

Кафедра экспериментальной физики СПбПУ

Электронно-дырочный переход

Методические указания к лабораторному
практикуму по общей физике

СПбПУ
2014

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.10

ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЙ ПЕРЕХОД

ЦЕЛИ РАБОТЫ

1. Измерить вольт-амперные характеристики (ВАХ) кремниевого и германиевого полупроводниковых диодов
2. Определить параметры потенциального барьера в области $p-n$ перехода

ВВЕДЕНИЕ

В совершенно чистых полупроводниках, называемых собственными, концентрация носителей заряда (свободных электронов и дырок) определяется только температурой и собственной, присущей данному полупроводнику, энергией связи E_g – так называемой шириной запрещенной зоны. При этом равновесные концентрации электронов n и дырок p одинаковы.

Введение примесей (легирование) приводит к изменению концентрации носителей обоих типов. Донорная примесь увеличивает концентрацию электронов (они становятся основными носителями) и уменьшает концентрацию дырок (естественно, их называют неосновными носителями). Полупроводник, в который введена донорная примесь, называют электронным или полупроводником n – типа. Несмотря на избыток отрицательных носителей (обычно $n \gg p$), полупроводник остается электрически нейтральным, так как донорные атомы, отдав электроны, превращаются в положительно заряженные ионы, неподвижно закрепленные в кристаллической решетке.

В полупроводнике с акцепторной примесью основными носителями являются дырки, а электроны – неосновными (обычно $p \gg n$). Такой полупроводник называют дырочным или полупроводником p – типа. Естественно, что и в этом случае избыточный объемный заряд в

полупроводнике отсутствует, ибо акцепторные атомы, захватив электрон, превращаются в неподвижные отрицательные ионы.

Если кристалл полупроводника легирован так, что одна часть его имеет проводимость p – типа, а другая – проводимость n – типа, то на границе между этими частями образуется слой с особыми свойствами, который называют $p - n$ – переходом или, иначе говоря, электронно-дырочным переходом.

Самая важная особенность $p - n$ – перехода состоит в том, что на границе p – и n – областей возникает потенциальный барьер. Высота и ширина этого барьера являются главными параметрами $p - n$ – перехода, определяющими его свойства. Измерение этих параметров входит в задачу данной работы. Метод исследования, как обычно при изучении потенциальных барьеров, состоит в измерении вольт-амперной характеристики.

Рассмотрим сначала $p - n$ – переход в отсутствие внешнего поля (рис. 1а). Так как концентрации носителей каждого типа неодинаковы в p – и n – областях, то в переходном слое возникают градиенты концентраций и, следовательно, диффузионные потоки носителей. Электроны будут диффундировать из p – области, где их много, в n – область, в которой будет происходить их рекомбинация с дырками. При этом в p – области вблизи границы раздела появится отрицательный объемный заряд. Аналогично в n – области, также вблизи границы, появится избыточный положительный объемный заряд неподвижных доноров.

К такому же эффекту приведет и диффузия дырок из p – области в n – область и их последующая рекомбинация с электронами проводимости. Действительно, прилегающая к границе область n – типа будет заряжаться положительно, а в приграничной области p – типа останется некомпенсированным отрицательный заряд неподвижных акцепторов.

