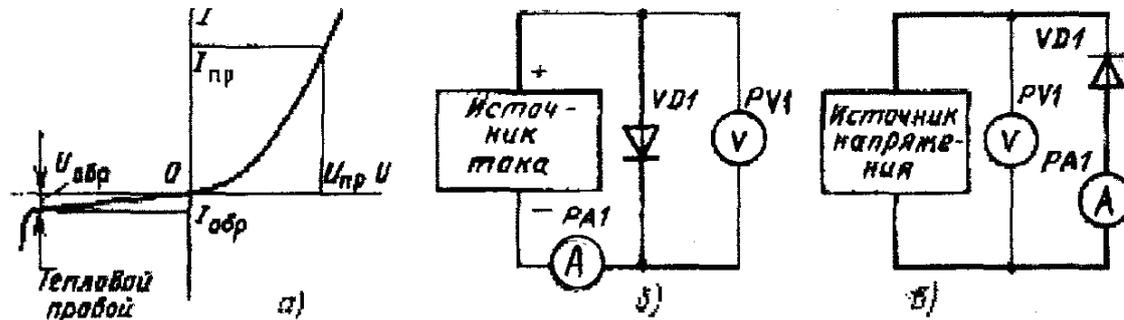


## Тема 6.3 Измерение параметров полупроводниковых приборов

## Измерение параметров полупроводниковых приборов

Основные параметры диодов и стабилитронов малой мощности следующие: прямое постоянное напряжение диода  $U_{пр}$  при заданном прямом постоянном токе; постоянный обратный ток  $I_{обр}$  при заданном обратном напряжении; напряжением стабилизации  $U_{ст}$  (для стабилитронов при протекании заданного тока стабилизации); емкость диода и дифференциальное сопротивление. Туннельные диоды характеризуются еще пиковым током  $I_{п}$ , током впадины  $I_{в}$ , напряжениями пика и впадины  $U_{п}$  и  $U_{в}$  и напряжением раствора  $U_{рр}$ .

Статические параметры полностью характеризуют вольтамперную характеристику диода, что вполне достаточно для проверки работоспособности элемента и расчета схем.



При оценке параметров прямой ветви от источника постоянного рис.б с внутренним сопротивлением  $R_{ист}$  задается определенная величина тока, не зависящая от изменения падения напряжения на испытуемом диоде. Дифференциальное сопротивление диода в различных точках его вольтамперной характеристики различно (рис. а).

При измерении параметров обратной характеристики диодов (рис. в) необходимо, чтобы источник питания имел малое внутреннее сопротивление (источник напряжения), так как величина обратного тока невелика и незначительное ее изменение приводит к большому изменению (на большом  $R_{обр}$  диода).

В области пробоя сопротивление диода вновь резко уменьшается и необходимо регулировать ток. Эту область характеристики надо исследовать осторожно во избежание повреждения диода.

Современные радиоизмерительные приборы позволяют снять вольтамперную характеристику достаточно точно. Напряжения измеряют высокоомным (107 Ом) цифровым вольтметром, а тока — цифровым миллиамперметром. При отсутствии цифрового миллиамперметра измерение тока можно осуществить косвенным образом, включив в цепь диода образцовый резистор, на котором измеряется падение напряжения.

## Лабораторная работа экспериментальное определение основных параметров полупроводниковых приборов

### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью лабораторной работы является:

- изучить основные характеристики диодов, транзисторов и стабилитронов;
- освоить методику измерения основных параметров маломощных транзисторов, полупроводниковых диодов и стабилитронов;
- определить работоспособность полупроводниковых приборов по результатам проведенных измерений.

### 2. УКАЗАНИЯ ПО ПОДГОТОВКЕ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

1. Ознакомиться с графиком выполнения лабораторной работы и сдачи отчета.
2. Повторить следующие вопросы.

электропроводность примесных полупроводников; электрические процессы

в р-п-переходе; полупроводниковые диоды. Краткое изложение, указанных вопросов приведено в разделе 3. Изучить необходимый теоретический материал. Смотри список рекомендуемой литературы и раздел 3 данного методического указания. Подготовиться к ответам на вопросы для допуска к выполнению лабораторной работы.

