы к сети.

3. Измерьте прямую ветвь вольт-амперной характеристики диода. Для этого изменяя при помощи реостата R_1 прямое напряжение U на диоде от 0 до 1 В через 0,1 В, измерьте соответствующие значения силы тока I . Закончив измерения, поверните рукоятку реостата R_1 в исходное положение (крайнее положение против хода часовой стрелки).

4. Измерьте начальный участок обратной ветви вольт-амперной характеристики диода. Для этого переключатель Π_1 переведите в положение 2 и, изменяя реостатом R_1 запирающее напряжение U на диоде от 0 до 1 В через 0,1 В, измерьте соответствующие значения силы тока I . Закончив измерения, поверните рукоятку реостата R_1 в исходное положение (крайнее положение против хода часовой стрелки).

5. Измерьте обратную ветвь вольт-амперной характеристики диода при высоких запирающих напряжениях. Для этого переключатель Π_1 переведите в положение 3 и, изменяя реостатом R_2 запирающее напряжение U от 5 до 25 В через 5 В, измерьте соответствующие значения силы тока I . Закончив измерения, поверните рукоятку реостата R_2 в исходное положение (крайнее положение против хода часовой стрелки) и отключите установку и приборы от электросети.

6. По полученным экспериментальным данным постройте график вольт-амперной характеристики $I = f(U)$ (при этом необходимо выбрать различные масштабы для прямой и обратной ветвей).

7. Используя формулы (85.13), (85.14) и (85.15), вычислите для полупроводникового диода статическое $R_{ст}$ и динамическое $R_{д}$ сопротивления в прямом и обратном направлениях, а также коэффициент выпрямления K . Проанализируйте зависимость полученных значений от величины напряжения U , приложенного к диоду.

8. По двум последним экспериментальным точкам прямой ветви вольт-амперной характеристики, используя выражение (85.20),

оцените сопротивление базы диода r_b и сравните его со статическим и динамическим сопротивлением диода.

9. Подготовьте выводы по выполненной лабораторной работе.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое электронно-дырочный переход (p - n -переход)?
2. Как возникают основные и неосновные носители заряда в p -области и n -области p - n -перехода?
3. Объясните механизм возникновения контактной разности потенциалов в p - n -переходе.
4. Что такое диффузионный и дрейфовый токи в p - n -переходе?
5. Получите выражение для силы тока через p - n -переход.
6. Какой вид имеет вольт-амперная характеристика p - n -перехода?
7. Почему при пропускной разности потенциалов сила тока через p - n -переход резко увеличивается, а при запирающей возрастает незначительно?
8. Что такое полупроводниковый диод и где он применяется?
9. По каким причинам экспериментальная вольт-амперная характеристика диода отличается от теоретической?