

РАБОТА 2.10

Электронно-дырочный переход

Цель работы

1. Измерить вольт-амперную характеристику полупроводникового диода
2. По данным п.1 найти высоту и ширину потенциального барьера в области $p-n$ -перехода.

Введение

В совершенно чистых полупроводниках, называемых собственными, концентрация носителей тока (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 концентраций 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 электронейтральным, ибо 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, электронно-дырочным переходом.

Самая важная особенность $p-n$ -перехода состоит в том, что на границе p - и n -областей возникает потенциальный барьер. Высота этого барьера и его

ширина являются главными параметрами $p-n$ -перехода, определяющими его свойства. Измерение этих параметров входит в задачу данной работы. А метод исследования, как обычно при изучении потенциальных барьеров, состоит в снятии вольт-амперной характеристики.

Рассмотрим сначала $p-n$ -переход в отсутствии внешнего поля (рис. 10.1а). Так как концентрации носителей каждого типа неодинаковы в p - и n -областях, то в переходном слое возникают градиенты концентраций и, следовательно, электроны будут диффундировать из n -области, где их много, в p -область. При этом в p -области вблизи границы раздела появится отрицательный объемный заряд, а в n -области также вблизи границы останется нескомпенсированным положительный объемный заряд неподвижных доноров.

К такому же эффекту приведет и диффузия дырок из p - в n -область. Действительно, прилегающая к границе область n -типа будет заряжаться положительно, а в приграничной области p -типа остается нескомпенсированным отрицательный заряд неподвижных акцепторов.

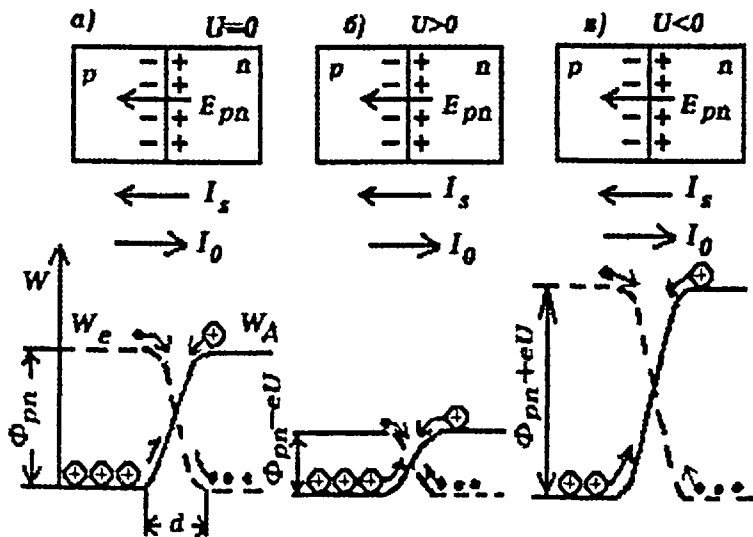


Рис. 10.1. Потенциальный барьер на границе $p-n$ -перехода

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. 10.1а, где энергия электронов W_e и дырок W_d отсчитывается от их состояния соответственно в n - и p -областях), Поэтому, например, из n - в p -область прорываются только те электроны, энергия которых превышает высоту потенциального барьера Φ_{pn} . Как следует из закона распределения Больцмана, их концентрация за барьером:

$$n = n_0 \exp\left(-\frac{\Phi_{pn}}{kT}\right), \quad (10.1)$$

где n_0 -концентрация электронов в n -области. Эти прорвавшиеся через 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_n и I_p направлены от p - к n -области и суммарный ток основных носителей равен:

$$I_0 = I_n + I_p \sim \exp\left(-\frac{\Phi_{pn}}{kT}\right). \quad (10.2)$$

Обратимся снова к рис. 10.1 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 некоторый 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

“плюс” источника присоединен к p -области диода, а “минус” - к n - области, то говорят о прямом смещении ($U > 0$), в противоположном случае - об обратном смещении ($U < 0$).

По отношению к внешнему источнику диод содержит три области, соединенных последовательно: 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. Поэтому, естественно она представляет собой область самого большого сопротивления, и, следовательно, практически все приложенное напряжение U падает на области объемного заряда.

Рассмотрим случай прямого смещения (рис 10.16). Легко видеть, что поле от внешнего источника направлено навстречу полю, создаваемому объемным зарядом. Следовательно, напряжение U вычитается из барьерной разности потенциалов $U_{pn} = \frac{\Phi_{pn}}{e}$, существовавшей до приложения внешнего смещения.