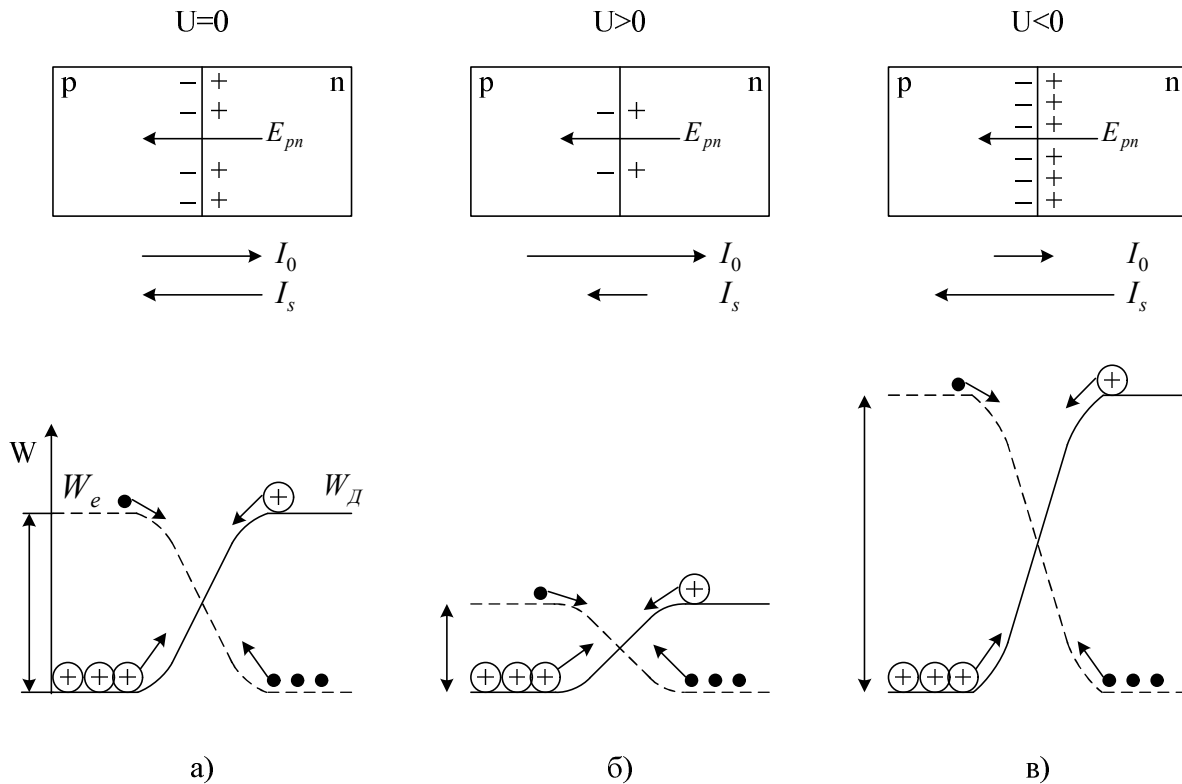


Рис 1. Потенциальный барьер на границе p-n-перехода

Итак, вблизи границы $p-n$ – перехода образуется двойной заряженный слой. Электрическое поле, созданное этим слоем, направлено по нормали к границе от n – к p – области. Легко убедиться, что это поле препятствует процессу диффузии основных носителей и, таким образом, создает для них потенциальный барьер (см. энергетическую диаграмму на рис. 1а, где энергия электронов и дырок отсчитывается от их состояния соответственно в n – и p – областях). Поэтому, например, из n – в p – область могут перейти только те электроны, энергия которых превышает высоту потенциального барьера Φ_{pn} . Концентрация электронов, обладающих энергией, достаточной для преодоления барьера, определяется распределением Больцмана:

$$n = n_0 \exp\left(-\Phi_{pn}/kT\right) \quad (1.1)$$

где n_0 - концентрация электронов в n -области. Прошедшие за барьер электроны создают электронную компоненту диффузионного тока I_n . Точно так же дырки, преодолевшие барьер, образуют дырочную компоненту диффузионного тока I_p . Обе компоненты I_p и I_n направлены от p - к n - области и суммарный ток основных носителей равен:

$$I_0 = I_n + I_p \sim \exp\left(-\Phi_{pn}/kT\right) \quad (1.2)$$

Обратимся снова к рис.1. Мы видим, что поле вблизи границы способствует движению неосновных носителей, которые "скатываются" с потенциальной "горки". Поэтому все неосновные носители, генерируемые в приконтактной области, движутся через $p-n$ -переход и образуют ток, направленный от n к p . Сила этого тока практически не зависит от разности потенциалов между n - и p - полупроводниками и определяется только числом неосновных носителей, образующихся в приконтактной области в единицу времени. Поэтому его называют током насыщения и обозначают $I_s = (I_{ns} + I_{ps})$. В состоянии равновесия устанавливается такая высота потенциального барьера, при которой полный ток равен нулю:

$$I = I_0 - I_s = 0$$

Пусть теперь к диоду, содержащему $p-n$ - переход, приложено напряжение или, как часто говорят, смещение U от внешнего источника. Если анод источника («+») соединен с p - областью диода, а катод источника («-») с n - областью, то говорят о прямом смещении ($U > 0$), в противоположном случае - об обратном смещении ($U < 0$).