3. Подготовить таблицы для снятия экспериментальных характеристик. Ознакомиться с

порядком выполнения лабораторной работы.

### 3. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

#### 3.1. Полупроводниковые диоды и стабилитроны

Полупроводниковым диодом называют полупроводниковый прибор с одним р-п- переходом и двумя выводами. В основе работы полупроводникового диода лежат электрические свойства р-п-перехода, который создается технологически при изготовлении диода, введением в один из слоев монокристалла акцепторной примеси, а в другой - донорной примеси. При этом один слой будет иметь преимущественно дырочную проводимость (р-слой), а второй - преимущественно электронную проводимость (п-слой). В р-п- структуре на границе раздела слоев возникает разность концентраций одноименных носителей заряда, что приводит

к возникновению диффузионного движения основных носителей заряда во встречном направлении через границу раздела: дырки из p-области переходят в n-область, а электроны из n-области - в p-область. Свободные электроны из зоны полупроводника n-типа занимают свободные уровни в валентной зоне полупроводника p-типа, а дырки, вошедшие в n-область рекомбинируют с электронами этой области.

В результате вблизи границы двух полупроводников образуется слой, лишенный подвижных носителей заряда и поэтому обладающий высоким электрическим сопротивлением (так называемый запирающий слой). Возникновение запирающего слоя является важнейшим следствием диффузионного движения носителей заряда через границу раздела слоев, в результате которого в приграничных областях появляются объемные заряды, создаваемые ионами атомов примесей. Так, при уходе дырок из p-слоя в нем создается нескомпенсированный отрицательный объемный заряд за счет оставшихся отрицательных ионов акцепторных атомов примеси. Электроны же, ушедшие из n-слоя, оставляют здесь нескомпенсированный положительный объемный заряд, создаваемый положительными ионами донорных атомов примеси. Область образовавшихся неподвижных объемных зарядов (ионов) и есть область p-n-перехода. Но за пределами p-n-перехода все заряды взаимно компенсируют друг друга и полупроводник остается электрически нейтральным.

Ввиду наличия объемного заряда в p-n-переходе создаются электрическое поле и разность потенциалов. Толщина  $\ell$  p-n-перехода обычно изменяется от долей до нескольких микрометров и зависит от концентрации примеси. Разность потенциалов  $\varphi(x)$  характеризует собой распределение потенциалов в электрическом поле p-n-перехода. На рисунке 1а показана зависимость  $\varphi(x)$  (за нулевой принят потенциал n-слоя). Наибольшая ордината кривой распределения потенциалов  $\varphi(x)$  в электрическом поле p-n-перехода определяет собой потенциальный барьер  $\varphi(x)$  в p-n-переходе (или контактную разность потенциалов).

Потенциальный барьер в p-n-переходе создает тормозящее поле для движения основных носителей заряда и ускоряющее поле для неосновных носителей заряда. Поэтому неосновные носители заряда переходят под действием электрического поля из одного слоя в другой образуя дрейфовый ток  $I_{др}$ , который направлен навстречу диффузионному току  $I_{диф}$ , обусловленному движением основных носителей заряда. Таким образом, через p-n-переход в равновесном состоянии (без приложения внешнего напряжения) движутся два встречно направленных потока зарядов, находящихся в динамическом равновесии и взаимно компенсирующих друг друга. Суммарный ток через p-n-переход, а следовательно и через диод, будет равен нулю.

$$I = I_{диф} - I_{др} = 0 \quad (1)$$

При подключении внешнего напряжения к диоду изменяются условия переноса заряда через p-n-переход. При этом важно с какой полярностью внешнее напряжение прикладывается к p-n-переходу. Рассмотрим процессы в p-n-переходе при условии, что внешнее напряжение  $U_a$ , подключено к p-n-переходу в прямом направлении, т.е. плюсом к p-области, а минусом - к n-области. Высота потенциального барьера снижается от  $\varphi_0$  до  $\varphi_0 - U_a$ , поскольку при таком подключении внешнего источника создаваемое им электрическое поле направлено противоположно внутреннему полю в p-n-переходе, что приводит к уменьшению результирующего поля. Изменение высоты потенциального барьера показано на рисунке 1, б).