В результате разность потенциалов на барьере становится равной ($U_{pn} - U$), а высота энергетического барьера

$$e(U_{pn} - U) = \Phi_{pn} - eU. \quad (10.3)$$

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

$$n_i = n_0 \exp\left[-\frac{(\Phi_{pn} - eU)}{kT}\right], \quad (10.4)$$

т.е. увеличилась по сравнению с (10.1) в $n_i/n = \exp(eU/kT)$ раз. Во столько же раз увеличится и создаваемый ими электронный диффузионный ток:

$$I_{ni} = I_{ns} \exp\left(\frac{eU}{kT}\right). \quad (10.5)$$

На ток неосновных носителей (ток насыщения) прямое смещение (так же как и обратное) влияние не оказывает. Ток электронов из p -области в n -

область по прежнему равен I_{ns} и течет на встречу диффузионному току. Таким образом, электронная компонента прямого тока I_n будет равна:

$$I_n = I_{nl} - I_{ns} = I_{ns} \left[\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right]. \quad (10.6)$$

Аналогично, дырочная компонента прямого тока:

$$I_p = I_{pl} - I_{ps} = I_{ps} \left[\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right]. \quad (10.7)$$

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

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

и окончательно:

$$I = I_s \cdot \left[\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right]. \quad (10.8)$$

Как видно из рис. 10.1в, обратное смещение приводит к увеличению высоты потенциального барьера. Так как при этом принято приложенное напряжение U считать отрицательным, то соотношение (10.3) остается в силе, так же как и последующие рассуждения. Поэтому формула (10.8) описывает не только прямую, но и обратную ветви ВАХ диода.

Сделаем важное замечание. Рассуждения, приведшие нас к выводу формулы (10.8), не вызывают возражений, пока напряжение на диоде меньше разности потенциалов U_{pn} , соответствующей начальной высоте

потенциального барьера: $U < U_{pn} = \frac{\Phi_{pn}}{e}$. Когда же прямое смещение

сравнивается с U_{pn} или превосходит его, наш анализ теряет силу. Прежде всего отметим, что с уменьшением высоты потенциального барьера в область барьера прорывается все больше 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 токоподводов. Поэтому увеличение прямого смещения до значений $U > U_{pn}$ приводит к сильному уменьшению высоты барьера ("спрямлению" барьера) и диод приобретает свойства обыкновенного омического

сопротивления. Экспоненциальный рост прямого тока на ВАХ сменяется линейным; эту особенность ВАХ можно использовать для оценки высоты потенциального барьера.

На рис. 10.2 показана ВАХ полупроводникового диода с $p-n$ -переходом (масштабы разные для прямой и обратной ветвей ВАХ как для напряжения, так и для тока). Штрих-пунктирной линией показана кривая, соответствующая теоретической зависимости (10.8), сплошной линией - экспериментальная ВАХ. Видно, что прямая ветвь $I_{пр}(U_{пр})$ имеет плавный переход от экспоненциальной к линейной зависимости.

Продолжение линейного участка ВАХ до пересечения с осью U дает значение напряжения отсечки $U_{отс}$, которое в согласии со сказанным выше и рис. 10.2 можно принять за оценку барьерной разности потенциалов $U_{pn} \approx U_{отс}$. Очевидно, числовое значение U_{pn} совпадает с числовым значением высоты потенциального барьера Φ_{pn} , выраженном в электрон-вольтах.

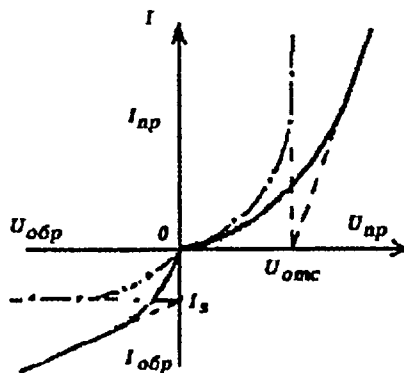


Рис. 10.2. Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода

Как уже отмечалось, вблизи границы $p-n$ -перехода образуется двойной заряженный слой. Электрическое поле, создаваемое этим слоем, представляет собой потенциальный барьер для основных носителей тока. В результате область объемного заряда практически полностью обеднена свободными носителями - электронами и дырками. Поэтому можно считать, что объемный

заряд создают: со стороны p -области - отрицательные ионы акцепторной примеси с концентрацией n_a и объемной плотностью заряда $\rho_a = -en_a$, а со стороны n -области - положительные ионы донорной примеси с концентрацией n_d и объемной плотностью заряда $\rho_d = en_d$. Чтобы найти распределение потенциала в области $p-n$ -перехода, нужно решить уравнение Пуассона (11) (см. во введении раздел 1.2 "Объемный заряд"), используя указанные значения ρ_a и ρ_d .