В электрической цепи с внешним источником диод содержит три соединенных последовательно области: p - область, объемный заряд (барьер), n - область. Так как потенциальный барьер препятствует

движению основных носителей, и притом их средняя тепловая энергия $kT \ll \Phi_{pn}$, область объемного заряда очень сильно, практически полностью обеднена свободными носителями тока – электронами и дырками. Следовательно, данная область обладает наибольшим электрическим сопротивлением и практически все приложенное напряжение U падает в области объемного заряда.

Рассмотрим случай прямого смещения (рис. 1б). Легко видеть, что поле от внешнего источника направлено навстречу полю, создаваемому объемным зарядом. Следовательно, напряжение U вычитается из барьерной разности потенциалов $U_{pn} = \Phi_{pn}/e$, существовавшей до приложения внешнего смещения. В результате разность потенциалов на барьере становится равной $(U_{pn} - U)$, а высота энергетического барьера

$$e(U_{pn} - U) = \Phi_{pn} - eU \quad (1.3)$$

Уменьшение высоты энергетического барьера приводит к увеличению концентрации основных носителей, преодолевающих барьер. Так, концентрация электронов за барьером теперь равна:

$$n_1 = n_0 \exp\left[-\left(-\Phi_{pn} - eU/kT\right)\right] \quad (1.4)$$

т.е. увеличилась по сравнению со значением (1.1) в $n_1/n = \exp(eU/kT)$ раз. Во столько же раз увеличится и создаваемый ими электронный диффузионный ток:

$$I_{n1} = \exp(eU/kT) \quad (1.5)$$

На ток неосновных носителей (ток насыщения) прямое смещение (так же как и обратное) влияния не оказывает. Ток электронов из p – области в n – область по-прежнему равен I_{ns} и течет навстречу диффузионному

току. Таким образом, электронная компонента прямого тока I_n будет равна:

$$I_n = I_{n1} - I_{ns} = I_{ns} \left[\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right] \quad (1.6)$$

Аналогично, дырочная компонента прямого тока:

$$I_p = I_{p1} - I_{ps} = I_{ps} \left[\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right] \quad (1.7)$$

Полный ток через $p-n$ – переход равен сумме электронной и дырочной компонент:

$$I = I_n - I_p = \left(I_{ns} + I_{ps} \right) \left[\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right]$$

и окончательно:

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right] \quad (1.8)$$

Как видно на рис. 1в, обратное смещение приводит к увеличению высоты потенциального барьера. Так как при этом принято предложенное напряжение U считать отрицательным, то соотношение (1.3) остается в силе, так же как и последующие рассуждения. Поэтому формула (1.8) описывает не только прямую, но и обратную ветви ВАХ диода.

Сделаем важное замечание. Рассуждения, приведшие нас к выводу формулы (1.8), не вызывают возражений, пока напряжение на диоде меньше разности потенциалов U_{pn} , соответствующей начальной высоте потенциального барьера: $U < U_{pn} = \Phi_{pn}/e$. Когда же прямое смещение сравнивается с U_{pn} или превосходит его, наш анализ теряет силу. Прежде всего, отметим, что с уменьшением высоты потенциального барьера через область барьера проходит все большее число носителей, и поэтому сопротивление барьера стремительно (экспоненциально!) уменьшается. В результате все большая часть напряжения падает не на $p-n$ – переходе, а

на сопротивлениях p – и n – областей и внешних по отношению к диоду элементах цепи. Поэтому увеличение прямого смещения до значений $U > U_{pn}$ приводит к сильному уменьшению высоты («спрямлению») барьера и диод приобретает свойства обыкновенного омического сопротивления. Экспоненциальный рост прямого тока на ВАХ становится линейным. Эту особенность ВАХ можно использовать для оценки высоты потенциального барьера.