Снижение высоты потенциального барьера облегчает переход основных носителей заряда, т.е. приводит к возрастанию диффузионного тока через p-n-переход. Указанное явление называют инжекцией носителей заряда через p-n-переход. Дрейфовый ток через p-n-переход, создаваемый потоками неосновных носителей заряда, остается без изменения (т.е. очень малым по величине). Следовательно, полный ток через p-n-переход будет определяться диффузионной составляющей тока. Ток при этом называют прямым ( $I_a$ ), а p-n-переход - открытым, или смещенным в прямом направлении. Зависимость тока диффузии (прямого тока) от прямого напряжения носит экспоненциальный характер.

## 4. Порядок проведения работы

### 1. УСТАНОВКА ПРИБОРА В НУЛЬ

1. После включения и пятиминутного прогрева поставьте переключатель ДИОД-

ТРАНЗИСТОР (левый нижний) в положение **p-n-p** или **n-p-n** или **ДИОД**.

2. Поставьте переключатель РЕЖИМ (левый верхний) в положение **30**. Поставьте

ручку **►0◄** на передней панели в среднее положение.

3. Поставьте правый нижний переключатель (переключатель параметров) в положение  **$I_{сво} \mu A$**
4. Ключ РЕЖИМ-ИЗМЕР. в положение ИЗМЕР. и ручкой **►0◄** на передней панели установить стрелку индикатора точно на нулевую отметку. Поставьте ключ РЕЖИМ-ИЗМЕР. в среднее положение.
5. Снимите крышку с держателя полупроводниковых приборов.

### 4.2. Проведение измерений

#### 4.2.1. Измерение параметров транзисторов

1. Снимите крышку с держателя полупроводниковых приборов
2. Подключите проверяемый транзистор к держателю полупроводниковых приборов согласно обозначениям и расположению выводов. Эмиттер проверяемого транзистора подключите к контактам E1 или E2 в зависимости от требуемого тока эмиттера (при подключении к контакту E1 ток эмиттера равен 1 мА, при подключении к контакту E2 ток эмиттера равен 5 мА).

#### 4.2.1.1. Определение короткого замыкания между коллектором и эмиттером проверяемого транзистора:

- поставьте правый нижний переключатель (переключатель параметров) в

положение **K3 h<sub>22</sub>**;

- поставьте правый верхний переключатель (переключатель диапазонов) в положение **К3**;
- поставьте ключ РЕЖИМ-ИЗМЕР. в положение ИЗМЕР. При коротком замыкании между коллектором и эмиттером транзистора стрелка индикатора прибора будет зашкаливать.

#### 4.2.1.2. Измерение выходной проводимости транзистора:

- поставьте правый нижний переключатель (переключатель параметров) в положение, **К3  $h_{22}$**
- поставьте правый верхний переключатель (переключатель диапазонов) в положение **▼h**
- поставьте ключ РЕЖИМ-ИЗМЕР. в положение ИЗМЕР. и ручкой **▼h** установите стрелку индикатора на деление 4 шкалы  $h_{22}$ , поставьте ключ РЕЖИМ-ИЗМЕР. в среднее положение;
- поставьте правый верхний переключатель (переключатель диапазонов) в положение  $h_{22}$ ;
- поставьте ключ РЕЖИМ-ИЗМЕР в положение ИЗМЕР. и по шкале индикатора прибора отсчитайте величину выходной проводимости в мкСм;
- поставьте ключ РЕЖИМ-ИЗМЕР. в среднее положение;
- *если при измерении выходной проводимости транзистора стрелка индикатора находится на нулевой отметке или около нее, то в этом случае имеется или малая выходная проводимость проверяемого транзистора, или отсутствует контакт выводов транзистора с держателем полупроводниковых приборов, или имеется обрыв внутри корпуса транзистора; отсутствие контакта или обрыв внутри корпуса транзистора индицируется отсутствием отклонения стрелки при проверке. Если при измерении выходной проводимости стрелка индикатор зашкаливает, то в этом случае имеется или большая выходная проводимость проверяемого транзистора, или короткое замыкание между коллектором и базой транзистора; короткое замыкание индицируется зашкаливанием стрелки индикатора при проверке транзистора.*

