

ток смещения
изменений
зарядов во
времени
 $I_{см}(t) = \frac{dQ_{об}}{dt} = C_{бар} \frac{dU}{dt}$

Различают:

барьерную и диффузионную емкости

В обедненном слое p-n-перехода по обе стороны от металлургической границы существуют равные по значению и противоположные по знаку объемные заряды, обусловленные ионами примесей. В зависимости от приложенного напряжения изменяется толщина обедненного слоя и, следовательно, значение зарядов $Q_{об}$. Это говорит о том, что p-n-переход обладает электрической емкостью. Ее влияние в электрических схемах проявляется в том случае, когда напряжение на p-n-переходе изменяется во времени.

Барьерная емкость p-n-перехода проявляется при приложении к p-n-переходу изменяющегося во времени напряжения. При этом через p-n-переход проходит ток. **Та доля тока, которая не связана с движением носителей заряда через p-n-переход, и определяет барьерную емкость.**

Поэтому **барьерная емкость** должна быть **связана с прохождением токов смещения** (емкостью ток)

Барьерная емкость $C_{бар} = \frac{Q_{бар}}{U}$ - отношение приращения заряда перехода к приращению напряжения, вызвавшего изменение заряда.

~~$C_{бар} = \frac{Q_{бар}}{U}$~~

~~$C_{бар} = \frac{e \cdot N \cdot S}{2}$~~

S - площадь p-n перехода.

Таким образом, **барьерная емкость** **любого одномерного p-n-перехода** может быть рассчитана по формуле **плоского конденсатора**

~~$$5) Q_{бар} = e \cdot S \cdot \frac{\delta}{2} \cdot N = e S N \frac{e \delta}{e N} (U_k + U_{обр.})$$~~

~~$$C_{бар} = C_0 \sqrt{\frac{U_k}{U_k + U_{обр.}}}$$~~

~~C_0 - начальное значение, зависит от сечения перехода, концентрации, электрических свойств. Барьерная емкость - существенно нелинейная (зависит от U), чем больше U, тем меньше C.~~



~~$C_{обр.}$ имеет смысл лишь в том случае, когда при обратном смещении ток не ограничивается сопротивлением перехода.~~

В зависимости от напряжения, приложенного к *p-n*-переходу, изменяются концентрация **инжектированных** носителей в нейтральных областях вблизи границ перехода и значение накопленного заряда, обусловленного этими носителями.

Диффузионная емкость — отношение инжектированного заряда к приращению напряжения, вызвавшему это изменение.

$$C_{\text{диф.}} = \frac{\Delta Q_{\text{инж.}}}{\Delta U}$$

Диффузионная емкость играет существенную роль при прямом включении, шунтируется малым сопротивлением перехода, при низких частотах не влияет на работу прибора. Сбар. имеет смысл учитывать только при обратном включении, т.к. она не шунтируется сопротивлением перехода

~~инж. = e \int (p - p_0) dx~~
~~интегрируем по всему переходу~~
~~C_{\text{диф.}} = I_{\text{пр}} \frac{\tau_p}{\varphi_T}~~ \frac{\tau_p}{\varphi_T}
~~тепловой потенциал~~
~~C_{\text{диф.}}^n = I_{\text{пр.}} \frac{\tau_n}{\varphi_T}~~
~~\varphi_T = \frac{kT}{e}~~

ВОЛЬТ-АМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПЕРЕХОДА

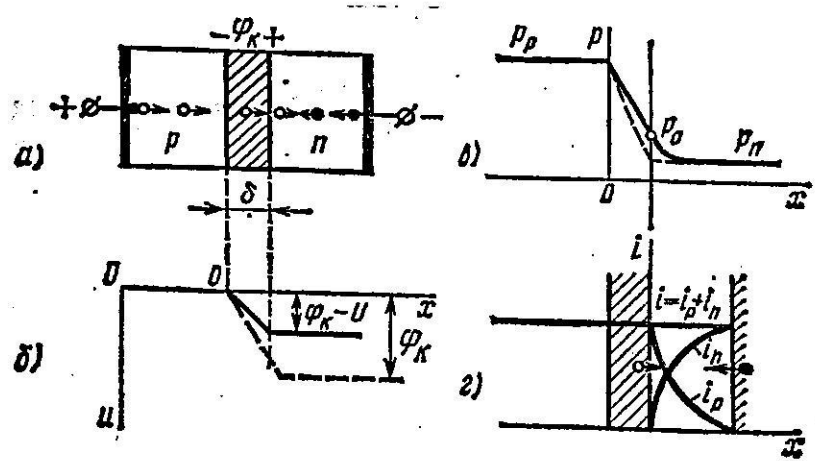


Рис. 2.12

Переход будем считать плоскопараллельным, ось *x* направим перпендикулярно переходу из *p*-области в *n*-область, начало координат выберем на границе перехода и *p*-области (см. рис. 2.12, в). Переход будем считать также достаточно тонким, чтобы генерацией и рекомбинацией носителей заряда в нем можно было пренебречь.

Ток, проходящий через электронно-дырочный переход, находящийся под напряжением U :

$$I = I_0 (\exp \alpha U - 1), \quad (*)$$

где $\alpha = \frac{1}{\varphi_T} = \frac{e}{kT}$ ($\varphi_T = \frac{kT}{e}$ тепловой потенциал)

I_0 — это обратный ток электронно-дырочного перехода при достаточно большом обратном напряжении. По своей физической природе он представляет собой ток экстракции, следовательно, величина этого тока очень мала *.

