

### Лабораторная работа № 1

#### Полупроводниковые диоды на основе электронно-дырочного перехода

Цель работы: изучить основные свойства и параметры полупроводниковых диодов; освоить методику исследования вольт-амперных характеристик (ВАХ) диодов.

#### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Материалы, удельное сопротивление которых больше удельного сопротивления проводников, но меньше удельного сопротивления диэлектриков, относят к *полупроводникам*. Для сравнения, проводники имеют удельное сопротивление  $10^{-6} - 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , изоляторы имеют удельное сопротивление  $10^8 - 10^{13} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , а полупроводники имеют удельное сопротивление  $10^{-5} - 10^7 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ . Обычно это кристаллический материал с неширокой (0,5-3 эВ) запрещенной зоной. В электронике в качестве полупроводников часто используют такие материалы как германий, кремний, селен, арсенид галлия и другие. Вследствие малой ширины запрещенной зоны полупроводника тепловые колебания атомов способны сообщить валентным электронам энергию, достаточную для перехода из заполненной валентной зоны в свободную зону проводимости. Каждый такой переход приводит к возникновению пары носителей заряда: свободного электрона в зоне проводимости и свободного энергетического состояния (дырки) в валентной зоне. Генерация пар свободных (способных перемещаться под действием приложенного напряжения) зарядов делает кристалл способным проводить электрический ток, а электропроводность такого кристалла называется собственной. Химически чистые или *i-полупроводники* имеют собственную электропроводность и небольшую проводимость. Заметим, что электропроводность — это способность проводить электрический ток посредством чего-либо, то есть величина качественная, а проводимость — величина количественная.



*Полупроводник n-типа* – полупроводник с преобладающей электронной электропроводностью, которая возникает при добавлении донорных примесей, например примеси пентавалентного фосфора к четырехвалентному германию. Атом примеси при этом ионизируется, добавляя электрон к электронам собственной электропроводности.

*Полупроводник p-типа* с преобладающей дырочной электропроводностью образуется при добавлении к химически чистому полупроводнику акцепторных примесей, например, при добавлении трехвалентного индия к четырехвалентному германию. Атом примеси ионизируется, принимая электрон от соседнего атома и добавляя тем самым дырку к дыркам собственной электропроводности. Электропроводность, возникающую за счет примесных атомов, называют примесной. Примесные полупроводники называются легированными.

При температуре 50 - 70° С почти все атомы примесей ионизируются и проводимость примесного полупроводника существенно возрастает. Несмотря на возникновение только одного типа электропроводности: или *n*-типа, или *p*-типа, примесные полупроводники являются электрически нейтральными, так как заряды ионов скомпенсированы зарядами *основных* носителей заряда – электронов в *n*-области и дырок в *p*-области полупроводника. Дырки в *n*-полупроводнике или электроны в *p*-полупроводнике называются *неосновными* носителями зарядов. Заметим, что ионы примесных атомов связаны кристаллической решеткой и не могут перемещаться под действием внешнего электрического поля.

Существуют полупроводники, состоящие из двух областей. Одна область имеет электронную электропроводность, а другая – дырочную электропроводность. Переход между двумя областями полупроводника с разными типами электропроводности называется *электронно-дырочным* или *p-n-переходом* (рис.1.1).

Сразу же после создания в полупроводнике *p*- и *n*-областей начинается диффузия (*диффузионный ток*) основных носителей заряда. Диффузия дырок



происходит из  $p$ -области в  $n$ -область, а диффузия электронов в обратном направлении. Встречаясь, дырки и электроны рекомбинируют, при этом вблизи граничной плоскости (где соприкасаются  $p$ -область и  $n$ -область) образуются два слоя:  $n$ -область приобретает нескомпенсированный положительный заряд (слой нескомпенсированных положительных ионов), а  $p$ -область приобретает нескомпенсированный отрицательный заряд (слой нескомпенсированных отрицательных ионов). Поскольку ионы примесных атомов связаны кристаллической решеткой, то перемещаться они не могут. Между двумя разноименно заряженными слоями возникает электрическое поле  $E_{зан}$ , направленное от  $n$ -области к  $p$ -области, и называемое *запирающим*. Напряженность этого поля препятствует диффузии дырок и электронов (диффузионному току). Чем больше нескомпенсированных ионов, тем выше напряженность электрического поля. При некотором значении напряженности диффузионный ток прекратится. Этому значению напряженности соответствует определенная *контактная разность потенциалов*  $\phi_K$  и определенная ширина слоя  $L$ , в котором рекомбинировали подвижные носители зарядов.

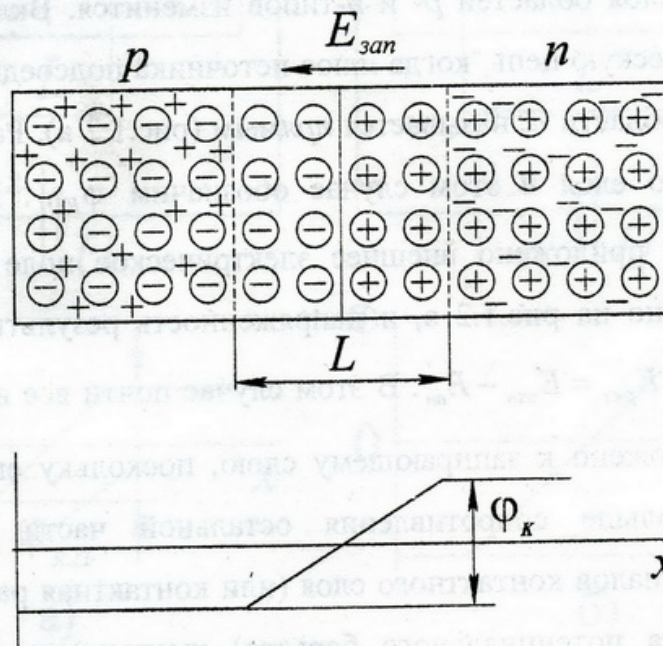


Рис.1.1. Электронно-дырочный переход и контактная разность потенциалов

Немного дополним общую картину. В  $p$ -области и  $n$ -области существуют еще и неосновные носители зарядов. Под действием напряженности



поля  $E_{зан}$  неосновные носители начнут дрейфовать навстречу диффундирующим зарядам, возникает дрейфовый ток, направленный навстречу току диффузии. Величина дрейфового тока мала, так как мала концентрация неосновных носителей заряда. Динамическое равновесие наступит при равенстве диффузионного и дрейфового токов. При этом слой  $L$  сильно обеднен свободными носителями заряда, хотя и не лишен их полностью. С приближением к граничной плоскости обеднение слоя  $L$  носителями зарядов будет все более выраженным.

