

## ИЗУЧЕНИЕ ВЫПРЯМЛЯЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНОГО ПЕРЕХОДА

### 1. Цель работы

Целью работы является изучение физики явлений, происходящих на *p-n*-переходах - основных элементарных структурах современной электронной техники; исследуются вольтамперная характеристика *p-n*-перехода и его выпрямляющее действие.

### 2. Краткая теория

Электронно-дырочный переход создают внутри собственного полупроводника путем введения в одну его часть акцепторной, в другую - донорной примесей. При этом одна область полупроводника приобретает дырочную проводимость (*p*-типа), другая - электронную (*n*-типа). Электронно-дырочный *p-n*-переход образуется на границе областей полупроводника с различным типом проводимости и представляет собой достаточно тонкий, толщиной 1-10 мкм, слой кристалла, в котором осуществляется смена типа проводимости. В технике *p-n*-переход получают разными методами: диффузией примеси в полупроводник, электролитическим или иным способом нанесения металла на поверхность полупроводника, сплавлением в полупроводник вещества, содержащего донорные или акцепторные примеси, при выращивании полупроводника из расплава или газовой фазы.

Для рассмотрения процессов, ведущих к образованию *p-n*-перехода, представим себе, что создание идеального электрического контакта между кристаллами с различным типом проводимости возможно путем простого их соприкосновения. Если между кристаллами с проводимостями *n*- и *p*-типа нет контакта (рис. 1) и носители не могут переходить из одного кристалла в другой, то уровень Ферми  $E_f$  и уровни примесей  $E_d$  ( $E_a$ ) в них расположены на разной высоте: в полупроводнике *n*-типа - ближе к зоне проводимости, а в полупроводнике *p*-типа - ближе к валентной зоне.

Оба кристалла электрически нейтральны в любом физически малом участке своего объема. Носители заряда в них возбуждаются тепловым движением. В кристалле *n*-типа основными носителями являются электроны, забрасываемые в зону проводимости с донорного уровня  $E_d$ ; неосновными - дырки, возникающие при переходе электрона из валентной

в зону проводимости. В кристалле *p*-типа основные носители - дырки, возникающие в валентной зоне при переходе электронов из этой зоны на акцепторные уровни  $E_a$ ; неосновные - электроны в зоне проводимости, возникающие при переходах из валентной зоны (см. рис. 1).