Вольт-амперная характеристика, соответствующая выражению (*), показана на рис. 2.15. При номинальной температуре $T=300$ К величина $\alpha = e/kT$ примерно равна 40 В^{-1} , поэтому уже при относительно небольшом прямом напряжении (порядка десятка милливольт) ток через переход резко возрастает (приблизительно по экспоненциальному закону). При подаче обратного напряжения ток, изменив направление, быстро достигает значения I_0 , а далее остается постоянным независимо от величины приложенного напряжения U .

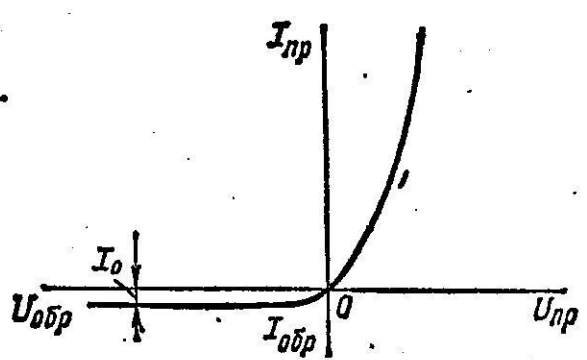
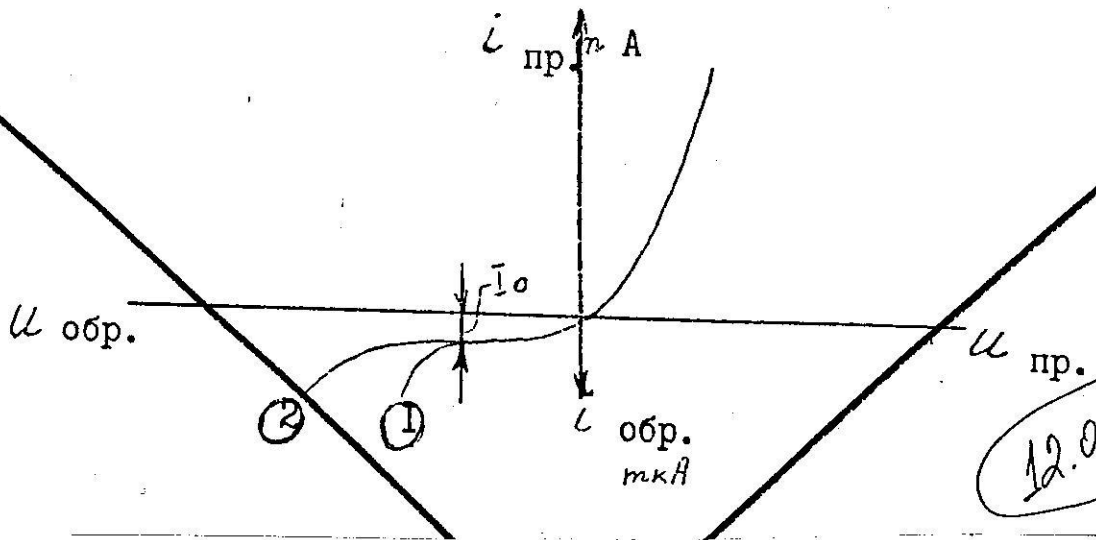


Рис. 2.15



12.09.00Г.

Эквивалентная схема диода



ней ч
перех
полож
перех
I -
энерг
прис
больш
ния у
ка, р
провод
вость,
У

На рис. 2.24 приведена эквивалентная схема полупроводникового диода по переменному току при малых уровнях инжекции. Схема содержит дифференциальное сопротивление R_d , диффузионную емкость перехода C_d , зарядную барьерную емкость перехода C_0 и сопротивление r объема p - и n -областей. Зависимость дифференциального сопротивления диода от прямого тока можно найти из выражения (2.22) дифференцированием по напряжению U . В результате находим $I/r = dI/dU = q/kT$. Отсюда выражение для дифференциального сопротивления диода при прямом токе:

$$R_d = \frac{26}{I_{пр}} \text{ Ом.} \quad (2.26)$$

Следовательно, на ветви прямой характеристики дифференциальное сопротивление обратно пропорционально величине прямого тока. Например, при токе диода, равном 26 мА, $R_d = 1 \text{ Ом}$.

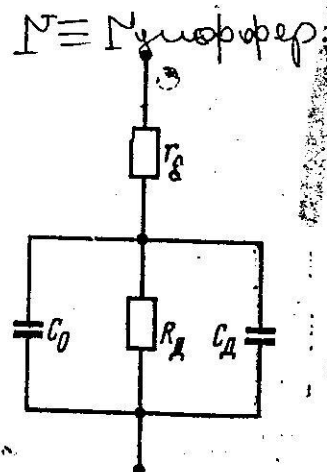


Рис. 2.24. Эквивалентная схема полупроводникового диода для переменного тока

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ДИОД

Полупроводниковым диодом называется двухэлектродный прибор, основу которого составляет p - n -структура, состоящая из областей p -типа и n -типа, разделенных электронно-дырочным переходом (рис. 3.1). Одна из областей p - n -структуры, называемая **эмиттером** имеет большую концентрацию основных носителей заряда*, чем другая область, называемая **базой**.