#### 4.2.1.3. Измерение коэффициента передачи тока транзистора:

- поставьте правый нижний переключатель (переключатель параметров) в положение  $h_{21}$ ;
- поставьте правый верхний переключатель (переключатель диапазонов) в положение **▼h**;
- поставьте ключ РЕЖИМ-ИЗМЕР. в положение ИЗМЕР. и ручкой **▼h** установите стрелку индикатора на деление 0,9 шкалы  $h_{21b}$ , поставьте ключ РЕЖИМ-ИЗМЕР. в среднее положение;
- поставьте правый верхний переключатель (переключатель диапазонов) в положение  $h_{21}$ ,
- поставьте ключ РЕЖИМ-ИЗМЕР. в положение ИЗМЕР. и по шкале  $h_{21b}$  или  $h_{21}$ , индикатора прибора отсчитайте величину коэффициента передачи тока; поставьте ключ РЕЖИМ-ИЗМЕР. в среднее положение;
- *если при измерении коэффициента передачи тока стрелка индикатора находится на отметке 1 шкалы  $h_{21b}$  или около нее, то в этом случае имеется или большой коэффициент передачи тока, или обрыв внутри корпуса транзистора между выводами эмиттера и базы, или отсутствует контакт между выводами эмиттера и базы транзистора и контактами E1 (E2) или B держателя полупроводниковых приборов.*

#### 4.2.1.4. Измерение обратного тока коллектора транзистора:

- поставьте правый нижний переключатель (переключатель параметров) в положение  **$I_{сво}$   $\mu A$** ;
- поставьте ключ РЕЖИМ-ИЗМЕР. в положение ИЗМЕР, и по шкале **10 U, I** индикатора прибора отсчитайте величину обратного тока коллектора. При помощи правого верхнего переключателя (переключателя диапазонов) выберите такой диапазон измерения (диапазоны 0,1; 1; 10 и 100 мкА), чтобы возможно было произвести уверенный отсчет показаний индикатора прибора; поставьте ключ РЕЖИМ-ИЗМЕР. в среднее положение;
- если при измерении обратного тока коллектора стрелка индикатора не отклоняется или отклоняется незначительно, то в этом случае или ток проверяемого транзистора менее контролируемого данным прибором, или имеется обрыв внутри корпуса транзистора, или отсутствует контакт между выводами транзистора и контактами В или С держателя полупроводниковых приборов.

### 4.2.2. Измерение параметров диодов

1. Снимите крышку с держателя полупроводниковых приборов
2. Подключите проверяемый диод к контактам + и – держателя диодов, причем длина выводов проверяемого диода должна быть достаточной для одновременного контактирования с обоими контактами + держателя полупроводниковых приборов. После подключения полупроводникового диода наденьте крышку на держатель полупроводниковых приборов.

#### 4.2.2.1. Измерение обратного тока диода $i_R$ :

- поставьте правый нижний переключатель (переключатель параметров) в

положение  **$I_R$** ;

- левым верхним переключателем (переключатель режимов) установите требуемое обратное напряжение (диапазоны 30, 100 и 400 В), взятое из справочных данных по полупроводниковым диодам (предельно допустимое обратное напряжение);
- поставьте ключ РЕЖИМ-ИЗМЕРЕНИЕ в положение РЕЖИМ и ручкой  **$U_R V$**  установите по индикатору прибора требуемую величину обратного напряжения диода;

- поставьте ключ РЕЖИМ-ИЗМЕР. в положение ИЗМЕР. и по шкале ... индикатора прибора отсчитайте величину обратного тока диода, выбрав при помощи правого верхнего переключателя (переключателя диапазонов) такой диапазон измерения (диапазон 0,1; 1; 10 и 100 мкА), чтобы было возможно произвести уверенный отсчет показаний индикатора;
- поставьте ключ РЕЖИМ-ИЗМЕР. в среднее положение;
- если при измерении обратного тока стрелка индикатора не отклоняется, то в этом случае или ток проверяемого полупроводникового прибора, менее контролируемого данным прибором, или есть обрыв внутри корпуса проверяемого полупроводникового прибора, или отсутствует контакт между выводами проверяемого полупроводникового прибора и контактами держателя полупроводникового прибора;
- если при измерении стрелка зашкаливает, то в этом случае обратный ток диода, более контролируемого данным прибором, или имеется короткое замыкание внутри корпуса проверяемого полупроводникового прибора;

