

Московский государственный технический университет
им. Н. Э. Баумана

Изучение свойств **p-n**-переходов

Москва
Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана
2009

Рецензент В. Н. Атаманов.

Изучение свойств **p-n**-переходов : Методические указания к лабораторной работе Ф-6а по курсу общей физики / С.П.Бабенко ; под ред. Л.К.Мартинсона. — М. : изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2009. — 13 с., ил.

В работе приведены основные положения квантовой теории электропроводности полупроводников и выпрямляющих свойств **p-n**-перехода. Описаны экспериментальные методы определения характерных параметров полупроводниковых диодов. Работа предназначена для студентов в качестве методического указания к выполнению лабораторной работы.

Ил. 6. Библиогр. 3 назв.

Бабенко Светлана Петровна

Изучение свойств p-n-переходов

Цель работы — ознакомиться с теорией выпрямляющих свойств полупроводниковых диодов, освоить экспериментальные методы определения некоторых параметров **p-n**-переходов.

Введение

На контакте двух полупроводников с различными типами проводимости — электронной и дырочной, образуется **p-n**-переход. Он является основным элементом огромного класса полупроводниковых приборов. Такое широкое применение связано с многообразием ценных, для практического использования, свойств **p-n**-перехода. Ими можно управлять, выбирая параметры полупроводников и меняя технологию изготовления **p-n**-перехода. Это позволяет наиболее подходящие для выбранной цели свойства делать основными свойствами устройства. В частности, нелинейность активного сопротивления перехода является основным свойством выпрямительных диодов, используемых для преобразования частоты, детектирования, выпрямления и ограничения сигналов.

Нелинейность реактивного емкостного сопротивления **p-n**-перехода — основное свойство диодов, использующихся для генерации гармоник, модуляции и преобразования частоты, усиления СВЧ (сверхвысокочастотных) сигналов (параметрические усилители с малыми шумами), генерации и формирования импульсов.

Некоторые **p-n**-переходы имеют на вольт-амперной характеристике (ВАХ) участок с отрицательным сопротивлением (с ростом напряжения уменьшается ток или с ростом тока уменьшается напряжение). Его возникновение связано с такими физическими явлениями, как туннельный эффект, лавинные и пролетные явления в полупроводниковых структурах, высокочастотные неустойчивости в твердотельной плазме. Устройства с такими **p-n**-переходами используются в качестве усилителей и генераторов сверхвысоких частот.

В данной работе изучаются свойства выпрямительных диодов.

Теоретическая часть

1. Объяснение электрических свойств полупроводников квантовой теорией электропроводности

Решение уравнения Шредингера для электрона, движущегося в потенциальном поле кристаллической решетки, приводит к зонной теории твер-

дых тел. Сущность ее сводится к следующему.

1. Совокупность уровней энергии, разрешенных для электронов в кристалле, образует энергетические зоны. Внутри разрешенных зон уровни располагаются друг относительно друга на расстоянии $\Delta E \approx 10^{-22}$ эВ, значительно меньшем средней энергии теплового движения электронов (0,025 эВ при $T = 300$ К).

2. Между зонами разрешенных уровней располагаются запрещенные зоны. Ширина запрещенных зон много больше средней энергии теплового движения электронов.

3. С ростом энергии ширина разрешенных зон возрастает, а ширина запрещенных зон уменьшается.

4. Электроны заполняют разрешенные зоны, начиная с нижней, в соответствии с принципом Паули и числом возможных состояний в каждой зоне.

5. Последняя (по энергетической шкале) зона, которая при $T = 0$ полностью заполнена электронами, называется валентной. Первая зона, которая при $T = 0$ в полупроводниках совершенно свободна, называется зоной проводимости. Ширина запрещенной зоны между валентной и зоной проводимости $\Delta E = 0,3 \div 7$ эВ.

Электроны полностью заполненных зон на проводимость электрического тока влияния не оказывают. Это объясняется тем, что для участия в токе электрон должен непрерывно менять энергию и переходить с одного энергетического уровня на другой, что в заполненной зоне запрещено принципом Паули.

