

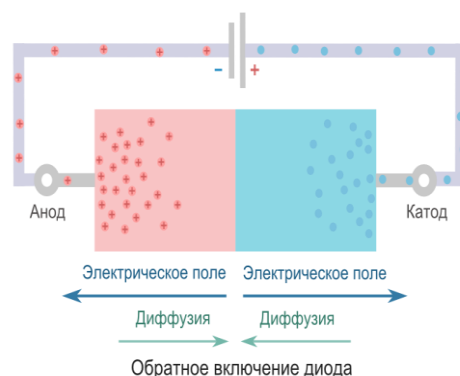
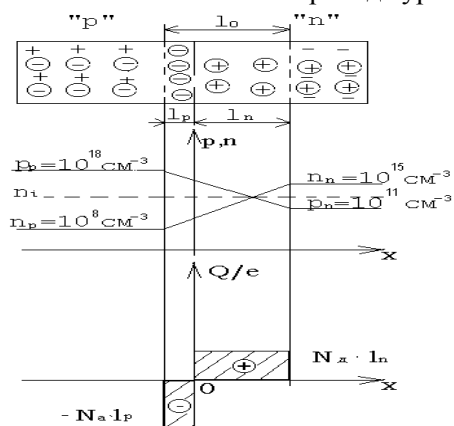
Л.3. Характеристики, параметры, модели полупроводниковых диодов. Особенности выполнения лабораторных по диодам в Microcap, Multisim, Mathcad.

**Полупроводниковый диод** - самый простой полупроводниковый прибор, состоящий из одного P-N перехода. Основная его функция - это проводить электрический ток в одном направлении, и не пропускать его в обратном.



Диод в состоянии покоя, когда ни к аноду, ни к катоду не подключено напряжения.

В части N имеются в наличии свободные электроны – отрицательно заряженные частицы. В части P находятся положительно заряженные ионы – дырки. В результате соприкосновения p-n частей на межатомное расстояние, заряды разных знаков проникают в соседнюю часть и образуют электрическое поле, направленное навстречу движению основных зарядов полупроводников и **контактную разность потенциалов  $\delta\varphi = E \cdot l$** . Величина этого барьера зависит от материала полупроводника, концентрации примесей и температуры. Если небольшая часть основных носителей все же проникает через барьер и образует диффузионный ток, то он уравнивается током неосновных носителей (дрейфовым), для которых барьер является, наоборот, ускорителем. Эти токи в состоянии покоя перехода уравниваются (величина их мала - наноамперы).



**Обратное включение диода.** Подключим источник питания - плюс к катоду, минус к аноду.

Электроны из N-области начнут движение к плюсу и отдалятся от PN перехода. Аналогично, дырки из P-области будут притягиваться к минусу, и также отдалятся от PN перехода. Переход расширяется, контактная разность потенциалов увеличивается, сопротивление перехода для основных носителей возрастает. Ток неосновных носителей немного увеличивается.

**Барьерная емкость р-п-перехода.** Заряды по обе стороны р-п-перехода, разделенные контактной разностью потенциалов перехода, образуют емкость  $C_{бар} = Q/U_k$ . Эта емкость является предметом изучения 2-й лабораторной работы, поскольку широко используется в технике.

**Пробой** (явление паразитной проводимости) в п – р – переходе.

**Тепловой пробой** – возникает при обратном включении п – р – перехода при нарушении теплового баланса, когда приток тепла за счёт прохождения тока превышает его отвод, при этом повышается температура, следовательно увеличивается обратный ток, что приводит также к повышению температуры. Процесс разрушения структуры полупроводника невосстановим, прибор приходит в негодность.

**Лавинный пробой**, возникает при достаточно большом обратном напряжении, больше критического для данного материала. При этом электрон на длине свободного пробега приобретает энергию достаточную для ионизации узлов кристаллической решётки. В результате возникает лавинное размножение носителей зарядов.

**Туннельный пробой.** Энергетические зоны при легировании перехода искривляются настолько, что энергетический уровень валентной зоны становится выше уровня проводимости. В результате возможен переход носителей заряда из одной области в другую, практически без потребления энергии.

Туннельный и лавинные пробой при ограничении тока не являются необратимыми, не приводят к разрушению p – p – перехода, если ограничить ток пробоя.

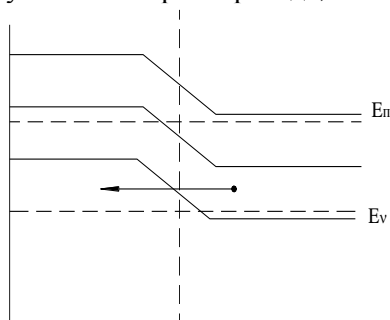


Рис. Энергетическая диаграмма при пробоях

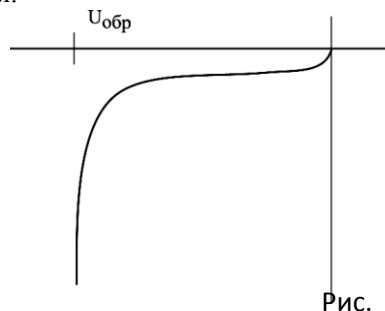
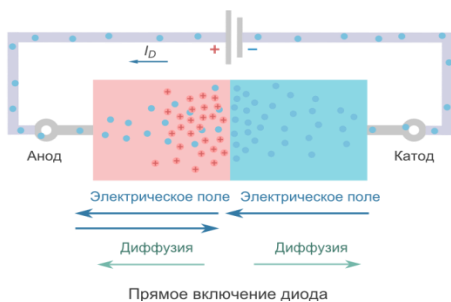


Рис.

Обратная ветвь вольт – амперного перехода при лавинном и туннельном пробоях.

### Прямое включение диода

Меняем полярность источника питания - плюс к аноду, минус к катоду. Внешнее напряжение уменьшает барьер до его полного исчезновения. Отрицательно заряженные электроны от минуса движутся в сторону p-n перехода, положительно заряженные дырки от плюса направляются навстречу электронам. Встретившись на переходе, малая часть из них рекомбинирует (заполняет место в атомах, где не хватает электрона), остальные устремляются к своему полюсу батарейки. **Сопротивление основным носителям резко падает, диффузионный ток  $I_D$  резко возрастает.**



### Недостатки реального полупроводникового диода:

- при прямом подключении, напряжение между анодом и катодом должно достигнуть определенного значения  $V_{\gamma}$ , для того чтобы диод начал хорошо проводить ток. Для кремниевых приборов  $V_{\gamma}$  - это примерно 0.75V, а для германиевых - около 0.4V.
- при обратном подключении напряжения в реальном диоде возникает маленький ток, измеряемый в микро или наноамперах.
- любому включению диода сопутствует паразитная емкость.

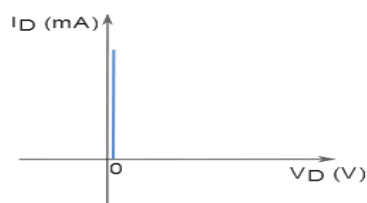
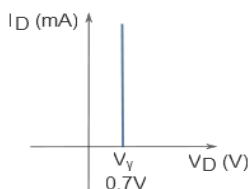


График зависимости тока от напряжения на идеальном диоде

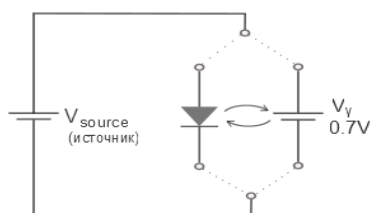


Представление модели на графике

### Приближенные модели диодов

Основная задача обычного выпрямительного диода – *проводить электрический ток в одном направлении, и не пропускать его в обратном*. Следовательно, идеальный диод должен быть очень хорошим проводником с нулевым сопротивлением при прямом подключении напряжения (плюс — к аноду, минус — к катоду), и абсолютным изолятором с бесконечным сопротивлением при обратном. Такая модель диода используется в случаях, когда важна только **логическая** функция прибора. Например, в цифровой электронике.