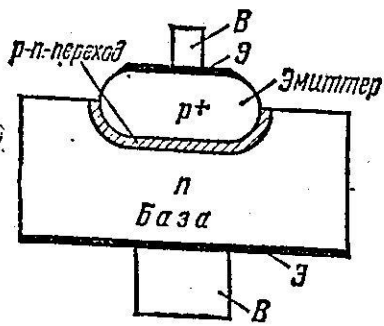


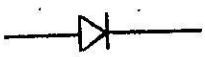
Рис. 3.1

База и эмиттер с помощью электродов Э, образующих омические переходы, соединяются с металлическими выводами В, посредством которых диод включается в электрическую цепь.

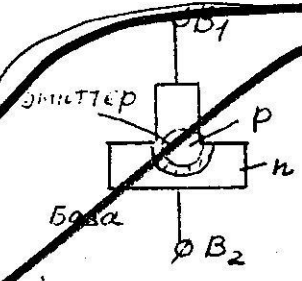
Основным структурным элементом полупроводникового диода, определяющим его функциональные свойства, является p -переход — тонкий промежуточный слой

между p - n -областями, свойства которого были рассмотрены.

* Область, имеющую большую концентрацию основных носителей заряда отмечают знаком «+» у обозначения типа электропроводности (например, p^+).



стрелка указывает направление прямого тока



Эмиттер - полупроводник, у которого концентрация выше.

База - полупроводник с меньшей концентрацией.

- p - n - переход.

Различают диоды:

1/ p - n - тип

2/ p - тип

3/ n - тип

1/ $i_p \gg i_n$

2/ $i_p \ll i_n$

Статические вольт-амперные характеристики диода

Статическая вольт-амперная характеристика полупроводникового диода показана на рис. 3.4. Здесь же пунктиром нанесена теоретическая вольт-амперная характеристика электронно-дырочного перехода, определяемая соотношением: ~~...~~ Для наглядности обратная ветвь характеристики изображена в более крупном масштабе по току и в более мелком — по напряжению по сравнению с прямой ветвью.

В области малых токов реальная и теоретическая характеристики совпадают. Но при больших прямых токах, а также при высоких обратных напряжениях характеристики расходятся, что является следствием ряда причин, не учтенных при теоретическом анализе процессов в электронно-дырочном переходе.

~~В области больших прямых токов вследствие значительного падения напряжения на распределенном сопротивлении базы диода и сопротивлений электродов напряжение на электронно-дырочном переходе будет меньше напряжения U, приложенного к диоду, в результате чего реальная характеристика оказывается расположенной ниже теоретической и почти линейной.~~

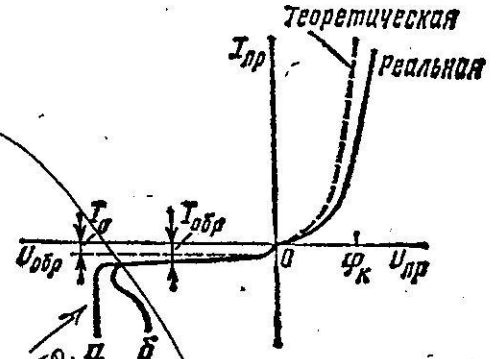


Рис. 3.4

Уравнение вольт-амперной характеристики в этой области можно записать в виде

$$I = I_0 \exp \kappa (U - r_6 I), \tag{3.1}$$

где r_6 — электрическое сопротивление базы, электродов и выводов диода.

При повышении обратного напряжения обратный ток диода не остается постоянным, равным току экстракции I_0 , как следует из соотношения (2.67), а медленно увеличивается. Одной из причин роста обратного тока диода является термическая генерация носителей заряда в переходе, неучтенная при выводе соотношения (2.67). Составляющую обратного тока через переход, зависящую от числа генерируемых в переходе в единицу времени носителей заряда, условимся называть термотоком перехода. С повышением обратного напряжения вследствие расширения перехода увеличивается его объем, поэтому число генерируемых в переходе носителей заряда и термоток перехода возрастают. Этот эффект особенно заметен в кремниевых диодах, имеющих малый ток экстракции $I_0 < I_T$.

Другой причиной роста обратного тока диода является поверхностная проводимость электронно-дырочного перехода, обусловленная молекулярными и ионными пленками различного происхождения, покрывающими выходящую наружу поверхность перехода.

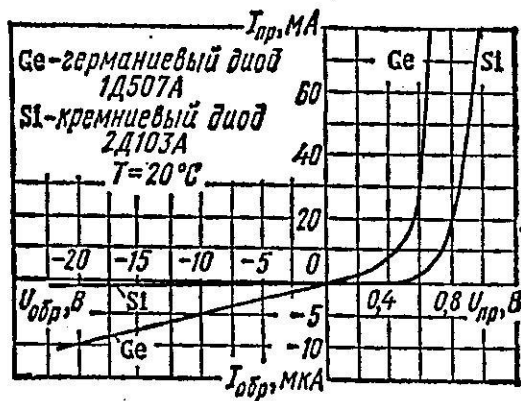


Рис. 3.5

Из-за нестабильности физико-химической структуры этой поверхности, подверженной влиянию окружающей среды, ток утечки по поверхности I_y нестабилен, что приводит к «ползучести» характеристик диода. В современных диодах поверхность перехода специально обрабатывают и защищают от внешних воздействий, поэтому ток утечки всегда существенно меньше термотока.