Ширина обедненного слоя связана с контактной разностью потенциалов, которая в свою очередь, зависит от выбора материалов и концентрации примесей. Чем выше контактная разность потенциалов, тем шире обедненный слой. У германия и кремния контактная разность потенциалов составляет десятые доли вольта ( $\sim 0,3$  В и  $\sim 0,6$  В соответственно), а ширина обедненного слоя – десятые и сотые доли микрометра.

Если к  $p$ - $n$ -переходу подключить источник ЭДС, на клеммах которого будет напряжение  $U$ , то разность потенциалов на границах контактного (обедненного) слоя областей  $p$ - и  $n$ -типов изменится. Включение  $p$ - $n$ -перехода в электрическую цепь, когда плюс источника подсоединяется к области  $p$ , а минус – к области  $n$ , называется *прямым* (рис.1.2 а). Разность потенциалов контактного слоя в этом случае обозначим  $\varphi_{к.п}$ . При этом к  $p$ - $n$ -переходу будет приложено внешнее электрическое поле напряженностью  $E_{вн}$ , как показано на рис.1.2 а, и напряженность результирующего поля в переходе будет  $E_{рез} = E_{зан} - E_{вн}$ . В этом случае почти все внешнее напряжение будет приложено к запирающему слою, поскольку его сопротивление значительно больше сопротивления остальной части полупроводника. Разность потенциалов контактного слоя (или контактная разность потенциалов, или высота потенциального барьера) уменьшится и станет равной  $\varphi_{к.п} = \varphi_{к} - U$ , ширина его также уменьшится. Дрейфовый ток снизится, а диффузионный ток возрастет, в результате чего динамическое равновесие



нарушится и возникнет ток через  $p$ - $n$ -переход. Этот ток называют *прямым током*, он совпадает с диффузионным.

Включение, при котором к области  $p$  подсоединен минус источника, а к области  $n$  – плюс, называется *обратным* (рис.1.2 б). Соответствующую разность потенциалов контактного слоя в этом случае обозначим  $\phi_{к.о}$ . При этом  $E_{рез} = E_{зан} + E_{вн}$ . Разность потенциалов контактного слоя увеличится и станет равной  $\phi_{к.о} = \phi_{к} + U$ , ширина его также увеличится. Диффузионный ток уменьшится из-за противодействия электрического поля в запирающем слое. Дрейфовый ток увеличится благодаря увеличению разности потенциалов контактного слоя. Результирующий ток называют *обратным*, он совпадает с дрейфовым током.

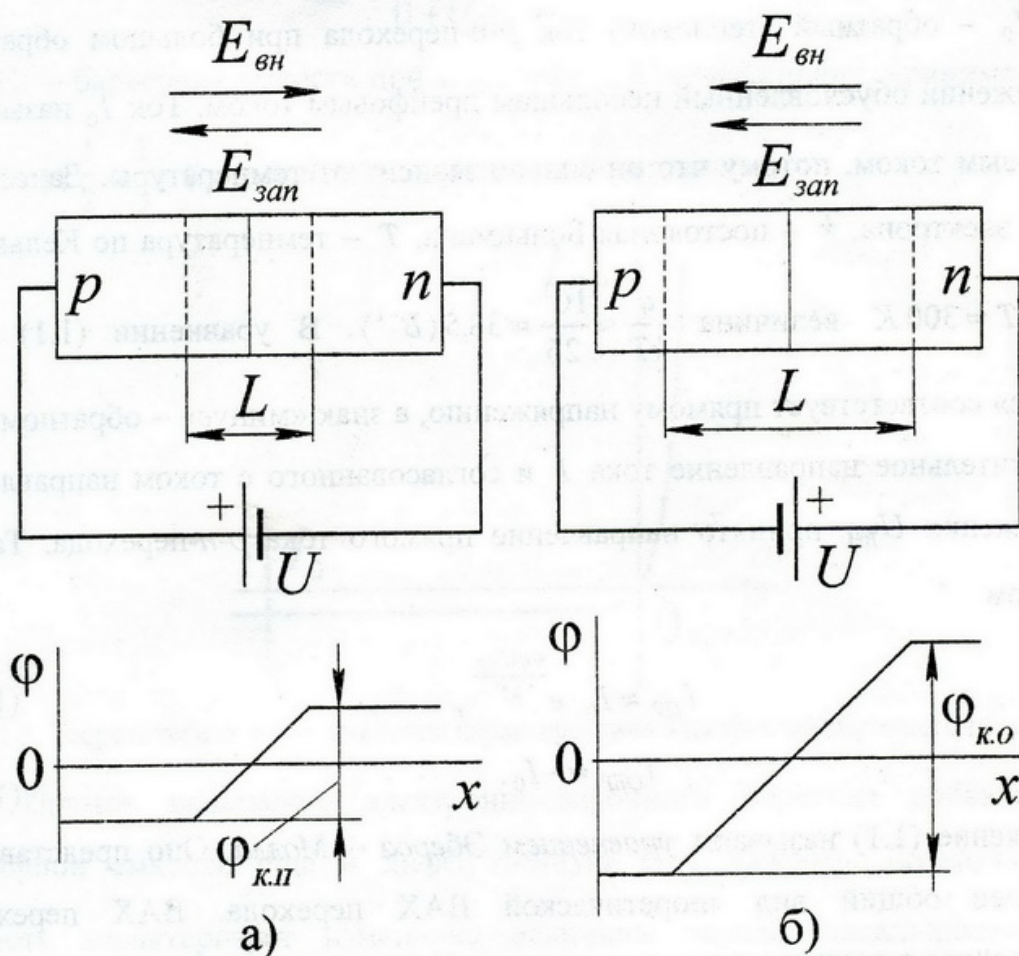


Рис.1.2. Прямое (а) и обратное (б) включения  $p$ - $n$ -перехода

Напомним, что диффузионный ток создается основными носителями зарядов, а дрейфовый – неосновными. Так как концентрация основных

носителей заряда на несколько порядков выше концентрации неосновных носителей, прямой ток в сотни и тысячи раз превышает обратный. Таким образом, *p-n*-переход, включенный в прямом направлении, пропускает электрический ток, а включенный в обратном – не пропускает.