Представление модели в цепи. Диод условно можно заменить эквивалентным напряжением. Его направление будет обратно напряжению источника.



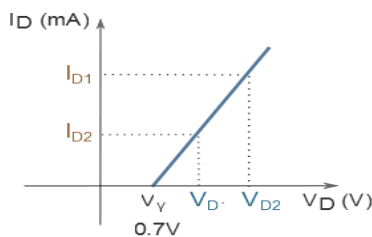
Приближенная модель "Идеальный диод +  $V_{\gamma}$ "

### Приближенная модель диода

#### «идеальный диод + $V_{\gamma}$ »

Самой простой и часто используемой является приближенная модель первого уровня. Она состоит из идеального диода и, добавленного к нему, напряжения порога проводимости  $V_{\gamma}$ .

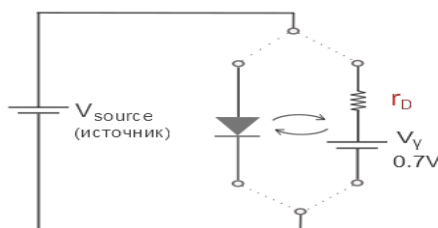
Иногда используют чуть более сложную и точную приближенную модель второго уровня. В этом случае добавляют к модели первого уровня внутреннее сопротивление диода, преобразовав его функцию из экспоненты в линейную.



$$r_D = \frac{V_{D2} - V_{D1}}{I_{D2} - I_{D1}}$$

Представление модели на графике

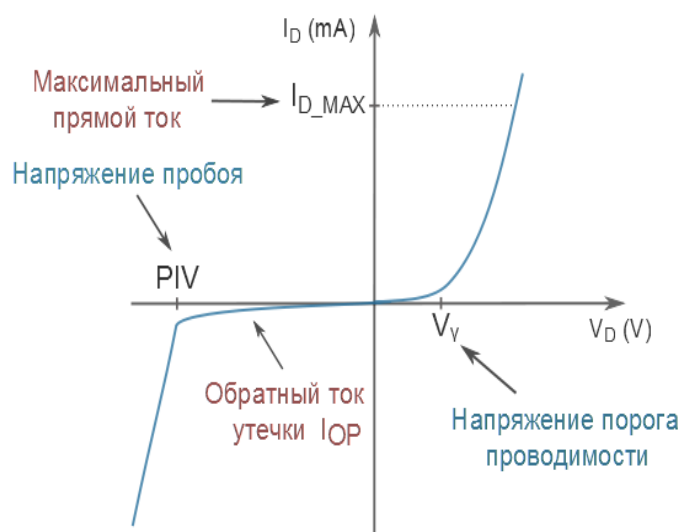
Представление модели в цепи. Диод условно можно заменить эквивалентным напряжением  $V_Y$  с сопротивлением  $r_D$ . Значение  $r_D$  вычисляется по формуле, приведенной под графиком слева.



Приближенная модель диода «идеальный диод +  $V_Y + r_D$ »

Приближенная модель "Идеальный диод +  $V_Y + r_D$ "

## ВАХ реального полупроводникового диода



Зависимость тока от напряжения в настоящем диоде

$V_Y$ (гамма) — **напряжение порога проводимости**. При прямом включении напряжение на диоде должно достигнуть определенного порогового значения —  $V_Y$ , при котором PN-переход открывается достаточно, чтобы диод начал проводить ток.  $V_Y$  у кремниевых приборов примерно 0.7V, у германиевых — около 0.4V.

$I_{D\_MAX}$  — **максимальный ток** через диод при прямом включении. Если ток превышает этот предел, диод перегревается, разрушается полупроводник. Зависит от технологии и структуры перехода.

$I_O$  — **обратный ток утечки**. При обратном включении диод не является абсолютным изолятором и имеет конечное сопротивление. Ток утечки у германиевых приборов достигает 200  $\mu A$ , у кремниевых - десятки нА.

**PIV (Peak Inverse Voltage) — Напряжение пробоя**. Если внешняя разность потенциалов превышает это значение, диод резко понижает свое сопротивление и превращается в

проводник.

**Паразитная емкость PN-перехода**. Даже если на диод подать напряжение значительно выше  $V_Y$ , он не начнет мгновенно проводить ток. Причиной этому является паразитная емкость PN перехода, на наполнение которой требуется время. Частотные свойства p-n перехода определяются двумя видами ёмкости перехода: **барьерной и диффузионной**. **Барьерная ёмкость** обусловлена неподвижными зарядами ионов донорной и акцепторной примеси.

$$C = \frac{\epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot S_{p-n}}{\Delta x}$$

$S_{p-n}$  — площадь p-n перехода;  $\Delta x$  — толщина перехода.  $S_{p-n} = S_{барьерн.} + S_{диф.}$

**Диффузионная ёмкость**, обусловлена диффузией подвижных носителей заряда через p-n

переход при прямом включении.

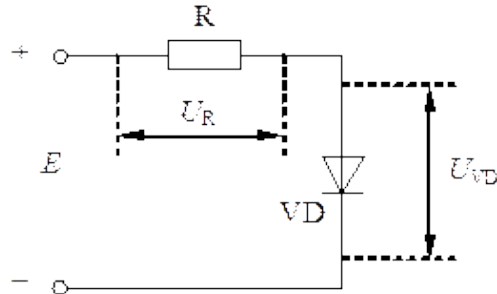
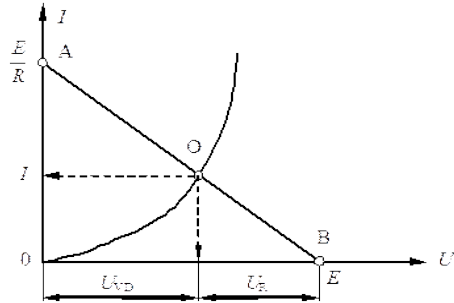
$$C_{диф} = \frac{Q}{U_{np}}$$



**Статический режим**. При расчёте статического режима необходимо построить на ВАХ диода нагрузочную прямую АВ.

**Рабочая точка** (режим покоя) характеризуется или значением постоянного напряжения на диоде  $U_D$ , или значением постоянного тока диода  $I_D$  (между ними существует однозначная связь). Поскольку диод - нелинейный прибор, то статическое сопротивление является функцией рабочей точки:  $R_D = F(U_D)$  или  $R_D = F(I_D)$ .

Обычно известны  $E$ ,  $R$  и дана ВАХ диода. Нагрузочная прямая (статический режим) строится из уравнения закона Ома для полной цепи:  $E = U_{VD} + I \cdot R$ . Если диод полностью открыт, то максимальный ток определяется сопротивлением  $R$ . Если диод заперт, то напряжение равно сумме падений напряжений на диоде и сопротивлении  $R$ .



### Нелинейные модели полупроводникового диода

**ВАХ полупроводникового диода** использует уравнение, которое связывает концентрацию носителей заряда в любой точке полупроводника с параметрами электрического поля в полупроводнике, скоростью генерации и рекомбинации носителей заряда, диффузией носителей и временем. При этом **идеальная**, с учетом некоторых допущений (**нулевая ширина p-n-перехода, отсутствие омического сопротивления базовой области перехода, отсутствие явлений пробоя перехода и поверхностных состояний**), ВАХ перехода имеет вид:

$$I = I_0 \cdot \left( e^{\frac{U}{\Phi_T}} - 1 \right); \quad \text{здесь } I_0 = q \cdot S \cdot \left( \frac{D_p p_{n0}}{L_p} + \frac{D_n n_{p0}}{L_n} \right),$$

где  $q$  - заряд электрона,  $S$  - площадь p-n-перехода,  $p_{n0}$ ,  $n_{p0}$  - концентрации неосновных носителей в областях n-и p-, соответственно;  $D_p$ ,  $D_n$  - коэффициенты диффузии дырок и электронов,  $L_p$ ,  $L_n$  - ширина (толщина)

p-n перехода в области полупроводника p-n- типа.  $\Phi_T = kT/q$

В реальном p-n-переходе в обеднённом слое имеет место как **генерация, так и рекомбинация носителей зарядов**, т.е. первое допущение, принятое для идеализированного p-n-перехода, не выполняется. В ВАХ вводят коэффициент  $m = 1 \div 2$ , учитывающий неидеальность обеднённого слоя. В таком виде статическую ВАХ p-n-перехода аппроксимируют выражением

$$I = I_s (\exp(eU/mkT) - 1),$$

где  $I_s$  - ток насыщения при обратном смещении на диоде;  $e$  - заряд электрона;

$U$  - напряжение на диоде;  $m$  - коэффициент неидеальности ВАХ;

$k$  - постоянная Больцмана;  $T$  - абсолютная температура. Точность модели невысока.