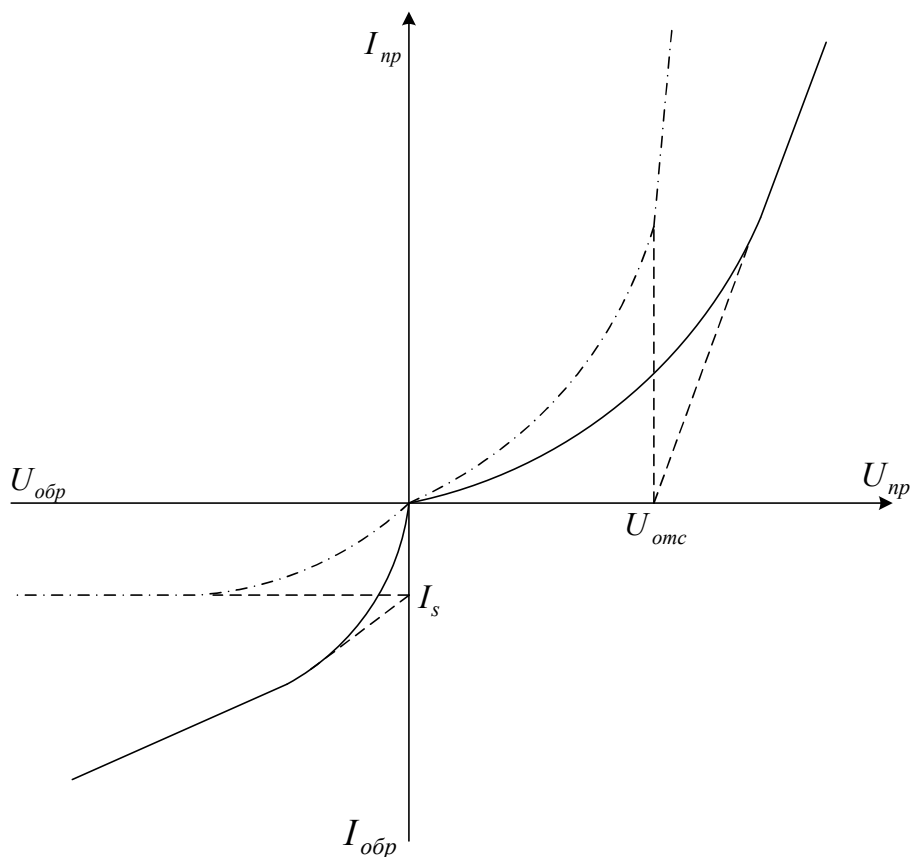


Рис 2. Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода

На рис. 2 изображена вольт-амперная характеристика полупроводникового диода (для большей наглядности на прямой и на обратной ветвях ВАХ выбраны различные масштабы, как для напряжения, так и для тока). Штрихпунктирной линией показана кривая, соответствующая теоретической зависимости (1.8), сплошной линией –

экспериментальная ВАХ. Видно, что прямая ветвь $I_{pn}(U_{pn})$ имеет плавный переход от экспоненциальной зависимости к линейной.

Продолжение линейного участка ВАХ до пересечения с осью U дает значение напряжения отсечки $U_{отс}$, которое в согласии со сказанным выше и рис. 2 можно принять за оценку барьерной разности потенциалов $U_{pn} \approx U_{отс}$. Очевидно, значение U_{pn} совпадает с числовым значением высоты потенциального барьера Φ_{pn} , выраженном в электрон-вольтах.

Обратная ветвь ВАХ также отличается от теоретической $I_{обр} = I_s$ для $|U| \gg kT$. В этой области сопротивление $p-n$ -перехода быстро увеличивается и даже превышает сопротивление изоляции диода. Поэтому возникает ток утечки, который течет не через $p-n$ -переход, а через постоянное сопротивление изоляции. Этой ситуации соответствует линейный участок обратной ветви, пересечение которого с осью тока I дает оценку тока насыщения I_s (см. рис. 2).