Хотя это - не слишком сложная задача, во многих случаях ее можно еще упростить. Дело в том, что почти все используемые на практике $p-n$ -структуры являются резко несимметричными. Так называют p^+n -переходы, в которых одна область легирована гораздо сильнее, чем другая. В частности, в данной работе используется диод, в котором значительно сильнее легирована p -область, т.е. $n_a \gg n_d$ (такую структуру называют $p^+ - n$ -переходом).

Так как двойной заряженный слой должен быть в целом нейтральным, то условие $\rho_a \gg \rho_d$ означает, что толщина отрицательно заряженного слоя со стороны p -области должна быть пренебрежимо малой по сравнению с толщиной положительно заряженного слоя со стороны n -области. Следовательно для наших целей достаточно учесть в уравнении Пуассона положительный объемный заряд с плотностью $\rho_d = en_d$:

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = -\frac{en_d}{\epsilon \epsilon_0}, \quad (10.9)$$

Ось x направлена по нормали к заряженному слою от границы его с n -областью. Так как за пределами в целом нейтрального слоя электрическое поле отсутствует, выберем первое граничное условие задачи в следующем виде:

$$\frac{d\varphi}{dx} = 0 \quad (\text{т.е. } E = 0) \quad \text{при } x = 0. \quad (10.10)$$

Потенциал φ будем отсчитывать от потенциала на границе заряженного слоя с p -областью, т.е.

$$\varphi = 0 \quad \text{при } x = d. \quad (10.11)$$

Тогда потенциал при $x = 0$ будет соответствовать барьерной разности потенциалов U_{pn} :

$$\varphi = U_{pn} \quad \text{при } x = 0. \quad (10.12)$$

Условие (10.12) выберем в качестве второго граничного условия закона. Первое интегрирование уравнения (10.9) дает:

$$\frac{d\varphi}{dx} = -\frac{en_d}{\varepsilon \varepsilon_0} x + A,$$

причем из условия (10.10) следует, что $A = 0$.

Второе интегрирование приводит к формуле:

$$\varphi = -\frac{en_d}{2\varepsilon \varepsilon_0} x^2 + B$$

и, находя константу B из условия (10.12), получим распределение потенциала поперек заряженного слоя:

$$\varphi(x) = U_{pn} - \frac{en_d}{2\varepsilon \varepsilon_0} x^2. \quad (10.13)$$

Подстановка в решение (10.13) условия (10.11) приводит к следующей формуле для ширины заряженного слоя:

$$d \approx \left(\frac{2\varepsilon \varepsilon_0 U_{отк}}{en_d} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (10.14)$$

где n_d - концентрация атомов донорной примеси в полупроводнике n -типа, ε - диэлектрическая проницаемость материала полупроводника.

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 которой с осью I дает оценку тока насыщения I_s , (см. рис. 10.2).

Экспериментальная установка

Работу делают на двух установках, одна из которых работает в автоматизированном режиме. Первая установка предназначена для выполнения совместных измерений тока диода и напряжения на нем с целью нахождения ВАХ диода. Вторая установка, работающая в автоматизированном режиме, предназначена для наблюдения ВАХ на экране осциллографа.

Постоянное напряжение от источника питания $G1$ поступает на делитель, состоящий из резисторов $R1$ и $R2$ (рис. 10.3). С резистора $R2$

потенциометрически снимаемое напряжение U подается на диод VD. Это напряжение измеряют вольтметром PV с подключением диапазона от 0 до 1 В при прямом смещении и диапазона от 0 до 10 В при обратном смещении. Амперметром PA в режиме миллиамперметра измеряют ток I диода в прямом направлении, а в режиме микроамперметра - в обратном.

Диод заключен в прозрачную коробочку из оргстекла. В ней также помещена металлическая перемычка, которая играет роль выключателя SA. Эту коробочку можно сочлнить с платой №1 двумя способами, обеспечивая прямое или обратное включение диода. Место включения диода на плате обозначено буквой D.

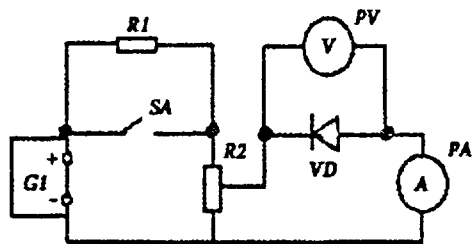


Рис. 10.3. Схема электрической цепи первой установки

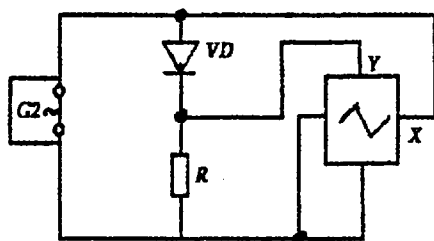


Рис. 10.4. Схема электрической цепи второй установки

В цепи второй установки (рис. 10.4) переменное напряжение от источника G2 приложено к диоду VD и резистору R. Смещение светящегося пятна на экране осциллографа в горизонтальном направлении пропорционально падению напряжения на диоде, а в вертикальном - падению напряжения на резисторе, т.е. току через диод. Совместные перемещения светящегося пятна