Нелинейными свойствами обладает обеднённый слой и собственно неидеальность p-n-перехода выражают как  $U_{p-n} = U/m$ .

**Электрические сопротивления**  $R_p$  и  $R_n$  нейтральных p- и n-областей хотя и малы

относительно  $R_{CT}$ , но достаточно велики по абсолютной величине и могут составлять единицы и даже десятки Ом. Поэтому ими пренебрегать нельзя, как это сделано в третьем допущении, а эквивалентная схема замещения реального полупроводникового диода (рис. 2.1) будет отличаться от схемы идеального диода.

**Суммарное сопротивление**  $R_{\Sigma} = R_p + R_n$ , учитывающее свойства нейтральных p- и n-областей, называют **базовым** сопротивлением диода.

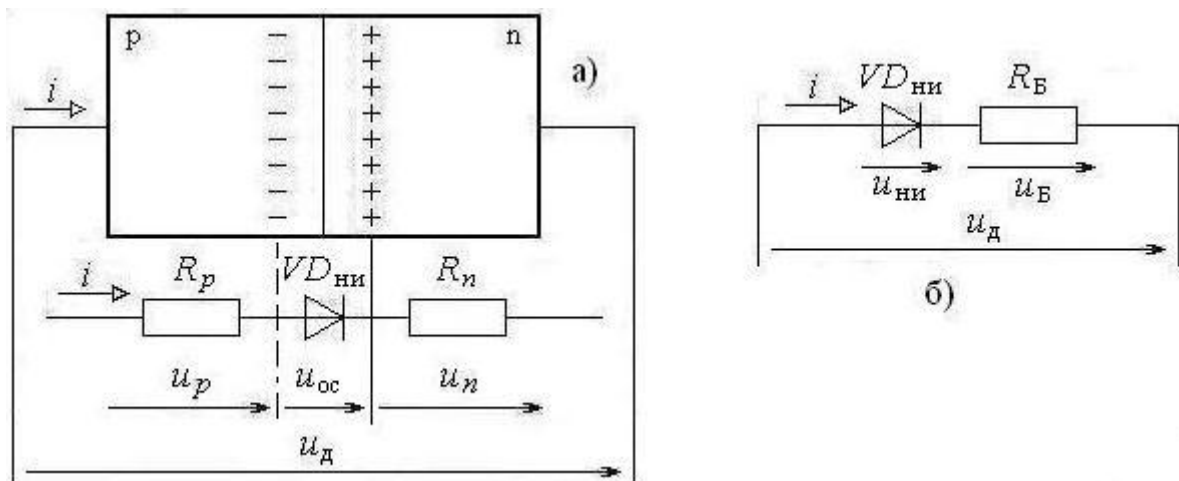
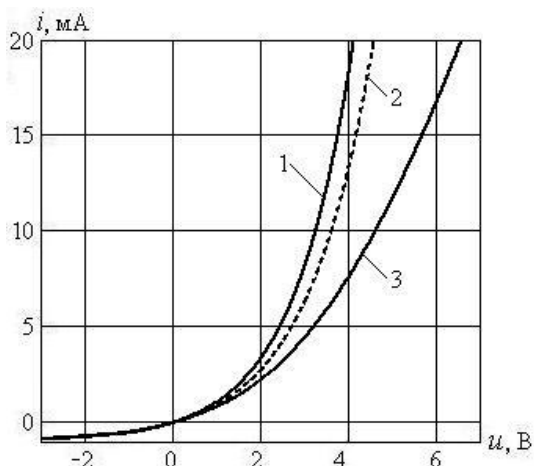


Рис. 2.1. Структура (а) и эквивалентная схема реального полупроводникового диода с  $p$ - $n$ -переходом (б)

На **базовом сопротивлении** при протекании тока имеет место падение напряжения  $U_Б = i R_Б$ . Поэтому формула (2.1) может быть преобразована к виду

$$i = I_c(T) \cdot \left( \exp \frac{U_Д - i R_Б}{m \phi_T} - 1 \right). \quad (2.3)$$

Вольтамперная характеристика полупроводникового диода с реальным  $p$ - $n$ -переходом приведена на рис. 2.2. Это ее снимаем в лаб. 1.



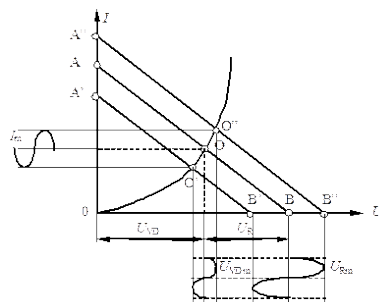
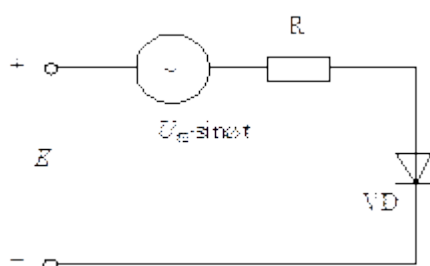
С ростом прямого тока падение напряжения на базовой области диода может стать сравнимым с напряжением на  $p$ - $n$ -переходе, т.е.  $i R_Б \approx U_Д$ . При этом на ВАХ диода появится почти линейный участок. При дальнейшем увеличении прямого тока сопротивление  $R_Б$  начинает уменьшаться из-за увеличения концентрации инжектированных в базу носителей заряда. ВАХ снова начнёт отклоняться от прямой линии. Это явление называют **эффектом модуляции сопротивления базы**. Однако данный эффект учитывать не будем.

Рис.2.2 ВАХ идеального (1), неидеального (2) и реального (3) переходов.

Величины  $m$  и  $R_Б$  непосредственно в справочных данных обычно не приводят. Поэтому значения этих параметров надо вычислять по формуле (2.3), используя семейство характеристик  $I_{np} = f(U_{np}, t^\circ)$ , приводимых в отдельных справочниках в виде графиков для конкретного типа диода.

### Модели идеализированного и реального $p$ - $n$ -переходов в динамическом режиме работы.

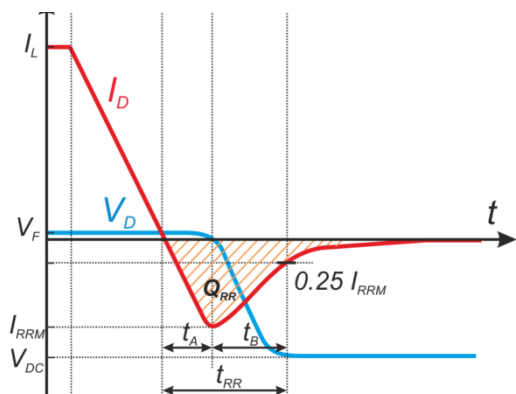
Если в в схеме с диодом действуют одновременно источники постоянного  $E$  и переменного тока  $U = U_m \sin \omega t$ , такой режим работы называется **динамическим**.