Таким образом, полный обратный ток диода

$$I_{обр} = I_0 + I_T + I_y \quad (3.2)$$

Сравнивая вольт-амперные характеристики кремниевого и германиевого диодов (рис. 3.5), отметим, что кремниевые диоды имеют существенно меньшую величину обратного тока вследствие более низкой концентрации неосновных носителей заряда. По этой же причине прямая ветвь характеристики у кремниевых диодов идет значительно правее, чем у германиевых.

На этом рисунке для наглядности масштаб по оси обратных токов взят более крупный, а за нулевое значение прямого тока диода принят порог чувствительности измерительного прибора $I_{пор}$, с помощью которого определяется этот ток. Поэтому характеристика прямого тока

не проходит через нуль, а смещена относительно него ($I_0 \sim 0,05$ для Ge; $\sim 0,5B$ для Si).

При обратном включении в φ_e развивается тепловой пробой гораздо быстрее, чем лавинный пробой в кремнии.

В Si ток экстракции много меньше φ_e , так обратная ветвь практически полностью определяется тепловым током.

Обратная ситуация в φ_e

$$I_T = 10^3; I_{экстр.} = Si$$

$$I_T = 0,1; I_{экстр.} = Ge$$

Пробой диода

Когда обратное напряжение диода достигает определенного критического значения, ток диода начинает резко возрастать (см. рис. 3.4). Это явление называют *пробоем диода*. Заметим, что пробой сопровождается выходом диода из строя лишь в том случае, когда возникает чрезмерный разогрев перехода и происходят необратимые изменения его структуры. Если же мощность, выделяющаяся в диоде, поддерживается на допустимом уровне, он сохраняет работоспособность и после пробоя. Более того, для некоторых типов диодов пробой является основным рабочим режимом.

Напряжение, при котором наступает пробой перехода, зависит от типа диода и может иметь величину от единиц до сотен вольт.

Различают **два основных вида пробоя** электронно-дырочного перехода: **электрический и тепловой**. В обоих случаях резкий рост тока связан с увеличением числа носителей заряда в переходе. При электрическом пробое число носителей заряда в переходе возрастает под действием сильного электрического поля и ударной ионизации атомов решетки, при тепловом пробое — за счет термической ионизации атомов.

Электрический пробой Обычно длина свободного пробега электрона в полупроводнике значительно меньше толщины электронно-дырочного перехода. Если за время свободного пробега электроны успевают набрать достаточную энергию, то возникает **ударная ионизация** атомов электронами. Поскольку **скорость электронов**, определяющая их энергию, **зависит от напряженности электрического поля**: $v_n = \mu_n E$, для ударной ионизации необходима определенная величина этой напряженности. В германиевом переходе она составляет 80—120 кВ/см.

В результате ударной ионизации наступает лавинное размножение носителей заряда. Обозначим число носителей заряда, вновь возникающих вследствие ионизации, n_2 , а число носителей заряда, поступающих в переход, — n_1 . Величину $M = n_2/n_1$ называют **коэффициентом размножения носителей заряда**. Исследования дают следующую зависимость коэффициента размножения носителей M от приложенного к диоду напряжения U :

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{U}{U_x}\right)^k} \tag{3.15}$$

Величина напряжения пробоя U_x зависит от рода материала, его удельного сопротивления ρ и типа перехода:

$$U_x = a\rho^m \tag{3.16}$$

Значения постоянной a и показателей степени m и k указаны в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Параметры лавинного пробоя

Материал и тип перехода	a	m	k
Германиевый n^+ - p -переход	52	0,6	6
Германиевый p^+ - n -переход	83	0,6	3
Кремниевый p^+ - n -переход	86	0,65	3,5
Кремниевый n^+ - p -переход	23	0,75	2

Когда приложенное напряжение U приближается к напряжению пробоя U_n , коэффициент размножения носителей резко возрастает, растет число носителей заряда в переходе, сильно увеличивается ток через переход, наступает лавинный пробой.

Влияние электрического поля на пробой диода заключается в том, что, воздействуя на атомы кристаллической решетки, оно **повышает энергию валентных электронов** и облегчает их переброс в зону проводимости. **При значительных напряженностях электрического поля (порядка 200 кВ/см) возможен туннельный пробой**, обусловленный прямым переходом электронов из валентной зоны в зону проводимости смежной области, происходящим без изменения энергии электрона (**туннельный эффект**).

Практически при электрическом пробое могут иметь место в той или иной степени одновременно оба вида пробоя — туннельный и лавинный. Вольт-амперная характеристика диода при электрическом пробое соответствует кривой a на рис. 3.4.

~~Беличина напряжения пробоя существенно зависит от состояния поверхности перехода, где могут образовываться заряды того или иного знака, которые уменьшают или увеличивают результирующую напряженность поля у поверхности по сравнению с ее значением в объеме. В неблагоприятном случае напряжение пробоя по поверхности может быть в несколько раз ниже, чем по объему. Это еще раз подчеркивает важность стабилизации свойств поверхности полупроводника, защиты ее от воздействия окружающей среды.~~

Тепловой пробой. Тепловой пробой диода возникает вследствие перегрева перехода проходящим через него током при недостаточном теплоотводе, не обеспечивающем устойчивость теплового режима перехода.