При $T \neq 0$, под действием энергии теплового движения, часть электронов переходит из валентной зоны в зону проводимости. Обе зоны становятся частично заполненными электронами. Так как степень заполнения их различна, то различны и условия движения электронов в них. Расчеты показывают, что результат движения всех электронов валентной зоны, с точки зрения электропроводности, эквивалентен результату движения в ней положительных зарядов, число которых совпадает с числом вакантных мест в валентной зоне. Этот положительный заряд получил название „дырка“. Условия ее движения в валентной зоне близки к условиям движения электрона в зоне проводимости. Поэтому физические характеристики электронов и дырок практически совпадают. При переходе электронов из валентной зоны в зону проводимости образуется равное число носителей обоих знаков (электронов и дырок), участвующих в проводимости.

Образуется **p-n**-переход на контакте двух примесных полупроводников — электронного (**n**-типа) и дырочного (**p**-типа). Примесными называются такие полупроводники, у которых носители, принимающие участие

в проводимости тока, образуются двумя способами: 1) за счет перехода электронов из зоны в зону (собственные носители); 2) за счет переходов с уровня, обеспечиваемого примесью (в **n**-типе), или на него (в **p**-типе). Примесь, поставляющая в зону проводимости электроны, называется донорной; примесь, поставляющая дырки в валентную зону — акцепторной.

Технологически **p-n**-переход получают введением акцепторной (донорной) примеси с одного конца слаболегированного образца **n(p)**-типа. Энергетический уровень донорной примеси E_d лежит в запрещенной зоне вблизи дна зоны проводимости E_1 (рис. 1,а).

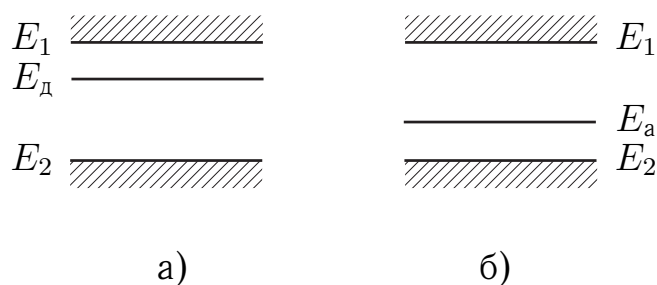


Рис. 1. Схема уровней запрещенной зоны между зоной проводимости и валентной зоной для примесных полупроводников

Энергетический уровень акцепторной примеси E_a расположен в запрещенной зоне вблизи потолка валентной зоны E_2 (рис. 1,б). Уровень Ферми E_F в примесном полупроводнике при $T = 0$ лежит между примесным уровнем и краем ближайшей зоны. С ростом температуры он перемещается к середине запрещенной зоны. Для материалов, образующих **p-n**-переход, обычно уровень Ферми при $T = 300$ К лежит вблизи энергетического примесного уровня E_d или E_a .

Для полупроводника с донорной примесью полная концентрация носителей складывается из концентрации собственных носителей n_o и p_o ($n_o = p_o$), и концентрации примесных электронов $n_{пр}$. Обычно при комнатной температуре $n_{пр} \gg n_o$, поэтому проводимость практически полностью обеспечивается примесными электронами. Полупроводники, у которых проводимость определяется в основном электронами, называются полупроводниками **n**-типа, или электронными. Электроны полупроводников **n**-типа называются основными носителями, а дырки — неосновными.

Полупроводники, у которых проводимость определяется в основном дырками, — это полупроводники **p**-типа, или дырочные. Дырки полупроводников **p**-типа называются основными носителями, а электроны — неосновными.

$\mathcal{E}_k \rightarrow$					
	+	+	+	—	—
n-тип	+	+	+	—	—
	+	+	+	—	—
	+	+	+	—	—
					p-тип

Рис. 2. Двойной слой объемного заряда ионизированных атомов на контакте полупроводников **n**- и **p**-типов

заряда сопровождается возникновением контактного электрического поля, напряженность которого направлена от положительного заряда к отрицательному (рис. 2). Это поле препятствует дальнейшему преимущественному перемещению основных носителей и при некотором своем значении \vec{E}_k прекращает его. С существованием такого равновесного поля связана разность потенциалов φ_k , которая носит название контактной.