**Нагрузочная прямая АВ на ВАХ диода** строится так же, как и в предыдущем примере по точке холостого хода и



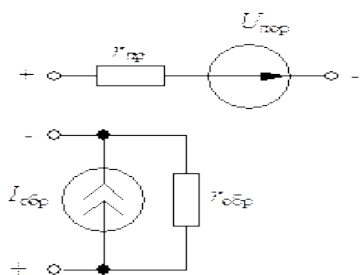
точке короткого замыкания. Получившаяся при построении рабочая точка О определяет *режим схемы по постоянному току*. При изменении переменного напряжения от  $-U_m$  до  $+U_m$  нагрузочная прямая перемещается параллельно самой себе, и рабочая точка также смещается от О' до О". Проекция перемещения рабочей точки на ось токов (у) даёт значение амплитуды переменного тока в схеме, а на ось напряжений (х) – значение амплитуды напряжения на диоде.



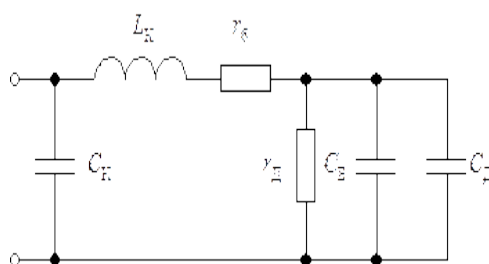
Переключение полупроводникового диода из проводящего соединения в закрытое происходит не сразу, а по истечении какого-то времени, т.к. при этом **p-n переход** должен освободиться от накопленного заряда. Время накопления заряда для маломощных диодов составляет 10-100нс. Период колебания входного напряжения должен быть больше времени накопления заряда. Если такое правило не соблюдается, то диод теряет свои свойства. Быстродействие диода, то есть свойство быстро восстанавливать обратную проводимость, является важной характеристикой для диодов, работающих в

условиях быстрой смены полярностей напряжения прикладываемого к диоду.

Эквивалентная схема для постоянного тока учитывает наличие у диода прямого и обратного динамического сопротивления, а пороговое напряжение и обратный ток представлены соответствующими генераторами напряжения и тока. Эквивалентная схема для переменного тока учитывает наличие у диода **динамического сопротивления p-n перехода  $r_d$ , объёмного сопротивления p и n областей  $r_b$ , барьерной и диффузионной ёмкостей  $C_b$  и  $C_d$** , а также индуктивности и ёмкости выводов диода  $L_K$  и  $C_K$  (учитывается на частотах выше 30 МГц). С ростом частоты сигнала влияние ёмкости возрастает.



а)



б)

Рис. Эквивалентные схемы полупроводникового диода:  
а – для постоянного тока; б – для переменного тока.

Максимально допустимой частотой работы диода  $f_{max}$  считается частота, на которой ёмкостное сопротивление закрытого p-n перехода  $X_C$  становится равным дифференциальному сопротивлению  $r_{обр}$ :

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{max} \cdot C_b} = r_{обр} \quad f_{max} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_{обр} \cdot C_b} - \text{максимально допустимая частота работы.}$$

В динамическом режиме работы важную роль играют **дифференциальное сопротивление и ёмкость p-n-перехода**.

**Дифференциальное сопротивление**  $R_{диф} = du/di$  представляет собой величину, обратную крутизне вольтамперной характеристики p-n-перехода. **Связь между приложенным напряжением и током диода нелинейная, и закон Ома для диода не выполняется.** Преобразуя формулу (2.1) для идеализированного p-n-перехода к виду

$$u = \varphi_T \cdot \ln \left( 1 + \frac{i}{I_0} \right), \quad (2.4)$$

$$R_{\text{диф}} = \frac{du}{di} = R_B + \frac{m\varphi_T}{i + I_0}, \quad (2.7)$$

получаем выражение

При  $u < 0$  дифференциальное сопротивление больше статического, а при  $u > 0$  имеет место обратное соотношение (рис. 2.2). Начиная с некоторого напряжения, сопротивление диода почти целиком определяется сопротивлением объема полупроводника  $R_v$ , нелинейное сопротивление контакта становится пренебрежимо малым, а ВАХ - близка к линейной.

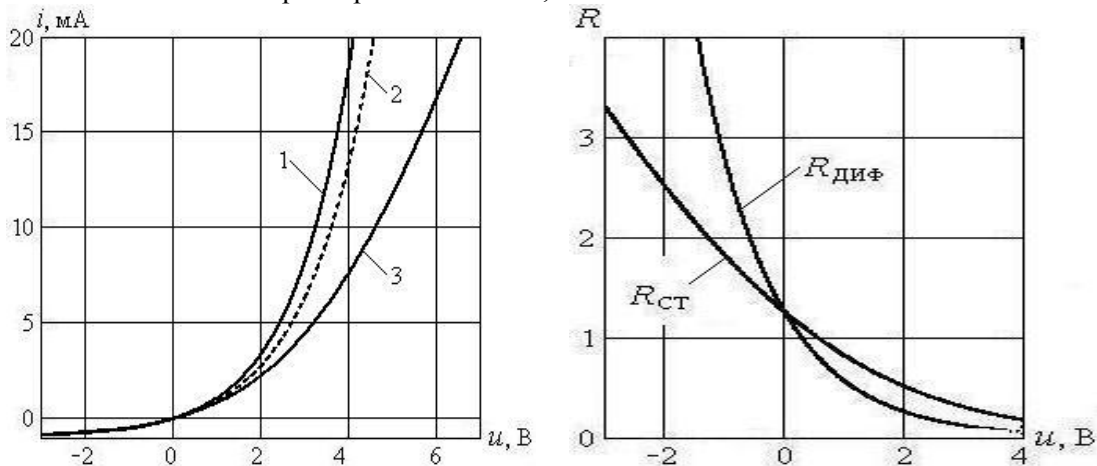
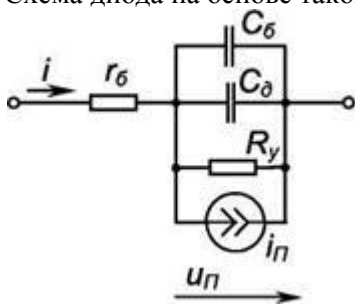


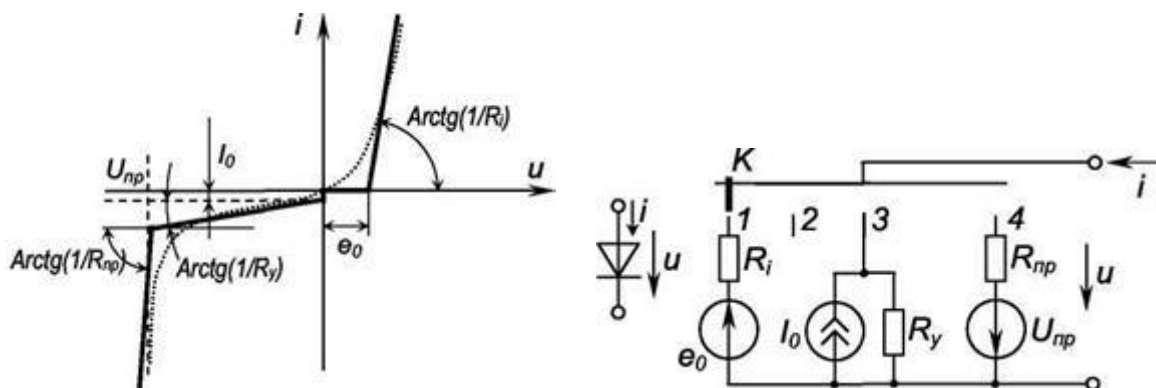
Рис. 2.2. а) Вольтамперная характеристика полупроводникового диода (1 – с идеализированным  $p$ - $n$ -переходом, 2 – с учётом неидеальности ( $m = 1,5$ ) обеднённого слоя, 3 – с реальным  $p$ - $n$ -переходом), б) Сравнительные характеристики статического и дифференциального сопротивлений полупроводникового диода