В режиме постоянного тока **мощность, подводимая к переходу, определяется обратным напряжением $U_{обр}$ и обратным током $I_{обр}$.**

$$P_{подв} = U_{обр} I_{обр} \quad (3.17)$$

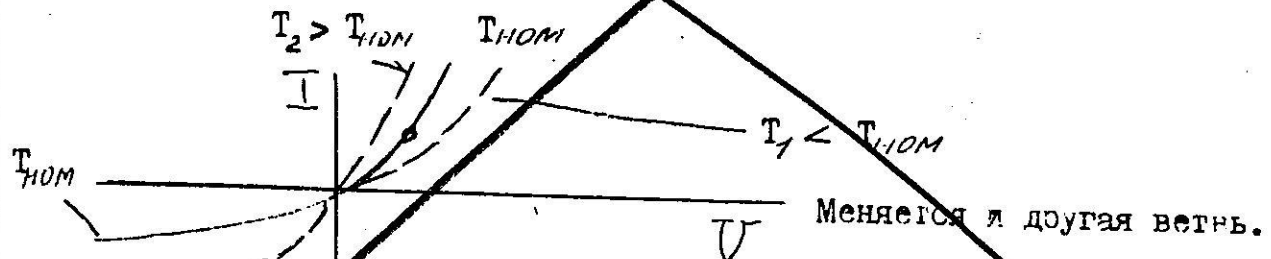
Эта мощность идет на разогрев перехода, в результате чего температура перехода T_n возрастает. При этом увеличиваются концентрации носителей заряда в p - n -структуре и обратный ток перехода, что в свою очередь приводит к увеличению подводимой мощности, новому повышению температуры перехода и т. д.

С ростом температуры изменяется концентрация неосновных носителей /главная причина, остальные следствия/.

С ростом R_n уменьшается контактная разность потенциалов

$$\varphi_k = \frac{kT}{e} \ln \frac{p_p}{p_n}$$

Увеличивается проводимость базы. Прямая ветвь $I-A-U$ смещается влево.



С ростом T увеличивается тепловой ток.

тепловой коэффициент напряжения

$$T_{КН} = \xi = \frac{\Delta U}{\Delta T} = \frac{1}{I_{НСМ.}} = const$$

Влияние температуры на вольт-амперные характеристики. На вольт-амперные характеристики диода оказывает существенное влияние температура окружающей среды. Представленные на рис. 3.6 и 3.7 экспериментальные зависимости показывают, что при повышении температуры резко возрастает обратный ток перехода $I_{обр}$, становится более крутой прямая ветвь характеристики.

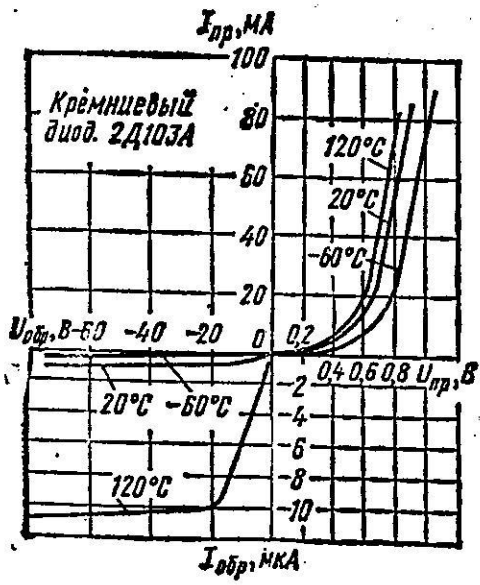


Рис. 3.6

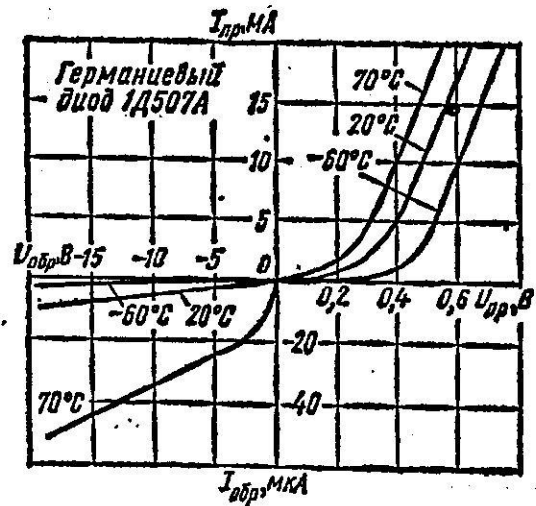


Рис. 3.7

Причина этих явлений заключается в сильной зависимости концентрации неосновных носителей заряда от температуры.

И

$$\delta = \frac{p - p_n}{n_n} - \text{уровень коэффициента инжекции}$$

~~Отношение диффузионной концентрации неравномерно распределены в базе к концентрации основных носителей~~

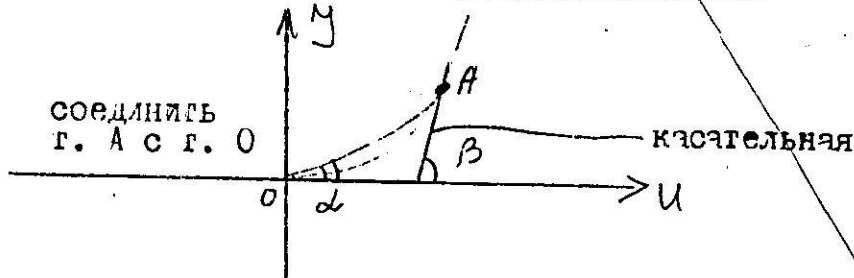
$\delta \ll 1$ - влияние дырок мало, проводимость базы полностью определ. n_n , если начинает расти и становится $\delta > 1$, то определяется дырками проводимость.