Расчет показывает, что:

$$\varphi_k = \frac{1}{e} (E_{F1} - E_{F2}), \quad (1)$$

где E_{F1} — энергетический уровень Ферми для полупроводника **n**-типа, E_{F2} — энергетический уровень Ферми для полупроводников **p**-типа, e — элементарный электрический заряд.

Электрическое поле проникает в образцы **n**- и **p**-типов на глубину $d \approx 10^{-7}$ м. Величина d носит название ширины **p-n**-перехода или ширины слоя объемного заряда. Электрическое поле **p-n**-перехода с напряженностью \vec{E}_k накладывается на внутреннее атомное поле \vec{E}_a , в котором электрон находится внутри полупроводника. Величина $|\vec{E}_k| \sim 10^6$ В/м существенно меньше напряженности атомных полей $|\vec{E}_a| \sim 10^8$ В/м, поэтому поле объемного приконтактного заряда не изменяет зонной структуры, а лишь смещает зоны соседних полупроводников (рис. 3,а).

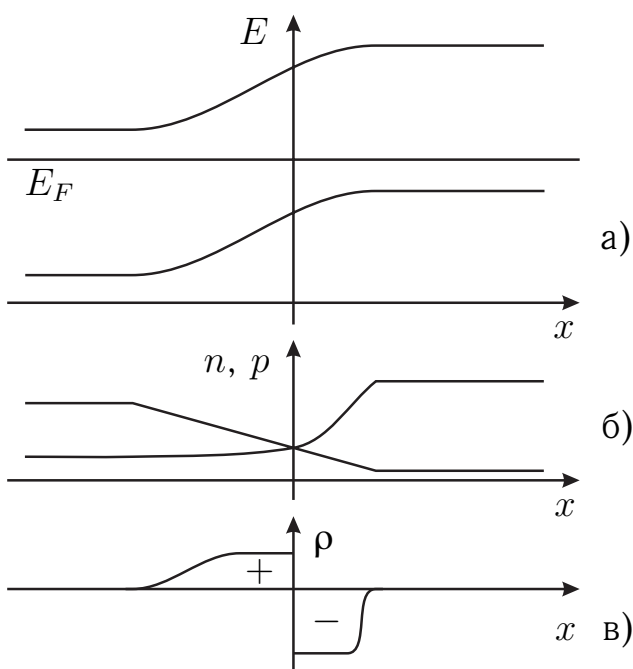


Рис. 3. Кривые изменения вдоль **p-n**-перехода (оси x): а) расстояния от уровня Ферми E_F до краев зоны проводимости и валентной зоны, б) концентрации свободных носителей, в) объемного заряда **p-n**-перехода

емного приконтактного заряда не изменяет зонной структуры, а лишь смещает зоны соседних полупроводников (рис. 3,а).

В отсутствие внешнего напряжения уровни Ферми в обоих образцах совпадают, так как образцы **n**- и **p**-типов образуют теперь единую систему. Вдали от **p-n**-перехода структура зон остается неизменной, т. е. уровень Ферми близок к зоне проводимости в **n**-области и к валентной зоне в **p**-области. В такой ситуации неизбежно относительное смещение зон полупроводников **n**- и **p**-типов. При этом расстояние от уровня Ферми до края валентной зоны ($E_F - E_2$) и края зоны проводимости ($E_1 - E_F$) меняется вдоль **p-n**-перехода (рис. 3,а). Это означает, что вдоль него меняется концентрация свободных носителей (рис. 3,б), поскольку она определяется соотношениями:

$$n = N_e e^{-\frac{E_1 - E_F}{kT}}, \quad p = N_v e^{-\frac{E_F - E_2}{kT}},$$

где N_e , N_v — объемные плотности возможных состояний в зоне проводимости и в валентной зоне; E_1 , E_2 — энергии краев зоны проводимости и валентной зоны.

На рис. 3,в приведена кривая изменения объемного заряда в области **p-n**-перехода.