Реальная ВАХ отличается от идеальной наличием участка **рекомбинационной составляющей прямого тока, термогенерационной составляющей обратного тока, токами утечки, явлениями пробоя на обратной ветви ВАХ, наличием сопротивления базовой области  $p$ - $n$ -перехода и емкостями  $p$ - $n$ -перехода, характеризующими инерционность процессов в приборе.** Схема диода на основе такой аппроксимации имеет вид:

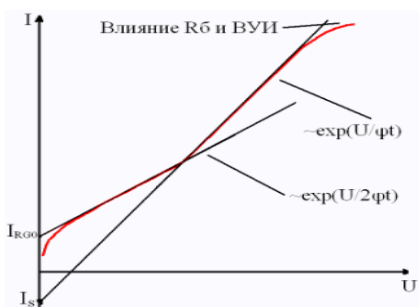


$$i = (i_n + i_y) = I_0 \cdot \left( e^{\frac{u - i \cdot r_б}{m \cdot \varphi_T}} - 1 \right) + \frac{u - i \cdot r_б}{R_y} - I_0 \cdot e^{A \cdot (U_{np} + B \cdot u)}$$

где  $i_n(u_n)$  - нелинейный источник тока,  $I_0$  - тепловой ток прибора,  $r_б$  - сопротивление базовой области перехода,  $m$  - коэффициент, учитывающий реальную конфигурацию перехода,  $U_{np}$  - напряжение лавинного или туннельного пробоя перехода,  $A, B$  — коэффициенты аппроксимации ВАХ вблизи участка пробоя, причем  $A < 0, B > 0$ ;  $R_y$  - сопротивление утечки  $p$ - $n$ -перехода. Многие величины, входящие в модель - нелинейные.



Положение ключа К на указанной модели определяется из кусочно-линейной аппроксимации.



При больших напряжениях, высоких уровнях инжекции, падение напряжения на омической области начинает быть соизмеримо с падением напряжения на области пространственного заряда, ток начинает расти медленнее. Поэтому форма ВАХ диода при больших напряжениях отличается от ВАХ идеального р-п-перехода.

### \*) ПРОХОЖДЕНИЕ ИМПУЛЬСА ПРЯМОГО ТОКА ЧЕРЕЗ ДИОД

Режим **малого** (диод в рабочей точке, уровень сигнала от ед. мкВ до 100мВ) и **большого** (цифрового сигнала, уровень больше 800 мВ).

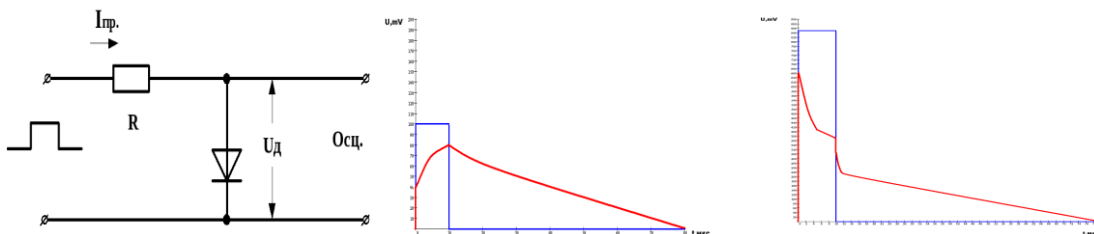
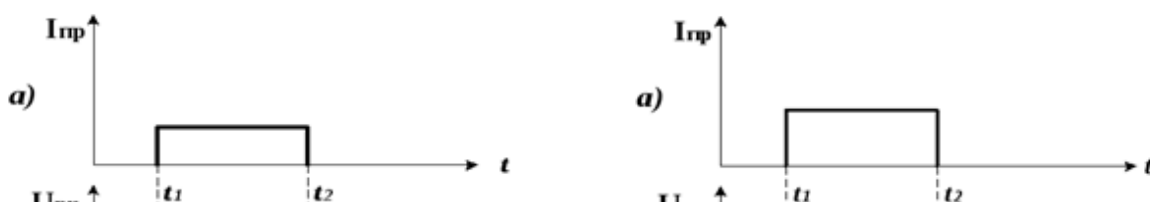


Рис.1. Схема включения диода. Уровни инжекции а) низкий 100mV б) высокий 800mV



При низком уровне инжекции сопротивление диода постоянно, поэтому падение напряжения на диоде  $U_d = U_{pn} + U_B$  для низкого уровня инжекции зависит от времени как показано на рис.3г.

Сопротивление диода определяется лишь геометрическими размерами и удельным сопротивлением исходного полупроводника  $r_B$  (немодулированное сопротивление базы  $r_{B0}$ ).

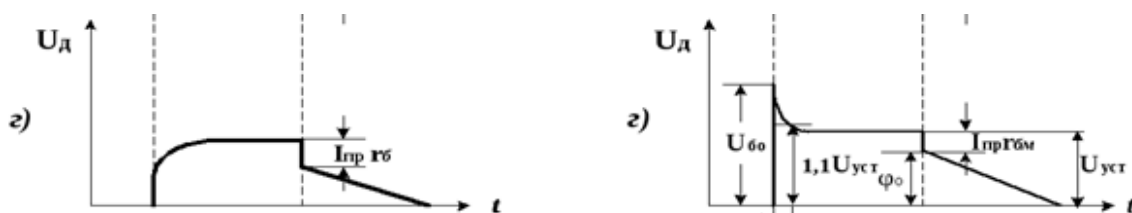


Рис.3 слева. Переходные процессы при включении диода (малый сигнал): а – входной импульс; г – форма изменения выходного напряжения. Справа. Переходные процессы для высокого уровня инжекции: а – входной импульс; г – форма изменения выходного напряжения.



Для высокого уровня инжекции по мере протекания прямого тока в областях, примыкающих к р-п переходу, на расстоянии порядка одной-двух диффузионных длин, концентрация подвижных носителей заряда увеличивается. Это приводит к уменьшению удельного сопротивления диода и снижению полного сопротивления. Выброс напряжения при скачке тока указывает на индуктивный характер входного сопротивления диода.

## ПРОЦЕСС ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ДИОДА С ПРЯМОГО НАПРАВЛЕНИЯ НА ОБРАТНОЕ.

В момент переключения  $t'$  ток меняет направление, но концентрация дырок в базе  $p_n(0)$  около р-п перехода не может мгновенно уменьшиться. Начинается рассасывание накопленного заряда дырок в базе и диод имеет прямое смещение. Сопротивление прямосмещенного перехода будет мало и величина обратного тока  $I_{обр} \approx U_{обр}/R_n$ , где  $U_{обр}$  – амплитуда импульса обратного напряжения,  $R_n$  – сопротивление нагрузки. Этот процесс будет продолжаться в течение некоторого времени  $t_1 = t^{IV} - t'$ , за которое концентрация дырок в базе около р-п перехода уменьшится до равновесного значения  $p_n(0) = p_{n0}$  (рис.6). При этом напряжение на р-п переходе уменьшится до нуля (рис.6,в).



Рис.6. Переходные процессы при переключении диода:  
а – входной импульс; б – форма изменения тока через диод; в – форма изменения напряжения на р-п переходе.

Одной из первых удачных программ математического компьютерного моделирования РЭУ была программа (и язык схмотехнического моделирования) **SPICE** (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis), разработанная в начале 70-х годов XX столетия в Калифорнийском университете для больших ЭВМ, в конце 80-х годов эта программа была адаптирована (приспособлена) для ПЭВМ и получила название PSpice. Эта программа оказала сильное влияние на последующие подобные разработки. Язык **SPICE** использован для моделирования цифровых узлов с использованием электрических сигналов.

В системе **PSpice** использован **таблично-топологический (или узловый) метод** описания схемы: - выделяются узлы и указывается, какие элементы установлены между этими узлами. Связи моделируются при помощи матрицы инцидентности. Программа автоматически составляет алгебраические и дифференциальные уравнения для описания работы моделируемого устройства. Язык SPICE и системы на его основе используются во многих САПР. Для логических устройств предусмотрен расчет на основе булевой алгебры.