Напряжение, при котором через *p-n*-переход протекает *прямой* ток, называется *прямым (открывающим) напряжением*. Напряжение, при котором через *p-n*-переход протекает *обратный* ток, называется *обратным (затворающим или закрывающим) напряжением*. Теоретическая зависимость тока  $I$  через переход от подаваемого напряжения  $U_{ВН}$  имеет вид

$$I = I_0 \left( e^{\frac{\pm q U_{ВН}}{kT}} - 1 \right), \quad (1.1)$$

где  $I_0$  – обратный (тепловой) ток *p-n*-перехода при большом обратном напряжении обусловленный небольшим дрейфовым током. Ток  $I_0$  называют тепловым током, потому что он сильно зависит от температуры. Далее  $q$  – заряд электрона,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура по Кельвину.

Для  $T = 300 \text{ K}$  величина  $\frac{q}{kT} \approx \frac{10^3}{26} \approx 38,5 \text{ (В}^{-1}\text{)}$ . В уравнении (1.1) знак «плюс» соответствует прямому напряжению, а знак «минус» – обратному. За положительное направление тока  $I$  и согласованного с током направления напряжения  $U_{ВН}$  принято направление прямого тока *p-n*-перехода. Таким образом

$$I_{ПР} \approx I_0 \cdot e^{\frac{+q U_{ПР}}{kT}}, \quad (1.2)$$

$$I_{ОБР} \approx -I_0. \quad (1.3)$$

Выражение (1.1) называют *уравнением Эберса – Молла*. Оно представляет наиболее общий вид теоретической ВАХ перехода. ВАХ перехода, построенная в соответствии с выражением (1.1), представлена на рис.1.3.

Поскольку в *p-n*-переходе и в областях, прилегающих к нему, присутствуют заряды (ионы, электроны и дырки), то это свидетельствует о



том, что переход обладает емкостью. Емкость  $p-n$ -перехода состоит в свою очередь из двух емкостей – *барьерной емкости* и *диффузионной емкости*

$$C = C_{бар} + C_{диф}. \quad (1.4)$$

Барьерная емкость соответствует обратновключенному переходу, который можно рассматривать как обычный конденсатор, где пластинами служат границы обедненного слоя, а сам обедненный слой является несовершенным диэлектриком с увеличенными диэлектрическими потерями. При увеличении обратного напряжения ширина  $L$  обедненного перехода увеличивается, а барьерная емкость уменьшается. Зависимость барьерной емкости для малых переменных токов от обратного напряжения  $U_{ОБР}$  описывается выражением

$$C_{бар} = \frac{C_0}{(1 + U_{ОБР}/\Phi_K)^\lambda}, \quad (1.5)$$

где  $C_0$  – барьерная емкость при  $U_{ОБР} = 0$ ;  $\lambda$  – коэффициент, принимающий значения  $\frac{1}{2} \dots \frac{1}{3}$ ;  $\Phi_K$  – контактная разность потенциалов.

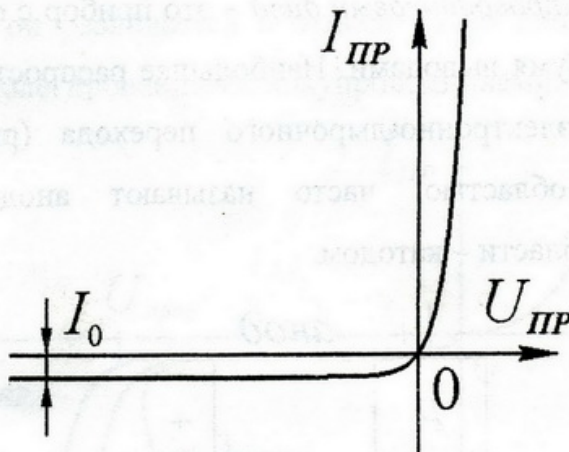


Рис.1.3. Теоретическая вольт-амперная характеристика электронно-дырочного перехода

Прямое включение электронно-дырочного перехода добавляет к барьерной емкости еще и диффузионную  $C_{диф}$  емкость. Диффузионная емкость характеризует изменение величины заряда, накапливаемого в обедненном слое за счет *инжекции*, при изменении прямого напряжения, так как последнее вызывает изменение неравновесной концентрации инжектированных носителей. *Инжекция носителей заряда* – это диффузионное введе-

ние при снижении высоты энергетического барьера носителей заряда через переход из областей, где они были основными, в области, где они становятся неосновными. Диффузионная емкость для малых переменных напряжений зависит от величины прямого тока  $I_{пр}$  и времени жизни  $\tau$  неравновесных носителей заряда:

$$C_{диф} = \frac{q}{kT} \tau \cdot I_{пр}. \quad (1.6)$$

Время жизни  $\tau$  неравновесных носителей заряда зависит от материалов  $p$ - $n$ -перехода. С ростом частоты диффузионная емкость уменьшается вследствие уменьшения накопления заряда в обедненном слое из-за инерционности передвижения носителей при быстром изменении напряжения.

По причине односторонней проводимости электронно-дырочный переход называют *выпрямляющим переходом*. Кроме электронно-дырочного перехода существуют и другие выпрямляющие переходы, например *переход Шотки*. На основе выпрямляющих переходов изготавливаются полупроводниковые диоды. *Полупроводниковый диод* – это прибор с одним выпрямляющим переходом и двумя выводами. Наибольшее распространение получили диоды на основе электронно-дырочного перехода (рис.1.4). Электрод, соединенный с  $p$ -областью, часто называют *анодом*, а электрод, подключенный к  $n$ -области – *катодом*.