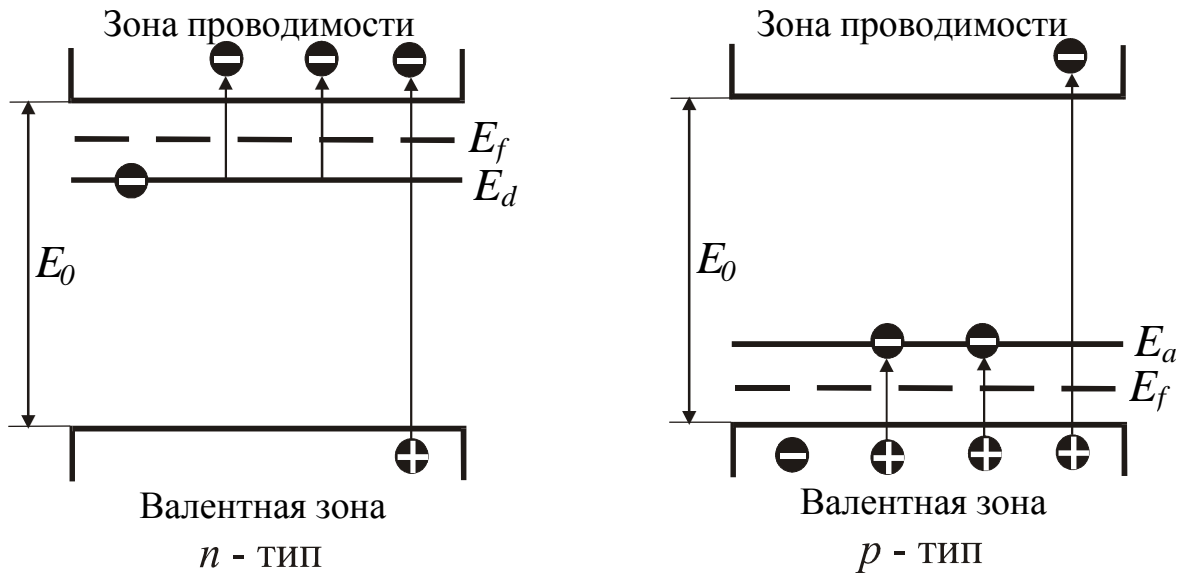


Рис. 1. Энергетическая диаграмма электронного и дырочного полупроводников

Концентрация основных носителей пропорциональна  $\exp\left(\frac{\Delta E_d}{2kT}\right)$  - для электронов,  $\exp\left(\frac{\Delta E_a}{2kT}\right)$  - для дырок, а концентрация неосновных носителей пропорциональна  $\exp\left(\frac{E_0}{2kT}\right)$ , где  $E_a$  и  $E_d$  - энергии ионизации примесных атомов,  $E_0$  - ширина запрещенной зоны,  $k$  - постоянная Больцмана,  $T$  - абсолютная температура.

Поскольку  $\Delta E_d, (\Delta E_a) \ll E_0$ , то концентрация неосновных носителей гораздо меньше (почти в  $10^7$  раз) концентрации основных.

Если между кристаллами создан электрический контакт и свободные носители заряда получают возможность перехода из одного кристалла в другой, то кристаллы образуют единую термодинамическую систему и уровни Ферми устанавливаются на одинаковой высоте. При этом энергетические зоны в обоих кристаллах смещаются (меняется потенциальная энергия носителей) относительно друг друга (рис. 2), и

в области контакта образуется потенциальный барьер, высота которого

$$\varphi = q_e U_k, \quad (1)$$

где  $q_e$  - заряд электрона;  $U_k$  - контактная разность потенциалов.

*Потенциальный барьер* - это превышение дна зоны проводимости  $p$ -полупроводника по сравнению с таковой в  $n$ -полупроводнике.

Возникновение контактной разности потенциалов  $U_k$  контактного поля  $E_k$  и образование потенциального барьера  $\varphi$  происходит в результате следующих процессов: при создании контакта между кристаллами через него устремляются диффузионные потоки свободных электронов и дырок, в кристалле  $p$ -типа концентрация дырок значительно больше, чем в кристалле  $n$ -типа, поэтому из первого во второй будут переходить преимущественно дырки. По той же причине из кристалла  $n$ -типа в кристалл  $p$ -типа будут преимущественно переходить электроны.

Электроны, перешедшие из кристалла  $n$ -типа в кристалл  $p$ -типа, рекомбинируют с дырками. Рекомбинация в простейшем случае представляет столкновение электрона с дыркой, в результате чего носители заряда исчезают. Отрицательный заряд ионов акцепторной примеси в этом слое не компенсируется положительным зарядом дырок, и весь слой заряжается отрицательно. В кристалле  $n$ -типа при рекомбинации электронов с пришедшими сюда из кристалла  $p$ -типа дырками приконтактный слой заряжается положительно, так как положительный заряд ионов донорной примеси не компенсируется отрицательным зарядом свободных электронов.