Собств. эл. рекомбинир. с дыр /интенсивные процессы/, - уменьш. неравномерно в сечении, по толщ. появляется grad , растет $\frac{dn}{dx}$, увеличивается диффузионный ток электр., который по направл. совпадает с дрейфующим током эл., растет электронная компонента тока.

Следовательно, уменьшается коэффициент инжекции.

При движении дыр. электроны создают свое поле в базе, которое направлено против приложенного внешнего поля и препятствует движению дырок в базу, уменьшается дырочный ток, это приводит к больш. уменьшению j .

Статические характеристики диода



$R_a = ctg \alpha$ - сопротивление постоянному току

$R_i = ctg \beta$ - ~~дифференциальное сопротивление~~ дифференциальное сопр. диода в рабочей точке

/зависит от выбора рабочей точки/.

Оба зависят от температуры.

R_0 может быть и больше и меньше R_i , в зависимости от напряжения и В-А-Х.

ДИОДЫ

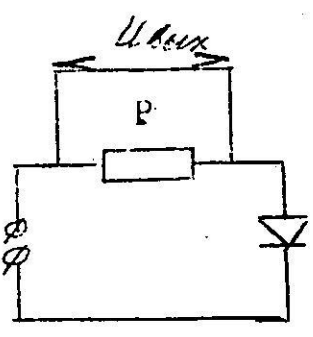
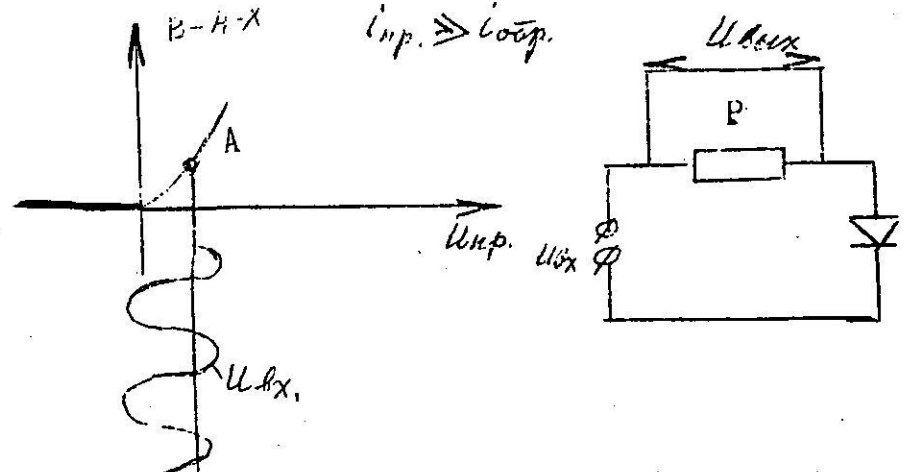
В основе применения полупроводниковых диодов лежит ряд их свойств, таких, как асимметрия вольт-амперной характеристики, обратный пробой электронно-дырочного перехода, зависимость барьерной емкости от напряжения и т. д. В зависимости от вида используемого свойства, т. е. от назначения, различают шесть основных функциональных типов: электронпреобразовательных, полупроводниковых диодов, выпрямительные (силовые) диоды, высокочастотные диоды, импульсные диоды, стабилитроны, варикапы (варакторы), туннельные диоды.

Выпрямительные диоды

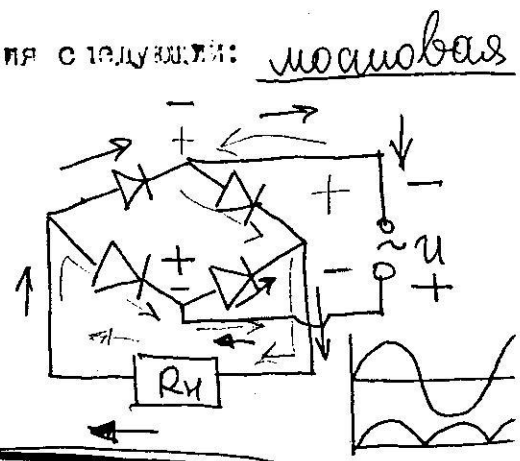
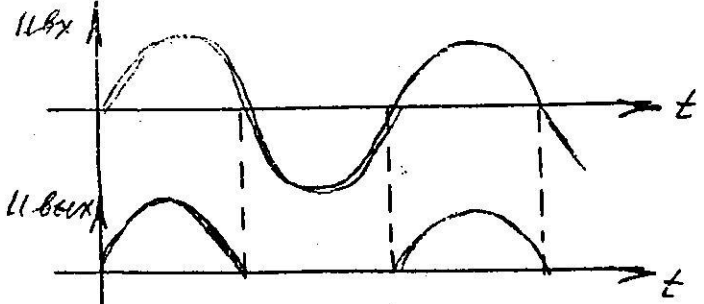
Резкую асимметрию вольт-амперной характеристики $p-n$ -перехода широко используют для выпрямления переменного тока низкой частоты. Приборы, предназначенные для этой цели, называются выпрямительными диодами, они являются одним из наиболее распространенных типов полупроводниковых диодов.