приводят к высвечиванию ВАХ диода на экране осциллографа. Так как масштабы для прямой и обратной ветвей ВАХ в этом случае одинаковы, то обратная ветвь практически сливается с горизонтальной осью.

Проведение эксперимента

1. Ознакомьтесь с правилами техники безопасности. Выполните указанные в них рекомендации.

Подготовьте к работе первую установку, подключив диод VD, вольтметр PV и амперметр PA к плате №1. Диод подключите сначала в прямом направлении (штекеры, соединенные металлической перемычкой, вставляются в нижние гнезда). Переведите амперметр PA в режим миллиамперметра, нажав клавишу, обозначенную $I_{пр}$, на панели прибора. Подготовьте вольтметр PV к измерению напряжения в диапазоне от 0 до 1 В.

3. Включите в сеть источник питания G1. Напряжение на диоде задавайте потенциометром R2, рекомендуемый шаг изменения - 0.02 В. Измеряйте совместно напряжение $U_{пр}$ и ток диода $I_{пр}$, повышая напряжение на нем. Результаты записывайте в таблицу 10.1.

Таблица 10.1. Вольт-амперные характеристики исследуемых диодов

Диод/германиевый/				Диод/кремниевый/			
электрическое смещение				электрическое смещение			
прямое		обратное		прямое		обратное	
$U_{пр}$, В	$I_{пр}$, mA	$U_{обр}$, В	$I_{обр}$, мкА	$U_{пр}$, В	$I_{пр}$, mA	$U_{обр}$, В	$I_{обр}$, мкА

1. Поставьте ручку резистора-потенциометра в крайнее положение, соответствующее $U = 0$. Переставьте диод так, чтобы произошло изменение полярности приложенного напряжения (штекеры перемычки вставьте в верхние гнезда). Переведите амперметр PA в режим микроамперметра, нажав клавишу $I_{обр}$, а вольтметр PV - в диапазон от 0 до 10 В.

2. Измеряйте совместное напряжение $U_{обр}$ и ток $I_{обр}$, повышая напряжение на диоде с шагом 1 В до максимального напряжения - 10 В. Результаты вписывайте в табл. 10.1.

3. Снова выведите потенциометр в положение $U = 0$. Подключите к плате второй диод. Сделайте по той же программе (пп. 3-5) измерения для второго диода.

4. Подготовьте к работе вторую установку, подключив диод VD, источник переменного напряжения G2 и резистор R к плате №2. Подключите осциллограф, соединив разъемы "X" и "Y" на панели осциллографа с гнездами на плате, обозначенными так же. Гнездо, обозначенное \perp , подключите к общей заземленной шине осциллографа.

5. Установите напряжение, снимаемое с генератора с частотой 40 Гц, приближенно равное 3 В. Установите осциллограф в режим "РАЗВЕРТКА" с помощью ручки переключателя, поставив ее в положение " \cong ". Подберите размер изображения ВАХ, удобный для наблюдения и копирования. Сделайте копию ВАХ на кальке, приложив ее к экрану осциллографа.

Обработка результатов

1. Постройте графики ВАХ обоих диодов (отдельно). Используйте разные масштабы для напряжений и токов у прямой и обратной ветвей ВАХ. Сравните ВАХ германиевого и кремниевого диодов (визуально)

2. Для германиевого диода найдите напряжение отсечки $U_{отс}$, продолжив линейный участок прямой ветви ВАХ до пересечения с осью U (см. рис. 10.2). Укажите экспериментальное значение высоты потенциального барьера Φ_{pn} и сравните его с шириной запрещенной зоны (для германия $E_g = 0.72$ эВ). Найдите по формуле (10.14) ширину d p - n -перехода, принимая $\epsilon = 12$; значение n_d указано на стенде. Найдите ток насыщения I_s , продолжив линейный участок обратной ветви ВАХ до пересечения с осью I (см. рис. 10.2). Используя формулу (10.8) и найденные вами значения I_s и Φ_{pn} , вычислите теоретическую ВАХ и постройте ее на одном графике с экспериментальной; сравните их (визуально).

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 (10.8)? Объясните причины отклонений реальной ВАХ от теоретической кривой (10.8).