В области контакта создается двойной электрический слой

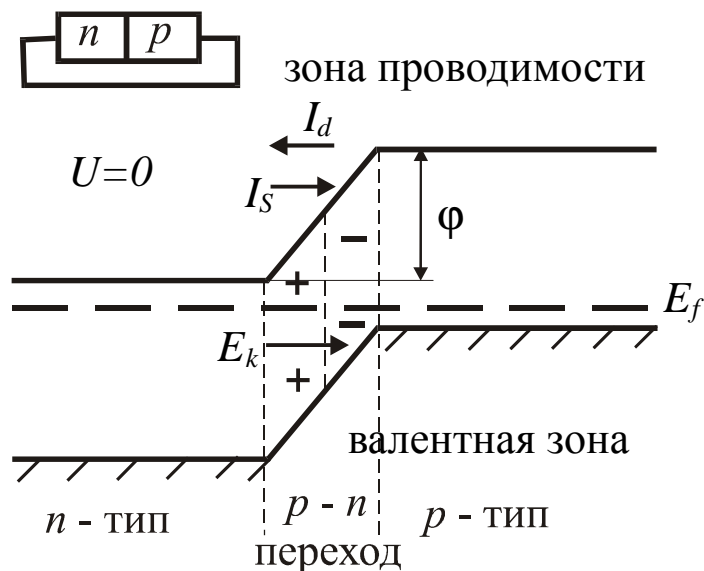


Рис. 2. Энергетическая диаграмма  $p$ - $n$ -перехода в отсутствие внешних напряжений

объемных зарядов и контактное электрическое поле, напряженность которого направлена от кристалла *n*-типа к кристаллу *p*-типа. Приконтактная область обладает большим электрическим сопротивлением, так как концентрация свободных носителей заряда в ней очень мала. Этот приконтактный объем и является областью *p-n*-перехода.

Электрическое поле, возникающее в области *p-n*-перехода, препятствует дальнейшему движению основных носителей заряда через контакт. Неосновные носители, наоборот, контактным полем стимулируются к переходу через контакт.

В условиях равновесия через контакт переходят только те основные носители, энергия которых больше высоты потенциального барьера. Их концентрации

$$n_1 = n_0 \exp\left(-\frac{\Phi}{kT}\right), \quad p_1 = p_0 \exp\left(-\frac{\Phi}{kT}\right), \quad (2)$$

где  $n_0$  и  $p_0$  – концентрации основных носителей в кристаллах *n*- и *p*-типов.

Поток основных носителей через *p-n*-переход представляет собой диффузионный ток  $I_d$ , направленный из *p*- в *n*-полупроводник. Наряду с основными носителями через *p-n*-переход в противоположном направлении движутся неосновные носители. Их поток создает дрейфовый ток  $I_s$ , направленный из *n*- в *p*-полупроводник. В условиях равновесия токи  $I_d$  и  $I_s$  по величине равны, результирующий ток через переход равен нулю.

Внешнее напряжение, приложенное к области *p-n*-перехода, нарушает равновесие, поэтому результирующий ток через переход становится отличным от нуля. Внешнее напряжение  $U$ , приложенное к *p-n*-переходу, считается отрицательным или обратным, если потенциал кристалла *p*-типа меньше потенциала кристалла *n*-типа. При этом внешнее электрическое поле совпадает с контактным и увеличивает высоту потенциального барьера (рис. 3). Внешнее напряжение  $U$  считается положительным или прямым, если потенциал кристалла *p*-типа больше потенциала кристалла *n*-типа. В этом случае внешнее электрическое поле в *p-n*-переходе направлено против контактного и уменьшает как его напряженность, так и высоту потенциального барьера.

Когда к области *p-n*-перехода приложено обратное напряжение ( $U < 0$ ), концентрации основных носителей, способных

проникнуть через **p-n**-переход, станут равны

$$n_1^o = n_0 \exp\left(-\frac{\Phi + q_e U}{kT}\right), \quad p_1^o = p_0 \exp\left(-\frac{\Phi + q_e U}{kT}\right). \quad (3)$$

Диффузионный ток  $I_d$  уменьшится, а дрейфовый  $I_S$  останется практически неизменным. Результирующий ток  $I = I_d - I_S$  будет отличен от нуля и направлен от **n**- к **p**-полупроводнику. Он называется обратным током. При увеличении обратного напряжения сила тока  $I$  стремится к  $I_S$ , так как  $I_d \rightarrow 0$ .