Для оценки ширины $p-n$ -перехода можно использовать следующую формулу:

$$d \approx \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0 U_{отс}}{en_d}} \quad (1.9)$$

где n_d – концентрация атомов донорной примеси в полупроводнике n -типа, ε – диэлектрическая проницаемость материала полупроводника. Формулу (1.9) можно получить, считая, что слой объемного заряда имеет значительную толщину только в n -области. Данное предположение о характере пространственного распределения заряда справедливо при концентрации атомов акцепторной примеси значительно превосходящей концентрацию донорной примеси. Положительный заряд n -области может быть определен как:

$$Q = n_d e S d$$

Такой же по модулю отрицательный заряд в p – области сконцентрирован в очень тонком слое. Тогда эффективное расстояние, разделяющее отрицательный и положительный заряды будет равно $d/2$. Используя формулу для емкости плоского конденсатора, получим:

$$Q = C \cdot U$$
$$n_d e S d = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d/2} U ,$$

из чего непосредственно следует соотношение (1.9).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Работа выполняется на установке, предназначенной для выполнения совместных измерений тока диода и напряжения на нем с целью нахождения ВАХ диода.



Рис 3. Общий вид лабораторного стенда

Постоянное напряжение от источника питания G1 поступает на делитель, состоящий из резисторов R1 и R2 (рис. 3). С резистора R2

потенциометрически снимаемое напряжение U подается на диод VD . Это напряжение измеряют вольтметром PV . Амперметром PA измеряют ток I диода.

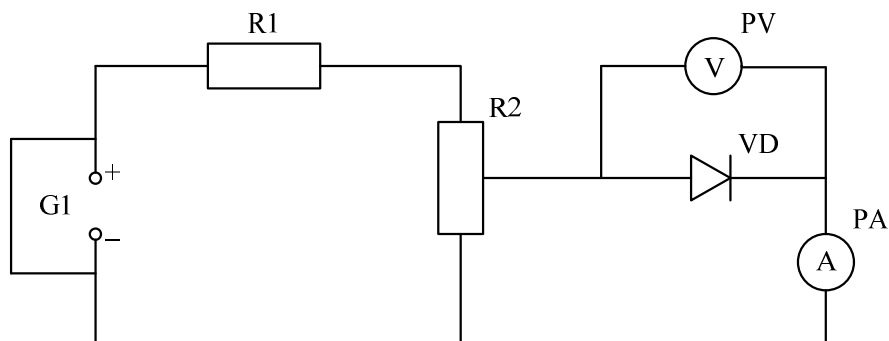


Рис 3. Принципиальная электрическая схема установки

ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Проверьте правильность включения приборов
2. Включите приборы, входящие в установку
3. Переключатель П1 на макетной плате («**направление**») установите в положение «прямое».
4. Выберите переключателем П2 на макетной плате тип исследуемого диода: германиевый (Ge) или кремниевый (Si).
5. Изменяйте падение напряжения на диоде с помощью переменного сопротивления $R2$ (рекомендуемый шаг изменения напряжения на прямой ветви ВАХ – 0,02 В) и записывайте показания вольтметра PV ($U_{пр}$) и миллиамперметра PA ($I_{пр}$) в Таблицу 1.1 (около 15÷20 точек).
6. Переключатель П2 на макетной плате («**направление**») установите в положение «обратное».
7. Проведите измерения аналогично п.5
8. Переключателем П1 выберите иной тип диода и произведите измерения его ВАХ в соответствии с пп. 5-7
9. Полностью заполненную Таблицу 1.1 приложите к рабочему протоколу
10. Предъявите результаты измерений преподавателю. После завершения работы не забудьте обесточить лабораторную установку.

потенциального барьера Φ_{pn} и сравните их с ширинами запрещенных зон соответствующих материалов (для германия $E_g = 0.72$ эВ, для кремния $E_g = 1.1$ эВ).

3. Найдите по формуле (1.9) величины ширины $p - n$ – переходов различных диодов, используя значения диэлектрических проницаемостей и концентрации носителей, указанные на стенде.

4. Оцените токи насыщения, продолжив линейные участки обратных ветвей ВАХ до пересечения с осью токов (см. рис. 2).

5. Используя формулу (1.8) и найденные вами значения тока насыщения и высоты потенциального барьера, вычислите теоретическую ВАХ и постройте её на одном графике с экспериментальной; визуально сравните их.

6. Опишите полученные вами результаты в выводах отчета по лабораторной работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Поясните механизм возникновения потенциального барьера на границе $p -$ и $n -$ областей. Как влияет на барьер внешнее электрическое поле?

2. Какие основные допущения приняты при выводе соотношения (1.8)?

3. Как будет изменяться вид ВАХ полупроводникового диода при увеличении температуры?