## Диоды. Параметры и Spice – модели.

Модели диодов основаны на характеристиках отдельных устройств, описанных в технических описаниях на конкретные продукты, и на характеристиках технологических процессов, которые не указаны в описаниях на устройства. Программа моделирования схем **SPICE** в процессе моделирование работы схем обеспечивает и моделирование работы диодов. Модель состоит из **эквивалентной схемы и списка параметров**, которые участвуют в определении параметров эквивалентной схемы по формулам в том или ином режиме.\* **DIODE** – стандартная **SPICE-модель** кремниевого диода на основе р-п-перехода. Данная модель поддерживается рядом программ САПР (Multisim, Spectre (Cadence)), и включает в себя две модели: **level-1** и **level-2**. Модель **level-1** описывает прямую и обратную ВАХ, пробой, паразитное сопротивление, барьерную и диффузионную емкости, емкость перекрытия и шумы. Модель **level-2** используется

для моделирования туннельного тока по Фаулеру в очень тонких слоях диэлектриков, таких как диоксид кремния и применяется в БИС.

## **Диод на основе p-n перехода**

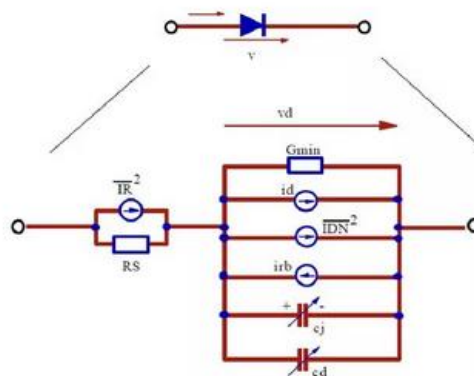
Berkeley SPICE модель диода

Прямой и обратный ток

$$i_d = I_S \cdot \left( e^{\frac{v_d}{N \cdot V_T}} - 1 \right) + G_{min} \cdot v_d$$

Предпороговый ток

$$i_{rb} = I_{BV} \cdot \left( e^{\frac{v_d + BV}{V_T}} - 1 \right)$$



### **Расшифровка SPICE параметров диодов**

Обозначение	Название	Параметр	Единицы измерения	Значение по умолчанию
$I_S$	IS	Обратный ток насыщения	А	1E-14
$R_S$	RS	Паразитное сопротивление (последовательное сопротивление)	Ом	0
$n$	N	Коэффициент эмиссии, от 1 до 2	—	1
$t_D$	TT	Время переноса заряда	с	0
$C_D(0)$	CJO	Емкость перехода при нулевом смещении	Ф	0
$\phi_0$	VJ	Контактная разность потенциалов перехода	В	1
$m$	M	Коэффициент плавности перехода 0,33 для линейно легированного перехода 0,5 для лавинного перехода	—	0,5
$E_g$	EG	Ширина запрещенной зоны Si (кремний) Ge (германий) Шоттки	эВ эВ эВ эВ	1,11 1,11 0,67 0,69
$p_i$	XTI	Температурный экспоненциальный коэффициент тока насыщения pin переход Шоттки	— — —	3,0 3,0 2,0
$k_f$	KF	Коэффициент фликер-шума	—	0
$a_f$	AF	Показатель степени в формуле фликер-шума	—	1
FC	FC	Коэффициент емкости обедненной области при прямом смещении	—	0,5
BV	BV	Обратное напряжение пробоя	В	$\infty$
IBV	IBV	Обратный ток пробоя	А	1E-3

SPICE параметры некоторых диодов: sk = Шоттки, Ge = германий, остальные = кремний

Элемент	IS	RS	N	TT	CJO	M	VJ	EG	XTI	BV	IBV
По умолчанию	1E-14	0	1	0	0	0.5	1	1.11	3	$\infty$	1m
1N5711 sk	315n	2.8	2.03	1.44n	2.00p	0.333	-	0.69	2	70	10u
1N5712 sk	680p	12	1.003	50p	1.0p	0.5	0.6	0.69	2	20	-
1N34 Ge	200p	84m	2.19	144n	4.82p	0.333	0.75	0.67	-	60	15u
1N4148	35p	64m	1.24	5.0n	4.0p	0.285	0.6	-	-	75	-
1N3891	63n	9.6m	2	110n	114p	0.255	0.6	-	-	250	-
10A04 10A	844n	2.06m	2.06	4.32u	277p	0.333	-	-	-	400	10u
1N4004 1A	76.9n	42.2m	1.45	4.32u	39.8p	0.333	-	-	-	400	5u
1N4004 тех.описание	18.8n	-	2	-	30p	0.333	-	-	-	400	5u

Информация для моделирования.

Самый простой подход для получения **SPICE параметров** - посмотреть техническое описание на сайте производителя (таблица ниже). Во втором случае – измерение параметров реального устройства. Затем вычислить, сравнить и подогнать параметры SPICE модели к результатам измерений (Лабораторные работы).

Техническое описание (производителя).

**1) Обратное максимальное напряжение  $U_{обр}$**  – которое он выдерживает при подключении в обратном направлении, при этом через него будет протекать ток  $I_{обр}$  – **сила тока при обратном подключении диода**. При превышении обратного напряжения в диоде возникает так называемый лавинный пробой, в результате этого резко возрастает ток, что может привести к полному тепловому разрушению диода.

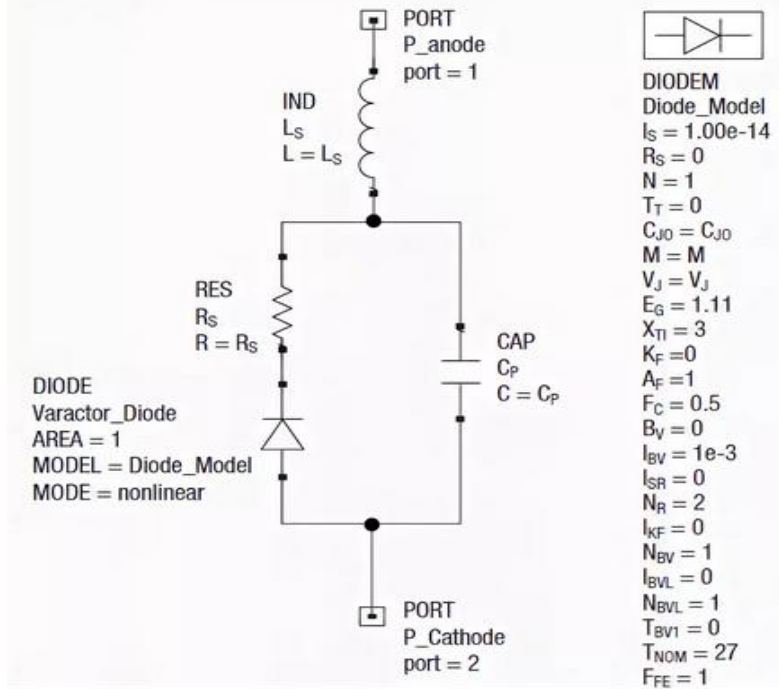
**2) Максимальный прямой ток  $I_{пр}$**  – это максимальный ток, который может течь через диод в прямом направлении.

**3) Максимальная частота  $F_d$** , которую нельзя превышать. Если частота будет больше, то диод будет работать неправильно.