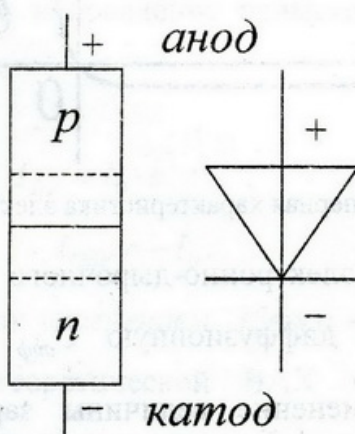


Рис.1.4. Условное обозначение полупроводникового диода и полярность прямого напряжения

Реальные вольт-амперные характеристики диода показаны на рис.1.5.



Эти кривые имеют следующие особенности. Во-первых, экспоненциальное увеличение прямого тока при увеличении прямого напряжения происходит только на начальном участке. Дальше ток через диод увеличивается по практически линейному закону. Это можно объяснить наличием объемных сопротивлений  $p$ - и  $n$ -областей полупроводника. Во-вторых, при большом обратном напряжении наблюдается резкий рост обратного тока через диод. Это явление называется *пробоем диода*. Различают *электрический* и *тепловой пробой*. Электрический пробой бывает *лавинным* и *туннельным*.

Если неосновные носители заряда (электроны и дырки) под действием электрического поля (созданным обратным напряжением) при движении через  $p$ - $n$ -переход приобретают энергию, достаточную для ударной ионизации атомов полупроводника, то в переходе происходит лавинообразное увеличение носителей заряда, что приводит к резкому увеличению обратного тока при почти неизменном обратном напряжении (кривая 1 на рис.1.5). Такой вид электрического пробоя называют *лавинным пробоем*. Обычно он развивается в относительно широких  $p$ - $n$ -переходах, образованных слаболегированными полупроводниками.

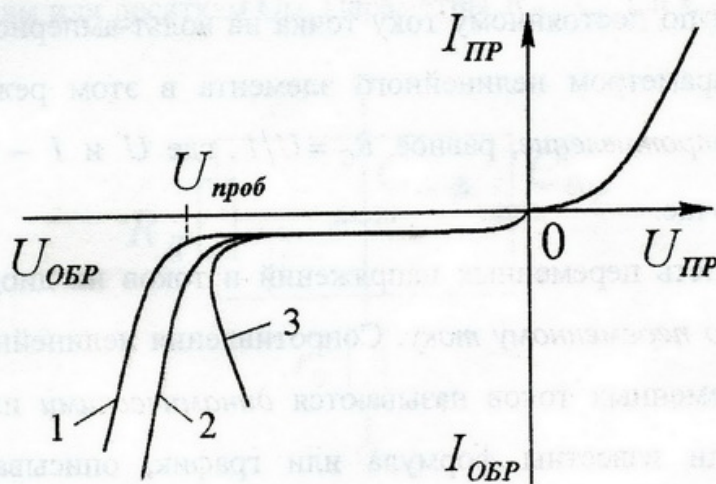


Рис.1.5. Реальные вольт-амперные характеристики диода

*Туннельный пробой* (кривая 2 на рис.1.5) возникает при большой напряженности электрического поля в тонком  $p$ - $n$ -переходе между высоколегированными полупроводниками в результате туннельного перехода электронов.



Электрический пробой является обратимым. Обратимость заключается в том, что первоначальные свойства  $p$ - $n$ -перехода полностью восстанавливаются, если отключить источник ЭДС от перехода. Благодаря этому оба вида электрического пробоя используются в качестве рабочих режимов в полупроводниковых диодах.

Если температура  $p$ - $n$ -перехода возрастает в результате его нагрева обратным током и недостаточно теплоотвода, то усиливается процесс генерации пар носителей заряда. Это в свою очередь приводит к дальнейшему нагреву  $p$ - $n$ -перехода и увеличению обратного тока, что может вызвать разрушение перехода. Такой процесс называют *тепловым пробоем*. Очевидно, что допустимое обратное напряжение на переходе зависит от условий теплоотвода. Для теплового пробоя характерен участок отрицательного сопротивления обратной ветви ВАХ  $p$ - $n$ -перехода (кривая 3 на рис.1.5). Тепловой пробой необратим, поэтому этот режим не допускается при эксплуатации полупроводниковых приборов.

Совокупность постоянных напряжений и токов на диоде определяет *режим диода по постоянному току*. *Рабочей точкой* называется соответствующая режиму по постоянному току точка на вольт-амперной характеристике диода. Параметром нелинейного элемента в этом режиме является *статическое сопротивление*, равное  $R_C = U/I$ , где  $U$  и  $I$  – напряжение и ток в рабочей точке.

Совокупность переменных напряжений и токов на диоде определяет *режим диода по переменному току*. Сопротивления нелинейных элементов для малых переменных токов называются *динамическими* или *дифференциальными*. Если известны формула или график, описывающие вольт-амперную характеристику диода, то дифференциальное сопротивление вычисляют, определяя производную в рабочей точке:

$$R_D = \frac{dU}{dI} \approx \frac{\Delta U}{\Delta I}.$$

Графическое определение дифференциального сопротивления  $R_D$  диода в



рабочей точке В показано на рис.1.6.