Значительно реже выпрямительные низкочастотные диоды должны работать при больших частотах. Так, в транзисторных преобразователях напряжения частота переменного тока, выпрямляемого диодом, достигает нескольких десятков килогерц.

нсс
чсс
чсс
нсс



Если т.А. выбрана в нуле, то график напряжения следующий:

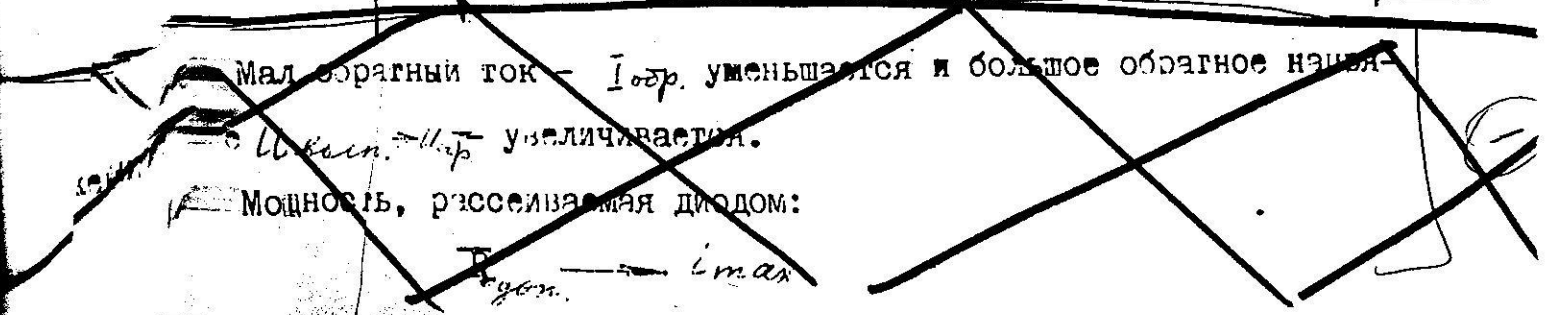


Мал обратный ток $I_{обр}$ уменьшается и большое обратное напря-

$U_{вых} > U_{пр}$ увеличивается.

Мощность, рассеиваемая диодом:

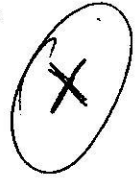
$P_{двх} \rightarrow I_{max}$



диода как выпрямителя **возможности** характеризуются величинами **максимально допустимого прямого тока**, определяющего **максимальный выпрямленный ток** (ток нагрузки), и **максимально допустимого обратного напряжения**, определяющего **максимальное выпрямленное напряжение**.

Из основных и справочных параметров выпрямительных диодов необходимо отметить:

- 1) **максимально допустимый прямой ток** $I_{пр\max}$;
- 2) **прямое напряжение** на диоде при заданном значении прямого тока $U_{пр}$; обычно прямое напряжение на диоде указывается при **максимально допустимом прямом токе** через диод;
- 3) **максимально допустимое обратное напряжение** $U_{обр\max}$; оно обычно значительно меньше пробивного;
- 4) **обратный ток** при заданном обратном напряжении $I_{обр}$; обычно обратный ток указывается при **максимально допустимом обратном напряжении**;
- 5) **диапазон рабочих температур** окружающей среды.



В зависимости от значения **максимально допустимого прямого тока** выпрямительные диоды подразделяют на **диоды малой мощности** (прямой ток до 0,3 А), **средней мощности** (прямой ток от 0,3 до 10 А) и **большой мощности** (прямой ток более 10 А).

В выпрямительных диодах электронно-дырочный переход имеет большую площадь, обеспечивающую получение выпрямленных токов требуемой величины.

Мощные диоды с целью отвода тепла монтируют на специальных радиаторах, изготовленных из металла, обладающего хорошей теплопроводностью; для увеличения рассеиваемой мощности используют воздушное и жидкостное охлаждение.

Допустимый выпрямленный ток и допустимое обратное напряжение диода зависят от температуры окружающей среды. При повышенной температуре возрастает опасность теплового пробоя, поэтому подводимое напряжение и выпрямленный ток должны быть снижены по сравнению с номинальными.

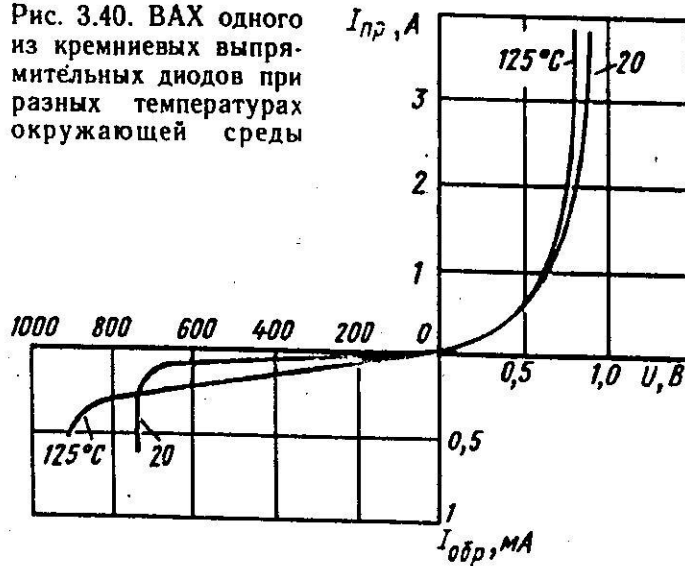
Кремниевые диоды

Максимально допустимые прямые токи кремниевых плоскостных диодов различных типов составляют от 0,1 до 1600 А. **Падение напряжения** на диодах при этих токах не превышает обычно 1,5 В. С увеличением температуры прямое напряжение уменьшается, что связано с уменьшением высоты потенциального барьера p-n-перехода и с перераспределением носителей заряда по энергиям (см. § 3.2).