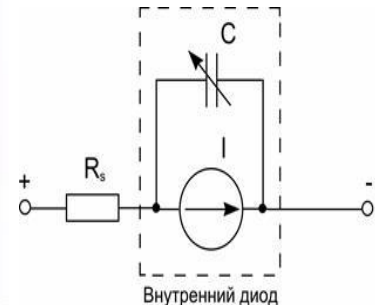
Табличные данные из технического описания на диод 1N4004

Параметр	Значение	Размерность
Максимальный средний выпрямленный ток $I_D$	1	А
Пиковое повторяющееся обратное напряжение $V_{RRM}$	400	В
Пиковый прямой импульсный ток $I_{FSM}$	30	А
Общая емкость $C_T$	15	пФ
Прямое падение напряжения $V_F$	1	В
Прямой ток $I_F$	1	А
Максимальный обратный ток $I_R$	5	мкА
Максимальное обратное напряжение $V_R$	400	В

## SPICE Model

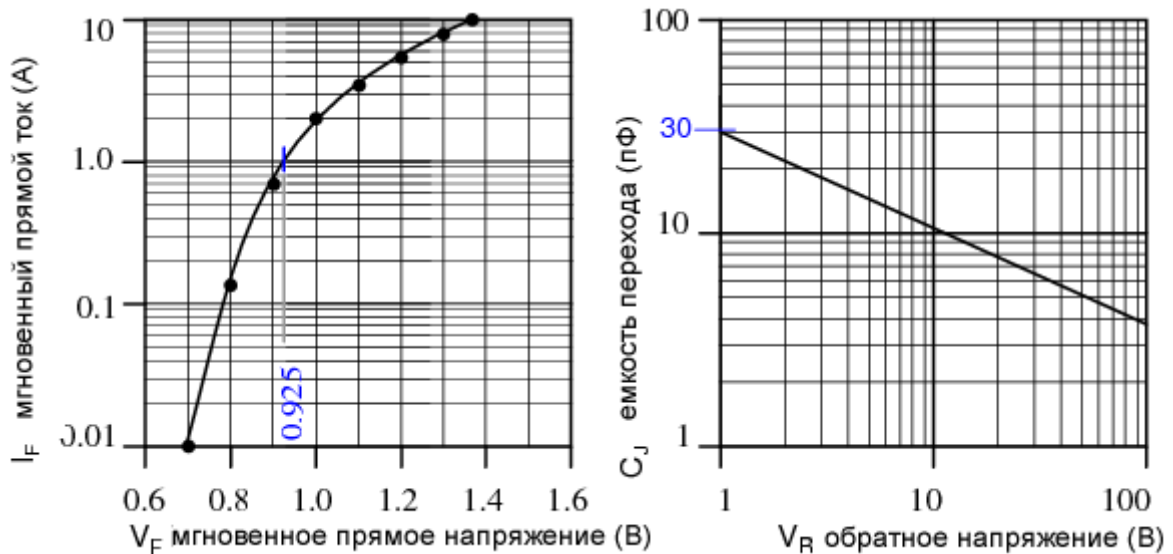


а) Общая



б) по постоянному току.

Некоторая информация, взятая из технического описания на 1N4004, приведена на рисунке ниже.



Графики из технического описания на диод 1N4004

Определение диода начинается с имени элемента диода, которое должно начинаться с "d" плюс необязательные символы (d101). Два номера узлов определяют подключение анода и катода к другим компонентам. За номерами узлов следует имя модели, ссылаясь на последующий оператор ".model".

Строка оператора модели начинается с ".model", за которым следует название модели, соответствующее одному или нескольким определениям диода. Затем "d" указывает, что работа диода должна моделироваться. Остальная часть объявления модели представляет собой список дополнительных параметров диода в виде ParameterName=ParameterValue. Список параметров диодов приведен в таблице ниже.

Основная форма: d[имя] [анод] [катод] [название\_модели]  
 .model ([название\_модели] d [parmtr1=x] [parmtr2=y] . . .)

Пример: D2 1 2 Da1N4004

**.model Da1N4004 D (IS=18.8n RS=0 BV=400 IBV=5.00u CJO=30 M=0.333 N=2)**

**N, Is и Rs** являются важными статическими параметрами по постоянному току. Ток насыщения  $I_s$  выводится из диодного уравнения, значения ( $V_D$ ,  $I_D$ ) на графике выше, и  $N=2$  ( $n$  в диодном уравнении).

$$I_D = I_s (e^{V_D / nV_T} - 1)$$

$V_T = 26$  мВ (при температуре 25°C)

$n = 2,0$

$V_D = 0,925$  В (при 1 А на графике)

$$1 \text{ А} = I_s (e^{(0,925 \text{ В}) / (2)(26 \text{ мВ})} - 1)$$

$$I_s = 18,8\text{E-}9$$

Числовые значения  $IS=18.8\text{n}$  и  $N=2$  приведены в последней строке таблицы выше для сравнения с моделью производителя 1N4004, которая значительно отличается. По умолчанию  $R_s$  установлено в значение 0.

**CJO** - емкость перехода при нулевом обратном смещении оценивается по графику зависимости  $C_j$  от  $V_R$ , который приведен выше. Емкость при ближайшем на графике к нулю напряжении составляет 30 пФ при 1 В. Если моделировать отклик на высокоскоростные переходы, как в импульсных источниках питания, то в модели должны быть учтены параметры  $TT$  и  $CJO$ .

**Коэффициент плавности перехода M** связан с профилем легирования перехода. Он не содержится в техническом описании устройств. Мы выбираем  $M = 0.333$ , что соответствует линейной плавности перехода. Мощные выпрямительные диоды в таблице выше используют более низкие значения  $M$ .

Многие другие диоды используют **VJ=0.6**, что показано в таблице выше.

Используйте значение по умолчанию **EG=1.11** для кремниевых и выпрямительных диодов.

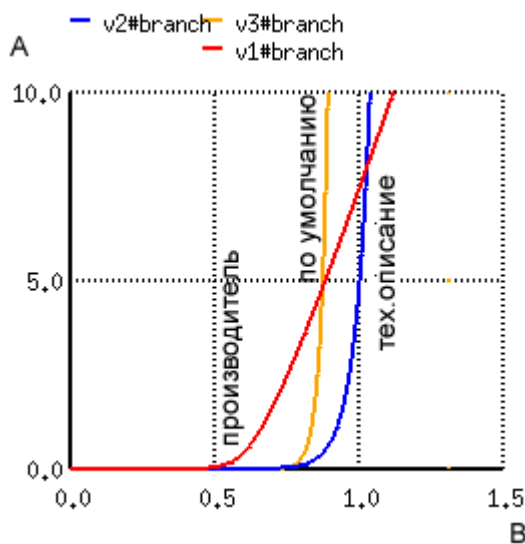
**XTI=3**, стандартный температурный коэффициент  $I_s$  для кремниевых устройств.

**IBV**, обратный ток пробоя, часто опускается, но может быть введен, если приведен и **BV**.

**TT,  $t_D$**  (время перехода) аппроксимируется из восстанавливаемого заряда  $Q_{RR}$ , параметра из технического описания (в нашем случае недоступного) и  $I_F$ , прямого тока.

$$I_D = I_s (e^{V_D / nV_T} - 1) \quad t_D = Q_{RR} / I_F$$

Принимаем  $TT=0$  из-за отсутствия  $Q_{RR}$ . Хотя было бы разумно взять  $TT$ , как у аналогичного выпрямительного диода 10A04 - 4.32u.  $TT$  диода 1N3891 не подходит, так как является выпрямителем с быстрым восстановлением.

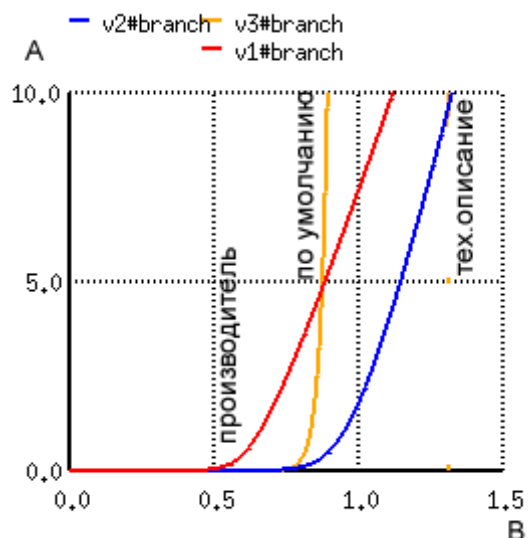


улучшения рассчитанной по техническому описанию модели по сравнению с моделью производителя и моделью по умолчанию.