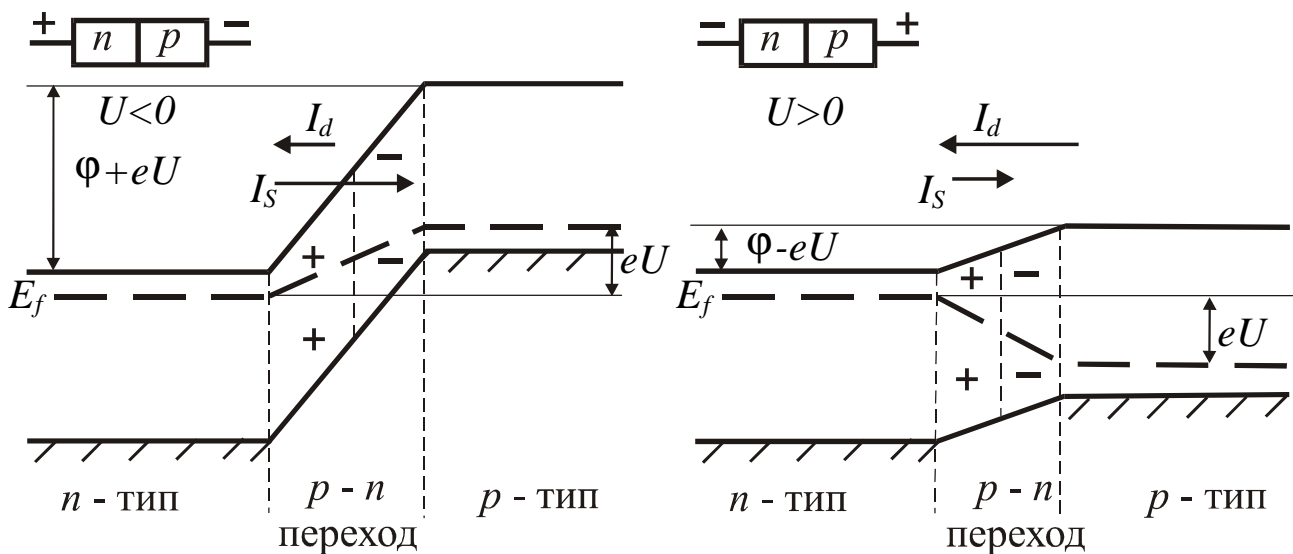


Рис. 3. Энергетическая диаграмма **p-n**-перехода при наложении внешних напряжений

Значение тока  $I_S$  пропорционально концентрации неосновных носителей, которая определяется множителем  $\exp\left(-\frac{E_0}{2kT}\right)$ ,

$$I_S = C \cdot \exp\left(-\frac{E_0}{2kT}\right), \quad (4)$$

где  $C$  - множитель, слабо зависящий от температуры.

Величины  $I_S$  обычно малы и при комнатных температурах составляют  $10^{-6}$  -  $10^{-5}$  А для германиевых и  $10^{-8}$  -  $10^{-7}$  А для кремниевых полупроводников с площадью области **p-n**-перехода в несколько квадратных миллиметров.

Когда к **p-n**-переходу приложено прямое напряжение ( $U > 0$ ),

концентрации основных носителей, проходящих через **p-n**-переход, возрастают и становятся соответственно

$$n_1^n = n_0 \exp\left(-\frac{\Phi - q_e U}{kT}\right), \quad p_1^n = p_0 \exp\left(-\frac{\Phi - q_e U}{kT}\right). \quad (5)$$

Диффузионный ток резко увеличивается, а дрейфовый по-прежнему остается практически неизменным. Результирующий ток через **p-n**-переход  $I = I_d - I_S$  оказывается весьма значительным и направлен от **p**- к **n**-полупроводнику. С ростом приложенного напряжения он увеличивается экспоненциально.