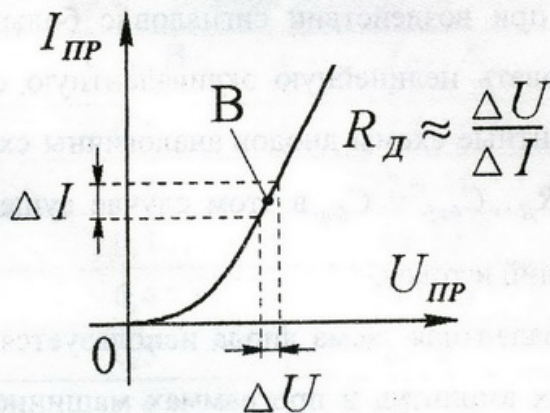


Рис.1.6. Графическое определение дифференциального сопротивления

Между переменными токами и напряжениями на диоде существует практически линейная зависимость только в том случае если амплитуды переменных напряжений меньше 0,1 вольта. Такие напряжения и токи называют малыми. При малых переменных токах и напряжениях используется линейная эквивалентная схема диода, показанная на рис.1.7. Здесь  $R_D$  – дифференциальное сопротивление диода,  $C_{диф}$  и  $C_{бар}$  – диффузионная и барьерная емкости,  $r_0$  – объемное сопротивление  $p$ - и  $n$ - областей полупроводника, равное единицам или десяткам Ом. Параметры  $R_D$ ,  $C_{диф}$  и  $C_{бар}$  существенно

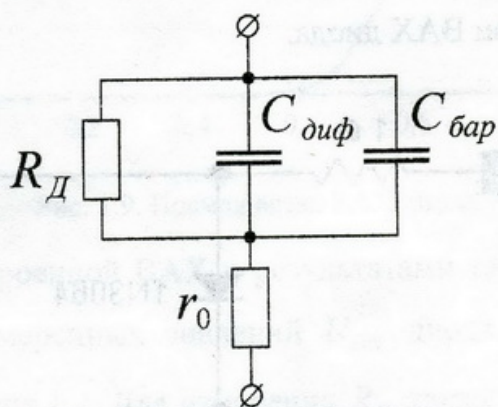


Рис.1.7. Линейная эквивалентная схема диода

зависят от величины и полярности постоянного напряжения, приложенного к диоду. Емкости диода на низких частотах можно не учитывать.

Между переменными токами и напряжениями на диоде существует нелинейная зависимость, если амплитуды напряжений больше 0,1 вольта. В



этом случае диоды считаются *нелинейными элементами*. Для расчета цепей, содержащих диоды, при воздействии сигналов с большими амплитудами необходимо использовать нелинейную эквивалентную схему. Простейшие нелинейные эквивалентные схемы диодов аналогичны схеме, показанной на рис.1.7. Параметры  $R_d$ ,  $C_{диф}$  и  $C_{бар}$  в этом случае существенно зависят от переменных напряжений и токов.

Линейная эквивалентная схема диода используется при расчете цепей методом комплексных амплитуд в программах машинного моделирования. Нелинейные эквивалентные схемы диодов используются при анализе режимов, как по постоянному, так и по переменному токам при воздействии сигналов с большими амплитудами в программах машинного моделирования.

*Пример 1.*

Проведем исследования характеристик и параметров диода 1N3064, взятого из библиотеки National программы EWB. Для измерения прямой ветви вольт-амперной характеристики диода соберем схему, как показано на рис. 1.8. Изменяя величину тока источника тока  $I_1$ , так чтобы при прямом токе напряжение на вольтметре  $V_1$  изменялось от 0 до 1 вольта, проведем измерения прямой ветви ВАХ диода.

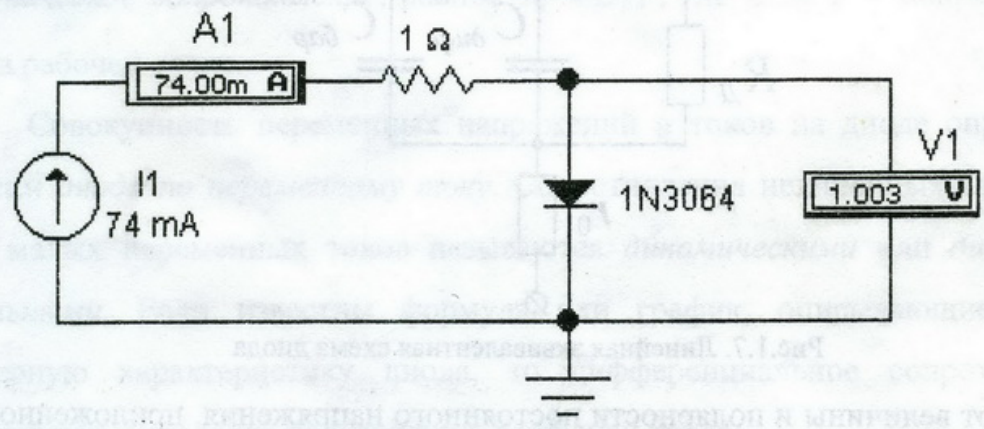


Рис. 1.8. Схема для измерения ВАХ диода

Результаты измерения сведем в таблицу 1.1. Прямая ветвь ВАХ диода, построенная по результатам измерений, изображена на рис. 1.9.



Таблица 1.1 – Результаты измерения прямой ветви ВАХ диода

$U_{пр}, В$	$I_{пр}, А$
0,1	$11,2 \cdot 10^{-9}$
0,2	$22,6 \cdot 10^{-9}$
0,3	$44 \cdot 10^{-9}$
0,4	$570 \cdot 10^{-9}$
0,5	$25 \cdot 10^{-6}$
0,6	$1,03 \cdot 10^{-3}$
0,7	$10,7 \cdot 10^{-3}$
0,8	$29,3 \cdot 10^{-3}$
0,9	$50,7 \cdot 10^{-3}$
1,0	$73,4 \cdot 10^{-3}$