Изменение  $R_s$  от 0 до 8m в модели по техническому описанию приводит к тому, что кривая пересекает 10 А (здесь не показано) при том же напряжении, что и модель производителя. Увеличение  $R_s$  до 28.6m смещает кривую дальше вправо, как показано на рисунке ниже. Это приводит к более точному соответствию нашей модели с графиком из технического описания (рисунок выше). В таблице ниже показано, что ток 1.224470e+01 А соответствует графику при 12 А.

Сравниваем три модели (производителя, модели по техническому описанию и модели диода по умолчанию при  $R_s = 0$ ) на рисунке ниже и данные графиков в таблице ниже.  $V_D$  - это напряжение, подаваемое на диод для сравнения токов модели производителя, нашей расчетной модели и модели диода по умолчанию. Последний столбец "1N4004 график" - это данные из вольт-амперной характеристики из технического описания, которая приведена на рисунке выше, и с которой наши результаты должны совпадать. Сравнение токов трех моделей с последним столбцом показывает, что модель по умолчанию хороша при низких токах; модель производителя хороша при больших токах; а наша рассчитанная по техническому описанию модель лучше всего при токах до 1 А. Точка на 1 А почти идеальна, поскольку расчет  $I_s$  основан на напряжении диода при 1 А. Наша модель сильно завышает значения тока выше 1 А.

Решение заключается в том, чтобы увеличить  $R_s$  со значения по умолчанию, которое равно  $R_s=0$ . Второе испытание для



где  $I_S$  - обратный ток насыщения,  $N$  - коэффициент эмиссии (неидеальности),  $IKF$  - SPICE-параметр диода, определяющий ток, соответствующий переходу в режим высокого уровня инжекции;  $ISR$  и  $NR$  - ток насыщения и коэффициент неидеальности для генерационно-рекомбинационного тока,  $VJ$  - контактная разность потенциалов перехода. Коэффициента  $M$  (для резкого перехода его величина равна  $1/2$ , для линейного -  $1/3$ ) Ток пробоя  $I_B$ ,  $IBV$  - ток начала «излома» ВАХ диода в области пробоя,  $BV$  - напряжение пробоя,  $FC$  - коэффициент барьерной емкости при прямом смещении,  $CJO$  - барьерная емкость при нулевом смещении на  $p$ - $n$ -переходе,  $TT$  - параметр, называемый **временем пролета**. SPICE-модель диода включает также шумовые параметры  $p$ - $n$ -перехода. Полная модель позволяет также моделировать температурные зависимости некоторых ее параметров.

Диоды классифицируются: - по материалу (селеновые, германиевые, кремниевые, арсенид-галлиевые); - структуре перехода (точечные, плоскостные); - назначению (выпрямительные, импульсные, стабилитроны и т.д.); - диапазону частот (низкочастотные, высокочастотные, сверхвысокочастотные диоды (СВЧ-диоды)); - виду вольт-амперной характеристики и т.д.

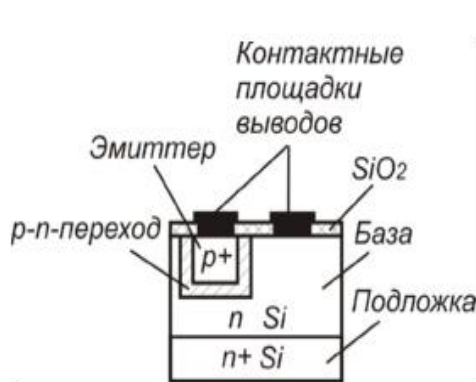


Рис. 3.4

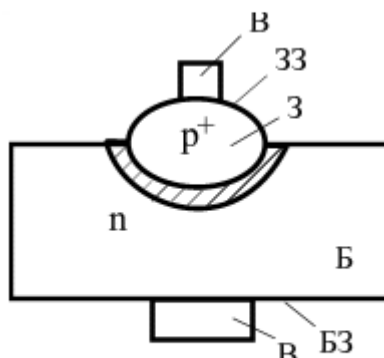
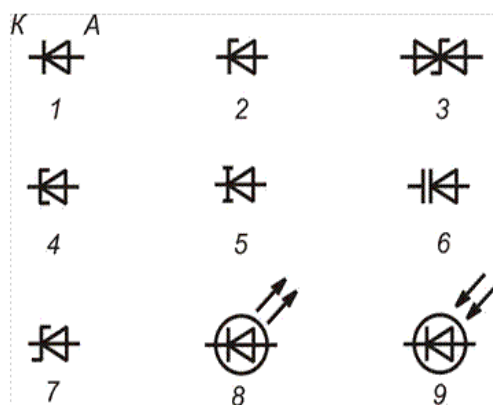


Рис. 3.1. Устройство полупроводникового диода

В зависимости от технологических процессов, используемых при изготовлении диодов, различают: точечные, микросплавные, сплавные, диффузионные, планарно-эпитаксиальные диоды и их разновидности. Устройство полупроводникового диода, изготовленного по планарно-эпитаксиальной технологии, приведено на рис. 3.4. Вся структура с электрическим переходом заключается в металлический, стеклянный, керамический или пластмассовый корпус для исключения влияния окружающей среды.



1 - общее обозначение (выпрямительный, импульсный, высокочастотный диод); 2 - стабилитрон; 3 - двуханодный стабилитрон; 4 - туннельный диод; 5 - обращенный диод; 6 - варикап; 7 - диод Шоттки; 8 - светодиод; 9 - фотодиод

Рис. 3.5

#### Система обозначений

**полупроводниковых диодов.** Для маркировки полупроводниковых диодов используется буквенно-цифровая система условных обозначений согласно ОСТ 11.336.919-81.

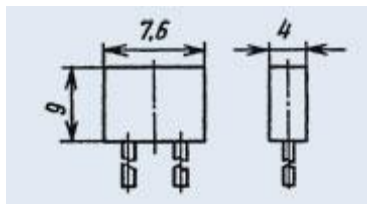
Диоды **КД212А** кремниевые, диффузионные

**Первый элемент** - буква или цифра, характеризует используемый материал: Г(1) - германий (Ge); К(2) - кремний (Si); А(3) - галлий (Ga) и его соединения; И(4) - индий In и его соединения. **Второй элемент** - буква, характеризует функциональное назначение диода: Д - выпрямительный; В - варикап; И - туннельный и обращенный; С - стабилитрон и стабистор; Л - излучающий светодиод.

**Третий элемент** - цифра, характеризует назначение диода и содержит информацию о специальных параметрах диода. Например, для диодов группы Д: 1 - выпрямительные маломощные (ток до 300 мА); 2 - выпрямительные средней мощности (ток до 10 А); 3 - диоды большой мощности (ток свыше 10 А); 4-9 - диоды импульсные с различным временем восстановления. **Четвертый элемент** (2-3 цифры) -



порядковый номер разработки (для стабилитрона – напряжение стабилизации в десятых долях вольта). Пятый элемент – буква, характеризует группу диодов с различными параметрами.



Диоды **КД212А** кремниевые, диффузионные.

Предназначены для преобразования переменного напряжения частотой до 100 кГц.

Выпускаются в металлопластмассовом корпусе с гибкими выводами.

Масса диода не более 1,5 г. Тип корпуса: КД-16. Основные технические

характеристики диода КД212А:

- $U_{обр\ max}$  - Максимальное постоянное обратное напряжение: 200 В;
- $I_{пр\ max}$  - Максимальный прямой ток: 1 А;
- $f_d$  - Рабочая частота диода: 100 кГц;
- $U_{пр}$  - Постоянное прямое напряжение: не более 1 В при  $I_{пр}$  1 А;
- $I_{обр}$  - Постоянный обратный ток: не более 50 мкА при  $U_{обр}$  200 В;
- $t_{вос\ обр}$  - Время обратного восстановления: 0,3 мкс;
- $C_d$  - Общая емкость: 45 пФ при  $U_{обр}$  100 В