2. Выпрямительные свойства **p-n**-перехода

В силу непрерывного теплового движения в положении равновесия часть свободных носителей пересекает **p-n**-переход. Основные носители (электроны в полупроводнике **n**-типа и дырки в полупроводнике **p**-типа), пересекающие переход, создают ток J_0 одного направления. Неосновные носители (дырки в полупроводнике **n**-типа и электроны в полупроводнике **p**-типа), пересекающие переход, создают ток J_0 противоположного направления ($j = env$). В отсутствие внешнего напряжения эти токи равны по величине и полный ток через **p-n**-переход равен нулю, т. е. $J = J_0 - J_n = 0$. Поскольку при пересечении перехода основные носители преодолевают потенциальный барьер $e\phi_k$, а неосновные — не преодолевают его (рис. 3), то внешним напряжением можно регулировать значение полного тока $J = J_0 - J_n$ через **p-n**-переход, изменяя J_0 . Если направление поля внешнего напряжения V противоположно направлению контактного поля \vec{E}_k , то суммарный потенциальный барьер $\phi = \phi_k - V$ для основных носителей с ростом V уменьшается. Равновесие нарушается и через **p-n**-переход течет суммарный ток, который при $\phi \rightarrow 0$ может достигать очень большой величины, так как характеризуется преимущественным током основных носителей.

Такой ток возникает, если „+“ внешнего напряжения прикладывается к полупроводнику **p**-типа и „—“ — к полупроводнику **n**-типа. Напряжение

указанной полярности на диоде (и соответствующий ему ток) называется положительным.

Если прикладывается внешнее поле, совпадающее по направлению с контактным, то суммарный потенциальный барьер для основных носителей возрастает. Равновесие опять нарушается и через **p-n**-переход течет суммарный ток, направленный противоположно положительному току. Величина его теперь определяется преимущественным переходом неосновных носителей, концентрация которых мала, поэтому и ток невелик. Этот ток и, соответствующее ему, напряжение на **p-n**-переходе называются отрицательными.

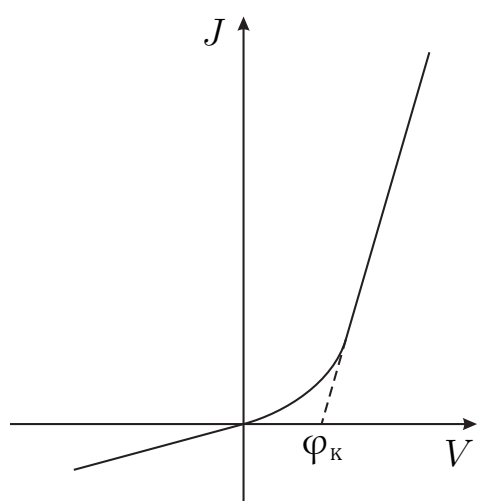


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика **p-n**-перехода

Расчет показывает, что полный ток основных и неосновных носителей через **p-n**-переход:

$$J = J_n \left(e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right), \quad (2)$$

где J_n — ток неосновных носителей или ток насыщения; V — внешнее напряжение на **p-n**-переходе. При $V > 0$ и $|eV| \gg kT$, $e^{\frac{eV}{kT}} \gg 1$ и, соответственно, $J = J_n e^{\frac{eV}{kT}}$, т. е. ток экспоненциально изменяется с напряжением. При $V < 0$ и $|eV| \gg kT$, $e^{\frac{eV}{kT}} \gg 1$ и, соответственно $J = -J_n = \text{const}$, т. е. ток стремится к постоянной величине.

Теоретическая зависимость (2) тока от напряжения, т. е. ВАХ **p-n**-перехода, изображена на рис. 4.

Экспериментальная часть

1. Решаемые экспериментальные задачи

В данной работе ставятся следующие задачи.

1. Снятие зависимости тока I от напряжения V и построение ВАХ выпрямительного диода.
2. Определение по ВАХ диода зависимости сопротивления **p-n**-перехода от величины напряжения на нем.
3. Оценка контактной разности потенциалов φ_k выпрямительного диода.

Дифференциальное сопротивление в любой точке экспериментальной ВАХ определяется графически с помощью соотношения:

$$r = \frac{dV}{dJ} = \lim_{\Delta J \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta J},$$

где ΔV — малое приращение напряжения в области выбранного значения V на ВАХ; ΔJ — приращение тока, соответствующее выбранному значению ΔV .