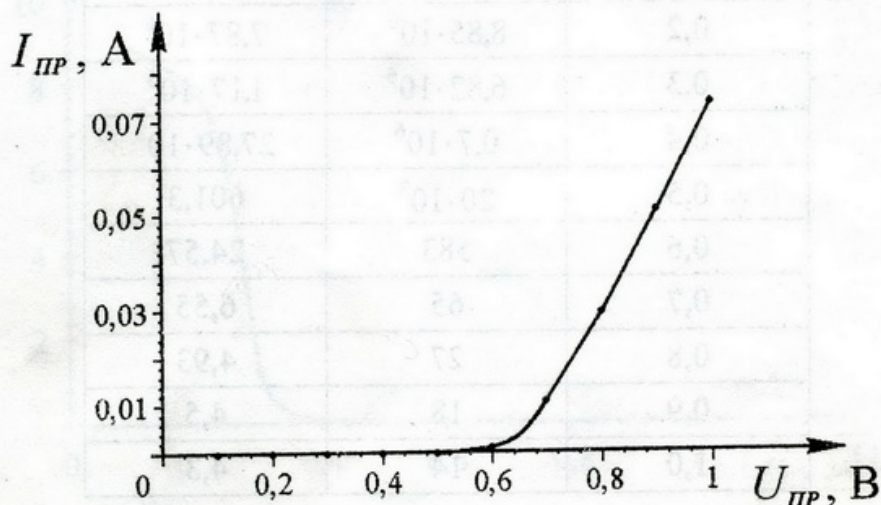


Рис. 1.9. Прямая ветвь ВАХ диода

Пользуясь построенной ВАХ и результатами таблицы 1.1, рассчитаем значения  $R_C$  для измеренных значений  $U_{пр}$  диода. Результаты расчетов представлены в таблице 1.2. Для измерения  $R_D$  также воспользуемся схемой рис.1.8. Это можно сделать, например, следующим образом. Будем изменять величину тока источника тока  $I_1$ , так чтобы при прямом токе напряжение на вольтметре  $V_1$  приняло значение 0,05 В. Ток источника тока  $I_1$  при этом равен  $5,6 \cdot 10^{-9}$  А. Снова изменим величину тока источника тока  $I_1$ , так чтобы



при прямом токе напряжение на вольтметре V1 приняло значение 0,15 В. Ток источника тока I1 при этом равен  $16,9 \cdot 10^{-9}$  А. Тогда  $\Delta U = 0,15 - 0,05 = 0,1$  В, а  $\Delta I = (16,9 - 5,6) \cdot 10^{-9} = 11,3 \cdot 10^{-9}$  А. Отсюда легко найти значение  $R_D$  для величины  $U_{PP}$  равной 0,1 В

$$R_D = \Delta U / \Delta I = 8,85 \cdot 10^6 \text{ Ом.}$$

Подобным образом находим значения  $R_D$  для величин  $U_{PP}$  равных 0,2...1,0 вольта. Заметим, что  $\Delta U$  не должна превышать 0,1 вольта, поскольку между

Таблица 1.2 – Статическое и дифференциальное сопротивление диода

$U_{PP}, \text{ В}$	$R_C, \text{ Ом}$	$R_D, \text{ Ом}$
0,1	$8,93 \cdot 10^6$	$8,85 \cdot 10^6$
0,2	$8,85 \cdot 10^6$	$7,87 \cdot 10^6$
0,3	$6,82 \cdot 10^6$	$1,17 \cdot 10^6$
0,4	$0,7 \cdot 10^6$	$27,89 \cdot 10^3$
0,5	$20 \cdot 10^3$	601,3
0,6	583	24,57
0,7	65	6,55
0,8	27	4,93
0,9	18	4,5
1,0	14	4,3

переменными токами и напряжениями на диоде существует нелинейная зависимость, если амплитуды напряжений больше 0,1 вольта. Результаты расчетов  $R_D$  приведены в таблице 1.2. Построим зависимости  $R_C(U_{\text{дио́да}})$  и  $R_D(U_{\text{дио́да}})$ , где  $U_{\text{дио́да}}$  – напряжение на диоде (рис. 1.10).

Оценим барьерную и диффузионную емкости. Для этого соберем схему, как показано на рис.1.11. Как видно из рис.1.11, при  $U_{dc} = U_{PP} = 0,7$  В  $R_C = 700/10,76 = 65$  Ом, а  $R_D = 46,35/7,215 = 6,42$  Ом для малого переменного напряжения  $U_{ac}$  на диоде и частоты  $f = 100$  Гц сигнала  $e(t)$ , что с хорошей точностью совпадает с результатами, полученными выше



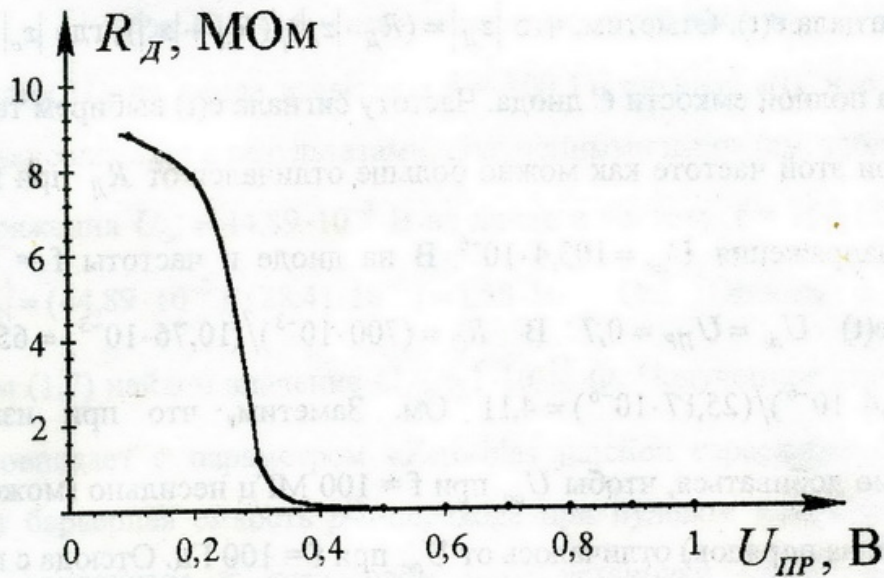
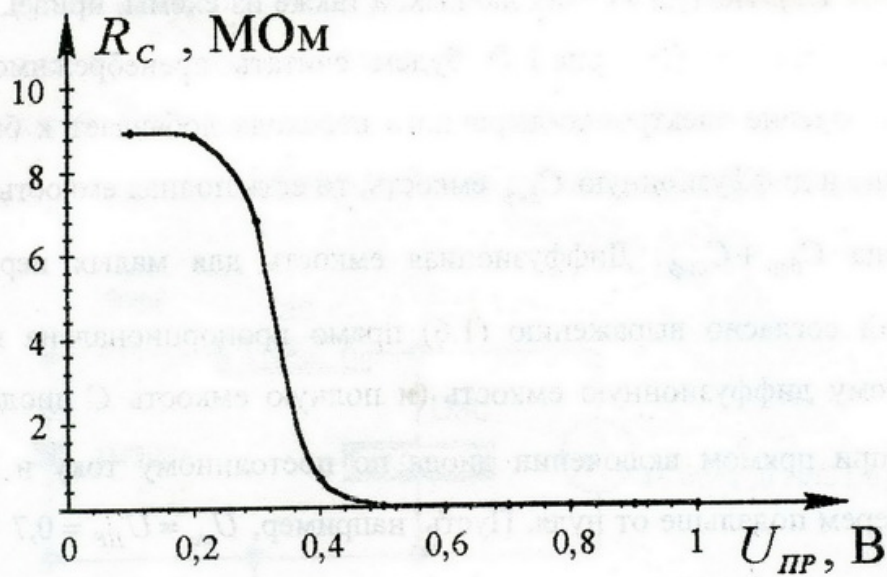