#### 4.2.2.2. Измерение прямого напряжения диода:

- поставьте правый нижний переключатель (переключатель параметров) в положение  $U_F V$ ;
- поставьте правый верхний переключатель (переключатель диапазонов) в положение 3;
- левым верхним переключателем (переключатель режимов) установите требуемый прямой ток (диапазоны 30, 100 и 300 мА), взятое из справочных данных по полупроводниковым диодам (предельно допустимое значение прямого тока);
- поставьте ключ РЕЖИМ-ИЗМЕРЕНИЕ в положение РЕЖИМ и ручкой  $I_F mA$  установите по индикатору прибора требуемую величину прямого тока диода;
- поставьте ключ РЕЖИМ-ИЗМЕР. в положение 'ИЗМЕР. и отсчитайте величину прямого напряжения полупроводникового диода, выбрав при помощи правого верхнего переключателя (переключателя диапазонов) такой диапазон измерения (диапазоны 1 и 3 В), чтобы возможно было произвести уверенный отсчет показаний индикатора прибора;
- поставьте ключ РЕЖИМ-ИЗМЕР. в среднее положение;

#### 4.2.3. Измерение параметров стабилитрона

1. Снимите крышку с держателя полупроводниковых приборов
2. Подключите проверяемый стабилитрон к контактам + и – держателя диодов, причем длина выводов проверяемого стабилитрона должна быть достаточной для одновременного контактирования с обоими контактами + держателя полупроводниковых приборов. После подключения полупроводникового диода наденьте крышку на держатель полупроводниковых приборов.
3. Полупроводниковые стабилитроны подключаются к держателям в обратном направлении

##### 4.2.3.1. Измерение напряжения стабилизации:

- поставьте переключатель РЕЖИМ в положение 100;

- поставьте правый нижний переключатель (переключатель параметров) в положение  $U_Z V$ ;
- поставьте правый верхний переключатель (переключатель диапазонов) в положение 30;
- поставьте ключ РЕЖИМ-ИЗМЕР. в положение ИЗМЕР. и отсчитайте величину напряжения стабилизации, выбрав при помощи правого верхнего переключателя (переключателя диапазонов) такой диапазон (диапазоны 10 и 30 В), чтобы возможно было произвести уверенный отсчет показаний индикатора прибора;
- поставьте ключ РЕЖИМ-ИЗМЕР. в среднее положение.

Отключите проверяемый полупроводниковый прибор от держателя полупроводниковых приборов, снимите держатель контактов (если он использовался), наденьте крышку на держатель полупроводниковых приборов, отпустите кнопку СЕТЬ и отключите шнур питания прибора от сети.

#### 4.3. Общее задание на выполнение лабораторной работы

1. Привести подробную характеристику основных параметров диодов, транзисторов и стабилитронов.
2. Выполнить сравнительную оценку исследованных полупроводниковых приборов.

#### 5. Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение основных параметров выпрямительных диодов.
2. Какими основными параметрами характеризуются стабилитроны?
3. Какими основными параметрами необходимо руководствоваться при выборе транзисторов?
4. Почему к стабилитрону (в отличие от диода) прикладывается напряжение обратной полярности?
5. Изобразите простейшую схему включения стабилитрона (простейший параметрический стабилизатор) и объясните принцип её работы.
6. Почему прямой ток диода сильно зависит от напряжения, а обратный ток – почти не зависит?
7. Какой из  $h$ -параметров транзистора характеризует величину выходной проводимости?
8. Объясните принцип действия выпрямительного диода.
9. Какой вид имеют вольт-амперные характеристики диода и стабилитрона?
10. Какой из  $h$ -параметров транзистора характеризует величину коэффициента передачи тока?

$$I_a = I_{\text{диф}} = I_{\text{диф}\cdot 0} \quad , (2a)$$

$$\text{или } I_a = I_{\text{диф}} = I_{\text{диф}\cdot 0} \quad , (2б)$$

где  $q$  – заряд электрона;

$U_a$  – напряжение источника, подключенного к диоду в прямом направлении;

$k$  – постоянная Больцмана;

$T$  – абсолютная температура;

$\varphi_T =$  – тепловой потенциал (при  $T = 300\text{K}$   $\varphi_T \approx 0,025\text{В}$ );

$I_{\text{диф}\cdot 0}$  – ток основных носителей заряда, протекающих через p-n-переход, находящийся в равновесном состоянии.