Контактная разность потенциалов определяется следующим образом. С ростом положительного напряжения на диоде сопротивление **p-n**-перехода уменьшается. Это уменьшение связано с тем, что с ростом приложенного напряжения внешнее поле компенсирует все контактное поле. Если внешнее напряжение станет равным контактной разности потенциалов ($V = \varphi_k$), то контактное поле полностью нейтрализуется. При этом условии диод представляет собой обычное омическое сопротивление z , определяющееся геометрией полупроводников и их удельным сопротивлением. При $V > \varphi_k$ ВАХ диода имеет линейный вид $V = \varphi_k + J_r$. Следовательно, прямая линия, являющаяся продолжением практически линейного участка положительной ветви ВАХ, пересекает ось напряжений в точке $V = \varphi_k$ (рис. 4).

2. Описание экспериментальной установки

Электрическая схема цепи для снятия ВАХ выпрямительного диода показана на рис. 5. Цепь питается стабилизированным источником напряжения 1. Для обеспечения плавной регулировки напряжения на диоде 3 используется потенциометр 2. Напряжение на диоде измеряется вольтметром 7 типа В7-27. Ток через диод определяется соотношением $J = \frac{U}{r}$. При замкнутом ключе 6, $r = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} = 10 \text{ кОм}$, т. к. $r_1(4) = 100 \text{ кОм}$, $r_2(5) = 10 \text{ кОм}$. При разомкнутом ключе 6, $r = r_1 = 100 \text{ кОм}$.

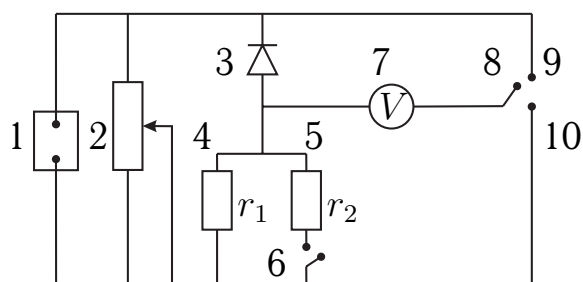


Рис. 5. Электрическая схема цепи для снятия ВАХ

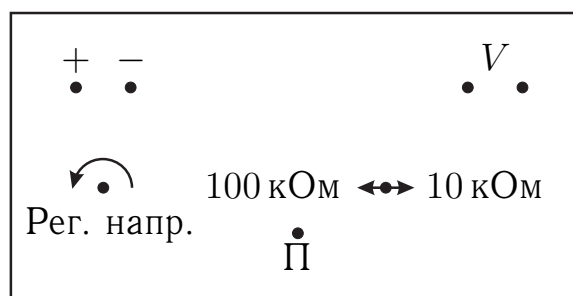


Рис. 6. Лицевая сторона платы с электрической схемой

Переключение вольтметра с измерения напряжения на диоде (клемма 9 замкнута на клемму 8) на измерение напряжения на активном сопротивлении (клемма 9 замкнута на клемму 10) осуществляется с помощью кнопочного переключателя. При положении кнопки в отжатом состоянии вольтметр показывает напряжение на диоде, а в нажатом — напряжение на активном сопротивлении, пропорциональное току через диод. Приведенная электрическая схема собрана на плате, лицевая сторона которой показана на рис. 6. Гнезда „+“ и „–“ служат для подключения схемы к источнику питания. При подключении „+“ источника питания к клемме „+“ на плате диод включен в прямом направлении, при подключении „+“ к „–“ на плате — в обратном направлении. Ручка „Рег. напр.“ служит для регулировки напряжения на диоде. При нажатии кнопки „П“ вольтметр, подключенный к гнездам „V“, переключается с диода на активное сопротивление. Переключатель сопротивления в положении „10 кОм“ замыкает сопротивление r_2 (рис. 5) на сопротивление r_1 , а в положении „100 кОм“ — отключает его.

3. Проведение эксперимента

Снятие ВАХ выпрямительного диода.

1. Подключить плату к источнику питания („+“ источника питания к клемме „+“ на плате) и к вольтметру.
2. Переключатель шкал вольтметра поставить в положение „10 В“.
3. Включить вольтметр и источник питания в сеть. На источнике питания выставить напряжение $\mathcal{E} = 1$ В.
4. Переключатель „ r “ на плате поставить в положение 10 кОм (рис. 6).
5. Ручкой „рег. напр.“ выставить на диоде напряжение $V = 0,15$ В.
6. Нажать кнопку „П“ (рис. 6) и измерить напряжение на активном сопротивлении. Результаты измерения напряжения на диоде V и активном сопротивлении V_r занести в табл. 1.