Рис. 1.10. Статическое и дифференциальное сопротивление диода

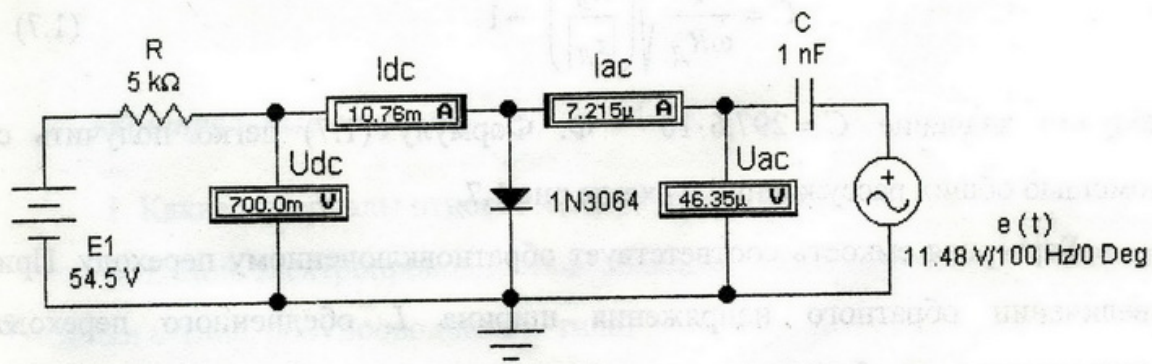


Рис.1.11. Схема для измерения барьерной и диффузионной емкостей



(см. таблицу 1.2). Исходя из этих данных, а также из схемы, приведенной на рис.1.7, величину  $r_0$  (см. рис.1.7) будем считать пренебрежимо малой. Прямое включение электронно-дырочного перехода добавляет к барьерной емкости еще и диффузионную  $C_{диф}$  емкость, то есть полная емкость  $C$  диода будет равна  $C_{бар} + C_{диф}$ . Диффузионная емкость для малых переменных напряжений согласно выражению (1.6) прямо пропорциональна величине  $I_{пр}$ . Поэтому диффузионную емкость (и полную емкость  $C$  диода) будем измерять при прямом включении диода по постоянному току и рабочую точку выберем подальше от нуля. Пусть, например,  $U_{dc} = U_{пр} = 0,7$  В. Тогда с помощью схемы рис.1.11 измерим  $|z_D|$  (см. рис.1.7) при какой-либо другой частоте сигнала  $e(t)$ . Отметим, что  $|z_D| = (R_D \cdot |z_c|) / (R_D + |z_c|)$ , где  $|z_c|$  - модуль импеданса полной емкости  $C$  диода. Частоту сигнала  $e(t)$  выберем такой, чтобы  $|z_D|$  при этой частоте как можно больше отличался от  $R_D$  при  $f=100$  Гц. Так для напряжения  $U_{ac} = 103,4 \cdot 10^{-6}$  В на диоде и частоты  $f = 100$  МГц сигнала  $e(t)$   $U_{dc} = U_{пр} = 0,7$  В  $R_C = (700 \cdot 10^{-3}) / (10,76 \cdot 10^{-3}) = 65$  Ом, а  $|z_D| = (103,4 \cdot 10^{-6}) / (25,17 \cdot 10^{-6}) = 4,11$  Ом. Заметим, что при измерениях необходимо добиваться, чтобы  $U_{ac}$  при  $f = 100$  МГц несильно (может быть в разы, но не на порядок) отличалось от  $U_{ac}$  при  $f = 100$  Гц. Отсюда с помощью формулы (1.7)

$$C = \frac{1}{\omega R_D} \sqrt{\left(\frac{R_D}{|z_D|}\right)^2 - 1} \quad (1.7)$$

получим значение  $C = 297,6 \cdot 10^{-12}$  Ф. Формулу (1.7) легко получить с помощью общих рассуждений и схемы рис.1.7.

Барьерная емкость соответствует обратновключенному переходу. При увеличении обратного напряжения ширина  $L$  обедненного перехода увеличивается, а барьерная емкость уменьшается. Поэтому барьерную



емкость будем измерять, когда рабочая точка находится в нуле, поскольку, как следует из формулы (1.5), в этом случае барьерная емкость будет максимальной. Для этого будем использовать схему рис.1.12. Как видно из рис.1.12,  $R_D = (45 \cdot 10^{-3}) / (0,005 \cdot 10^{-6}) = 9 \cdot 10^6$  Ом для малого переменного