Зависимость тока через **p-n**-переход от приложенного к нему напряжения называется его *вольтамперной характеристикой*. Графически она представлена для разных температур на рис. 4, а уравнение ее имеет вид:

$$I = I_S \left[ \exp\left(\frac{q_e U}{kT}\right) - 1 \right]. \quad (6)$$

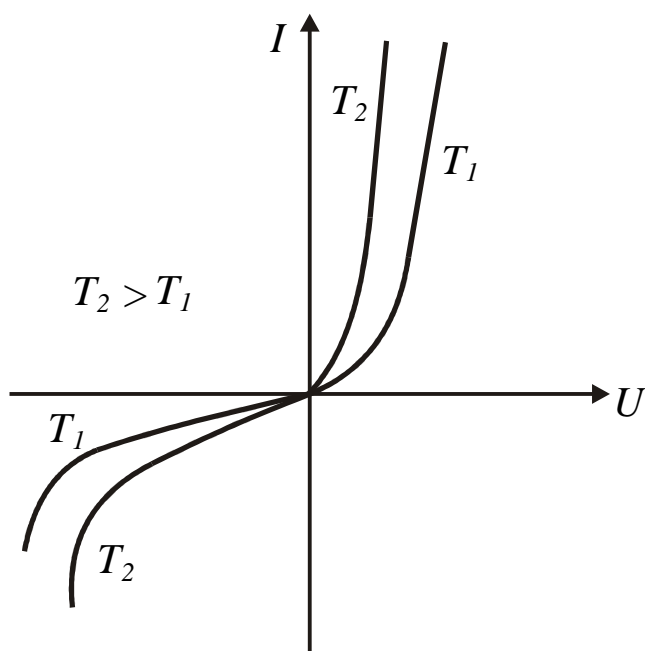


Рис. 4. Вольтамперная характеристика **p-n**-перехода

Вольтамперная характеристика **p-n**-перехода нелинейна, следовательно он обладает свойством односторонней проводимости: имеет очень большое сопротивление при обратном напряжении и очень малое при прямом напряжении. При повышении температуры прямой ток через переход незначительно возрастает, так как концентрации основных носителей относительно слабо зависят от температуры. Обратный ток с повышением температуры растет быстро, так как он определяется концентрацией неосновных носителей, сильно завися-

щей от температуры согласно соотношению (4).

Нелинейный вид вольтамперной характеристики **p-n**-перехода позволяет использовать его для выпрямления переменного тока. Устройство, выполняющее такую роль, называют *выпрямительным диодом*. В предпробойной области диода небольшое изменение обратного

напряжения может вызвать значительное изменение обратного тока. Этот эффект используют для стабилизации напряжения, а диоды, предназначенные для работы в таком режиме, называют *стабилитронами*. На основе способности *p-n*-перехода изменять электрическую емкость от приложенного напряжения, созданы приборы, называемые *варикапами*. Существует еще множество приборов, использующих разнообразные свойства *p-n*-переходов. Зависимость сопротивления перехода от температуры используется при создании термисторов. Возникновение э.д.с. при освещении *p-n*-перехода и пропускании через него тока используется при создании различных фотоэлектрических приборов – фотодиодов, светодиодов, полупроводниковых лазеров. На основе структур *p-n*-переходов создаются транзисторы, интегральные микросхемы, которые используются во многих современных бытовых и производственных приборах, компьютерах и других устройствах.

### 3. Выполнение работы

**3.1. Необходимые приборы:** стенд для снятия вольтамперной характеристики диода, источник питания на 220 В.

На рис. 5 и 6 приведены электрическая и рабочая схемы.

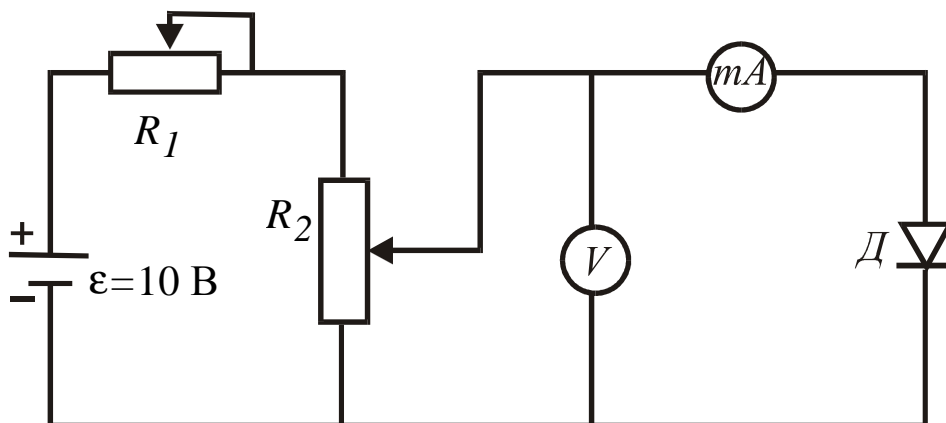


Рис. 5. Электрическая схема для снятия вольтамперной характеристики диода:

$R_1, R_2$ - потенциометры для плавной и грубой регулировки напряжения;  
 $V$  - вольтметр постоянного тока с пределами I, 5 и 10 В;  
 $mA$  - миллиамперметр постоянного тока с пределами 3, 30, 90 мА  
или микроамперметр на 100 и 500 мкА; Д - диод

Стенд состоит из блока питания, расположенного внизу, и

измерительного блока. На лицевую панель блока питания выведены переключатель режима работы (положения 0, 1, 2, 3, 4), тумблер "сеть", гнезда источников постоянного и переменного напряжений, ручки потенциометров "грубо" и "плавно" регулировки постоянного напряжения 10 и 1 В. Измерительный блок находится вверху и состоит из многопредельных вольтметра, миллиамперметра, микроамперметра, контактного поля, гнезд включения диода, триода, измерительных приборов. Установка нужных пределов измерения приборов осуществляется переключателями. Контактное поле предназначено для сборки электрической схемы. Оно состоит из отдельных гнезд, часть которых электрически соединена между собой. Все гнезда пронумерованы и могут быть подключены к схеме специальными проводниками, оканчивающимися штекерами.

### **3.2. Порядок выполнения работы**

**ВНИМАНИЕ!** Все переключения на стенде делаются при выключенном тумблере "сеть". Включают этот тумблер под наблюдением преподавателя.

На стенде предусмотрено выполнение работы в двух режимах.

В первом режиме используется контактное поле, когда гнезда контактного поля соединяют с помощью специальных проводников со штекерами, при этом переключатель режимов устанавливают в положение 0.

Второй режим использует готовую собранную схему, специальные проводники не подключаются, необходимо лишь установить в гнезда диод и переключатель режимов в соответствующее положение 1 или 2. Снятие вольтамперной характеристики (зависимость тока через диод от приложенного напряжения) в прямом направлении - положение 1, в обратном направлении - положение 2.

К гнездам Д подключают диод Д-226 в прямом направлении (оно указано на лицевой панели стенда).

Устанавливают потенциометры регулировок "грубо" и "плавно" в левое крайнее положение.

Режим работы выбирает преподаватель.

В первом режиме переключатель режима устанавливают в положение 0. Собирают схему согласно рис. 6, соединяя проводниками выходные гнезда с соответствующими по знаку входными, гнезда 5 и 6 закорачивают проводником. В соответствии с полярностью подключают вольтметр к гнездам 1 и 8, а миллиамперметр - к гнездам 2 и 3. Собранную схему проверяет преподаватель и включает тумблер "сеть".

Устанавливают пределы измерений на вольтметре 1 В, миллиампер-



метре 90 мА. С помощью потенциометров для регулировки напряжения "грубо" и "плавно" снимают зависимость тока через диод от приложенного напряжения в прямом направлении, не превышая тока в 90 мА.

Отключив напряжение, переключают диод на обратное направление, развернув его на  $180^\circ$ , на вольтметре устанавливают предел измерений 10 В, вместо миллиамперметра включают микроамперметр с пределом 100 мкА и снимают зависимость тока от напряжения в обратном направлении. Данные измерений записывают в табл. 1.

Во втором режиме переключатель режима переводят в положение 1. К гнездам Д подключают диод Д-226 в прямом направлении. Устанавливают пределы измерений на вольтметре 1 В, миллиамперметре 90 мА. С помощью потенциометров для регулировки напряжения "грубо" и "плавно" снимают зависимость тока через диод от приложенного напряжения в прямом направлении, не превышая тока в 90 мА.