При обратном включении (минус к p-области, а плюс - к n-области) электрическое поле, создаваемое внешним напряжением -  $U_b$ , совпадает с полем p-n-перехода. Поля складываются, и потенциальный барьер между p- и n-областями увеличивается до значения  $\varphi_0 + U_b$  (см. рис. 1, б). Диффузионный ток, создаваемый основными носителями заряда, стремится к нулю, так как основные носители заряда не способны преодолеть увеличивающийся потенциальный барьер. Дрейфовый же ток, обусловленный концентрациями неосновных носителей заряда по обе стороны перехода, можно считать неизменным. Однако теперь он будет превышать диффузионный ток. Через диод будет протекать ток в обратном направлении

$$I = I_b = -I_{\text{др}} \quad (3)$$

Свойства электронно-дырочного перехода, (а, следовательно, и диода) наглядно иллюстрируются его вольт-амперной характеристикой, показывающей зависимость тока через диод от величины и полярности приложенного напряжения (рисунок 2.2). Аналитическим выражением полной вольт-амперной характеристик диода является формула

$$I = I_0 \quad , (4)$$

где  $I_0$  - тепловой ток (или обратный ток насыщения  $I_0 = I_s = s \cdot I_{\text{др}}$ ), создаваемый неосновными носителями заряда.

Анализ выражения (4) показывает, что при  $U = 0$  ток через диод также равен нулю. При  $U = U_a, > 0$  единицей в формуле (4) можно пренебречь и зависимость  $I_a(U_a)$  будет иметь экспоненциальный характер. В случае обратного напряжения ( $U = U_b < 0$ ) можно не

учитывать достаточно малую величину и тогда ток  $I = -I_b$  (или  $-I_s$ ).

Увеличение обратного напряжения выше допустимого для данного диода значения может вызвать пробой p-n-перехода.

Обратный ток при этом резко возрастает. Различают два вида пробоя: электрический (обратимый) и тепловой (необратимый). Для электрического пробоя характерна обратимость, заключающаяся в том, что первоначальные свойства p-n-перехода полностью восстанавливаются, если снизить напряжение на диоде. Однако при недостаточном отводе тепла, вызванного относительно большим обратным током, p-n-переход разогревается. В результате этого усиливается процесс генерации электронно-дырочных пар, что приводит к дальнейшему увеличению тока и температуры и в итоге к необратимому разрушению p-n-перехода. Такой пробой называют тепловым, он может наступить как следствие электрического пробоя.

Полупроводниковые стабилитроны, называемые иногда опорными диодами, предназначены для стабилизации напряжений. Их работа основана на использовании явления электрического пробоя p-n-перехода при включении диода в обратном направлении. Вольт-амперная характеристика полупроводникового стабилитрона показана на рисунке 2, а. Участок 1-2 является рабочим участком вольт-амперной характеристики. Главным параметром прибора является напряжение стабилизации, равное напряжению пробоя  $U_{\text{ст}} = U_{\text{пр}}$ . Напряжение стабилизации современных стабилитронов лежит в пределах 1 - 180 В и зависит от толщины запирающего слоя p-n-перехода.

К параметрам стабилитрона также относятся минимальный и максимальный токи стабилизации. Точка 1 на рис. 2, б) соответствует минимальному току стабилитрона  $I_{\text{ст}\cdot \text{min}}$  при котором наступает электрический пробой ( $I_{\text{ст}\cdot \text{min}}$  - доли-десятки мА). Точке 2 на характеристике соответствует максимальный ток стабилитрона  $I_{\text{ст}\cdot \text{max}}$  достижение которого еще не грозит тепловым пробоем p-n-перехода ( $I_{\text{ст}\cdot \text{max}}$ , изменяется в пределах от нескольких мА до нескольких А).