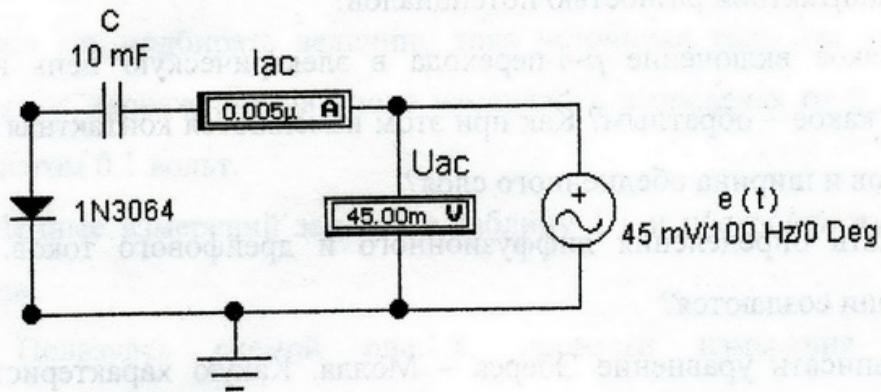


Рис.1.12. Схема для измерения барьерной емкости

напряжения  $U_{ac}$  на диоде и частоты  $f = 100$  Гц сигнала  $e(t)$ , что с хорошей точностью совпадает с результатами, полученными выше (см. таблицу 1.2). А для напряжения  $U_{ac} = 44,89 \cdot 10^{-3}$  В на диоде и частоты  $f = 100$  МГц сигнала  $e(t)$   $|z_D| = (44,89 \cdot 10^{-3}) / (28,41 \cdot 10^{-6}) = 1,58 \cdot 10^3$  Ом. Отсюда с помощью формулы (1.7) найдем значение  $C_{бар} = 1 \cdot 10^{-12}$  Ф. Полученное значение  $C_{бар}$ , точно совпадает с параметром «Zero-bias junction capacitance (CJ0)» (что означает барьерная емкость  $p-n$ -перехода при нулевом напряжении) диода 1N3064, указанным в диалоговом окне установки параметров диодов. Отсюда, зная значения  $C_{бар} + C_{диф}$  и  $C_{бар}$ , получим  $C_{диф} = 296,6 \cdot 10^{-12}$  Ф.

### Контрольные вопросы

1. Какие материалы относят к полупроводникам?
2. Какой электропроводностью обладают  $i$ -полупроводники, полупроводники  $n$ -типа, полупроводники  $p$ -типа?
3. Какие полупроводники называют примесными?



4. Дать определения основных и неосновных носителей зарядов в полупроводниках.

5. Что называют электронно-дырочным переходом?

6. Какое поле называют запирающим, как оно образуется? Что называют контактной разностью потенциалов?

7. Какое включение *p-n*-перехода в электрическую цепь называют прямым, а какое – обратным? Как при этом изменяются контактная разность потенциалов и ширина обедненного слоя?

8. Дать определения диффузионного и дрейфового токов. Какими зарядами они создаются?

9. Записать уравнение Эберса – Молла. Какую характеристику оно представляет?

10. Какая емкость соответствует прямому включению электронно-дырочного перехода, а какая – обратному включению?

11. Что называют инжекцией носителей заряда?

12. Что называют полупроводниковым диодом? Привести условное обозначение полупроводникового диода.

13. Какое явление называют пробоем диода? Перечислить виды пробоев. Привести реальные ВАХ диода.

14. Объяснить механизм лавинного пробоя диода.

15. Какие виды пробоя используются в качестве рабочих режимов в полупроводниковых диодах?

16. Привести определения режима диода по постоянному току и рабочей точки.

17. Привести определение режима диода по переменному току.

18. Дать определения статического и дифференциального сопротивлений диода.

19. Нарисовать линейную эквивалентную схему диода.

20. Вывести формулу (1.7), используя схему рис.1.7 и полагая  $r_0 = 0$ .



## **Программа лабораторной работы**

1. Получить у преподавателя диод для проведения исследований.
2. Собрать в программной среде EWB схему рис.1.8 и провести измерения прямой ветви ВАХ полученного диода. При измерениях необходимо так подбирать величину тока источника тока (см. пример 1), чтобы прямое напряжение на диоде изменялось в пределах от 0 до одного вольта с шагом 0,1 вольт.
3. Данные измерений занести в таблицу 1.1 и построить измеренную ВАХ диода.
4. Пользуясь схемой рис.1.8, провести измерения значений дифференциального сопротивления  $R_D$  (см. пример 1).
5. Пользуясь данными пункта 2 программы лабораторной работы рассчитать значения статического сопротивления  $R_C$ .
6. Полученные значения  $R_D$ ,  $R_C$  и  $U_{пр}$  свести в таблицу 1.2 (см. пример 1), и построить графики зависимостей  $R_C(U_{пр})$ ,  $R_D(U_{пр})$ .
7. Собрать схему рис.1.11 и, согласно приведенному выше примеру, провести оценку емкости  $C = C_{бар} + C_{диф}$  диода для значения напряжения  $U_{пр} = 0,7$  В.
8. Пользуясь схемой рис.1.11, провести измерения зависимости  $C(U_{пр})$ . Полученные данные оформить в виде таблицы 1.3 и построить график зависимости  $C(U_{пр})$ .
9. Собрать схему рис.1.12 и, согласно приведенному выше примеру, провести оценку емкости  $C_{бар}$  диода для значения напряжения  $U_{пр} = 0$  В.

### **Содержание отчета**

Отчет должен содержать:

1. Схему измерений прямой ветви ВАХ диода, таблицу результатов измерений (таблица 1.1), график измеренной прямой ветви ВАХ диода.



2. Таблицу результатов измерений и расчетов дифференциального и статического сопротивлений диода (таблица 1.2), графики зависимостей  $R_C(U_{ПР}), R_D(U_{ПР})$ .

3. Схему измерений и результаты оценки емкости  $C = C_{бар} + C_{диф}$  диода для значения напряжения  $U_{ПР} = 0,7$  В.

4. Таблицу результатов измерений (таблица 1.3) и график измеренной зависимости  $C(U_{ПР})$ .

5. Схему измерений и результаты оценки емкости  $C_{бар}$  диода для значения напряжения  $U_{ПР} = 0$  В.

### ***Задачи для самостоятельного решения***

Согласно программе лабораторной работы провести исследования следующих диодов. Диод выбирается из библиотеки National (группа 1) или из библиотеки General (группа 2), причем номер варианта совпадает с порядковым номером диода в списке.