Таблица 1. Данные для построения прямой ветви ВАХ

V (В)	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,43	0,44
V_r (В)								
$J = \frac{V_r}{r}$ (А), $r = 10$ кОм								

7. Измерения по пп. 5 и 6 провести для напряжений V на диоде, приблизительно равных следующим значениям: 0,15 В; 0,2 В; 0,25 В; 0,3 В; 0,35 В; 0,4 В; 0,43 В; 0,44 В. Если последние точки не удастся снять при напря-

жении на источнике $\mathcal{E} = 1 \text{ В}$, то снять их последовательно при значениях $\mathcal{E} = 2 \text{ В}$; $\mathcal{E} = 3 \text{ В}$; $\mathcal{E} = 4 \text{ В}$.

8. Ручку „рег. напр.“ вернуть в крайнее правое положение.
9. Выставить на источнике напряжение 0.
10. Сменить полярность напряжения, подаваемого на диод. Для этого „+“ источника питания подсоединить к „–“ платы.
11. На источнике питания выставить напряжение $\mathcal{E} = 10 \text{ В}$.
12. Переключатель „ r “ на плате поставить в положение „100 кОм“.
13. Ручкой „рег. напр.“ выставить на диоде $V = -1 \text{ В}$.
14. Нажать кнопку „П“ и измерить напряжение V_r на активном сопротивлении. Результаты занести в табл. 2.
15. Измерения по пп. 4 и 5 провести для следующих напряжений на диоде: -1 В ; -2 В ; -3 В ; -6 В . Результаты занести в табл. 2.

Таблица 2. Данные для построения обратной ветви ВАХ

$V \text{ (В)}$	-1	-2	-3	-6	-9
$V_r \text{ (В)}$					
$J = \frac{V_r}{r} \text{ (А)},$ $r = 100 \text{ кОм}$					

16. Поставить ручку „рег. напр.“ в крайнее правое положение.
17. Выставить на источнике $\mathcal{E} = 0$.

4. Обработка экспериментальных данных

1. По экспериментальным данным построить зависимость $J = f(V)$ для выпрямительного диода.

2. Пользуясь экспериментальной зависимостью $J = f(V)$ и соотношением $r \approx \frac{\Delta V}{\Delta J}$, определить дифференциальное сопротивление диода при следующих значениях напряжения на нем:

1) $V = 0,2 \text{ В}$; 2) $V = 0,25 \text{ В}$; 3) $V = 0,36 \text{ В}$; 4) $V = -2 \text{ В}$; 5) $V = -0,4 \text{ В}$. При определении r взять $\Delta V = 0,01 \text{ В}$.

3. По найденным значениям r построить график зависимости $r = f(V)$.

4. Определить контактную разность потенциалов φ_k . Для этого провести касательную к построенной ВАХ диода в точке, соответствующей максимальному напряжению на диоде. Продолжить касательную до пересечения с осью напряжений. Значение V , соответствующее точке пересечения, принять равным контактной разности потенциалов φ_k .

Контрольные вопросы

1. Что такое полупроводники **p**- и **n**-типов?
2. Что такое **p-n**-переход? Каков механизм образования перехода?
3. Из каких составляющих складывается суммарный ток через **p-n**-переход?
4. Почему суммарный ток через **p-n**-переход в отсутствие внешнего напряжения на нем равен нулю?
5. Как объяснить появление тока через **p-n**-переход при приложении к **p-n**-переходу внешнего напряжения?
6. Как объяснить выпрямляющие свойства **p-n**-перехода?
7. Как по ВАХ определить контактную разность потенциалов?

Список литературы

1. *Бушманов Б. М., Хромов Ю. А.* Физика твердого тела. — М. : Высшая школа, 1971. — 224 с.
2. *Савельев И. В.* Курс общей физики. — М. : Наука, 1982. — т. 2. — 496 с.
3. *Смит Р.* Полупроводники. — М. : Мир, 1982. — 560 с.