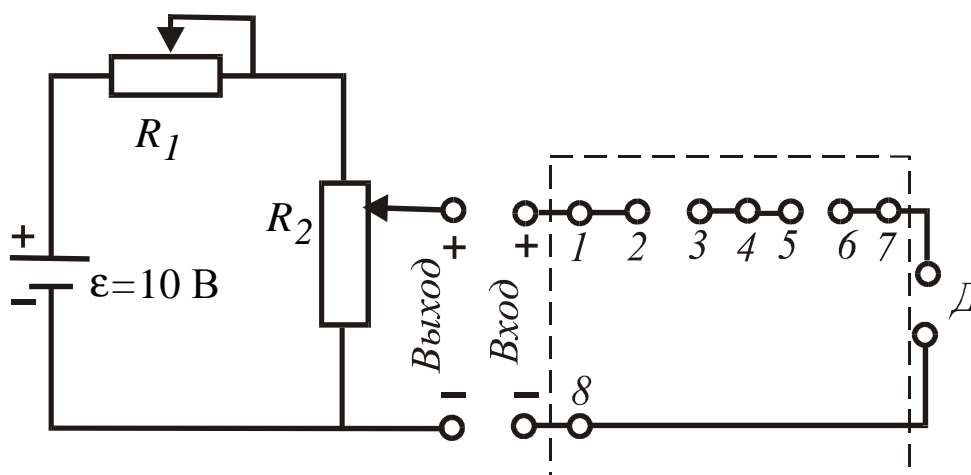


Рис. 6. Рабочая схема:

- выход - выходные гнезда блока питания 10 В;
- вход - входные гнезда измерительного блока 10 В;
- Д - гнезда для включения диода;
- 1, 2 ... 7, 8 - гнезда контактного поля, выделенного штриховым прямоугольником

Отключив напряжение, устанавливают переключатель режима работы в положение 2. Меняют направление тока через диод на обратное, развернув его на  $180^\circ$ , на вольтметре устанавливают предел измерений 10 В, включают микроамперметр с пределом 100 мкА и снимают зависимость тока от напряжения в обратном направлении. Данные измерений записывают в табл. 1. По окончании работы выключают напряжение и вынимают вилку из розетки.

## Результаты измерений

$U$ , В	0,0	+0,1	+0,2	+0,3	+0,4	+0,5	$U$ , В	-1,0	-2,0	-3,0	-4,0	-5,0	-6,0	-7,0	-8,0	-9,0
$I$ , мА							$I$ , мкА									

По данным табл. 1 строят график вольтамперной характеристики  $p-n$ -перехода (см. рис. 4). Для обратной ветви характеристики используют другой масштаб.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что представляет собой  $p-n$ -переход?
2. Нарисуйте и поясните зонные схемы  $p-n$ -перехода в отсутствие приложенного напряжения, при прямом и обратном напряжениях.
3. Какое направление тока называют прямым и обратным?
4. Назовите какие носители заряда в полупроводниках являются основными и неосновными, как они возникают?
5. Каковы аналитическое выражение и графическая вольтамперная характеристика  $p-n$ -перехода?
6. Поясните зависимости прямого и обратного токов от температуры.
7. Начертите электрическую схему.
8. Почему  $p-n$ -переход обладает свойством односторонней проводимости (выпрямляющими свойствами)?
9. Какие приборы можно изготовить на основе  $p-n$ -перехода?

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Епифанов, Г. И.* Физика твердого тела / Г. И. Епифанов.- М.: Высш. школа, 1977.-288 с.
- Зисман, Г. А., Тодес, О. М.* Курс общей физики / Г. А. Зисман, О. М. Тодес.- М.: Наука, 1965.
- Савельев, И. В.* Курс общей физики. Т. 3. / И. В. Савельев.- М.: Наука, 1989.- 304 с.
- Трофимова, Т. И.* Курс физики / Т. И. Трофимова.- М.: Высш. школа, 1994.-541с.
- Ивлиев, А. Д.* Физика: учебное пособие / А. Д. Ивлиев.- Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005.- 255с.