Обратная ветвь ВАХ кремниевых диодов не имеет участка насыщения обратного тока, так как обратный ток в кремниевых диодах вызван процессом генерации носителей заряда в p-n-переходе (см. § 3.10). **Пробой кремниевых диодов имеет лавинный**



Рис. 3.40. ВАХ одного из кремниевых выпрямительных диодов при разных температурах окружающей среды



характер. Поэтому пробивное напряжение с увеличением температуры увеличивается (см. § 3.11). Для некоторых типов кремниевых диодов при комнатной температуре пробивное напряжение может составлять 1500...2000 В. Максимально допустимое обратное напряжение — это напряжение, при котором гарантируется надежная работа диода. Поэтому максимально допустимое обратное напряжение, значение которого указывается в справочниках, значительно меньше пробивного напряжения. Обычно выбирают $U_{обр. макс.} = (0,5...0,8)U_{проб.}$

Для преобразования переменного тока в постоянный в схемах с напряжением, превышающим максимально допустимое обратное напряжение отдельного диода, промышленностью выпускаются выпрямительные столбы. Выпрямительный полупроводниковый столб — это совокупность выпрямительных полупроводниковых диодов, соединенных последовательно и собранных в единую конструкцию, имеющую два вывода. Максимально допустимое обратное напряжение кремниевых выпрямительных столбов составляет несколько киловольт.

Для удобства применения выпрямительных диодов в выпрямителях, собранных по различным мостовым схемам (однофазным, трехфазным), а также в выпрямителях с удвоением напряжения промышленностью выпускаются выпрямительные полупроводниковые блоки. Выпрямительный полупроводниковый блок — это полупроводниковый блок, собранный из выпрямительных полупроводниковых диодов, соединенных по определенной электрической схеме и оформленных в единую конструкцию, имеющую более двух выводов.

Диапазон рабочих температур для кремниевых выпрямительных диодов ограничен значениями $-60... + 125^{\circ}C$.

Германиевые диоды

Электрические свойства ВАХ одного из германиевых плоскостных диодов при разных температурах окружающей среды приведены на рис. 3.41. Основные отличия ВАХ и параметров германиевых и кремниевых выпрямительных плоскостных диодов заключаются в следующем.

1. Прямое напряжение на германиевом диоде при максимальном допустимом прямом токе приблизительно в два раза меньше, чем на кремниевом диоде. Это вызвано меньшей высотой потенциального барьера германиевого *p-n*-перехода является существенным, но, к сожалению, единственным преимуществом перед кремниевыми выпрямительными диодами.

2. Существование тока насыщения при обратном включении германиевого диода, что вызвано механизмом образования обратного тока — процессом экстракции неосновных носителей заряда из прилегающих к *p-n*-переходу областей.

3. Значительно большая плотность обратного тока в германиевых диодах, так как при прочих равных условиях концентрация неосновных носителей заряда в германии больше на несколько порядков, чем в кремнии.

4. Большие обратные токи через германиевые диоды, в результате чего пробой германиевых диодов имеет тепловой характер. Поэтому пробивное напряжение германиевых диодов уменьшается с увеличением температуры, а значения этого напряжения меньше пробивных напряжений кремниевых диодов. $T_{проб} \sim 400 \text{ В}$

5. Верхний предел диапазона рабочих температур германиевых диодов составляет приблизительно 75°C .

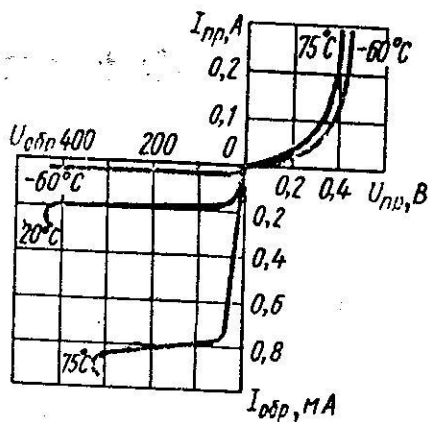


Рис. 3.41. ВАХ одного из германиевых выпрямительных диодов при разных температурах окружающей среды

что значительно ниже по сравнению с тем же параметром кремниевых диодов.

Существенной особенностью германиевых диодов и их недостатком является то, что они плохо выдерживают даже очень кратковременные импульсные перегрузки при обратном направлении для *p-n*-перехода. Определяется это механизмом пробоя германиевых диодов — тепловым пробоем, происходящим при протекании тока с выделением большой удельной мощности в месте пробоя.

СЕЛЕНОВЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Селеновые выпрямительные пластины

...являющим электрическим переходом в селеновых выпрямителях является гетеропереход между селеном и селенидом кадмия.

Гетеропереходом называется переход, образованный между двумя полупроводниками с различной шириной запрещенной зоны. Полупроводники должны иметь близкие кристаллические структуры.

В установках для выпрямления переменного тока соединяют ряд селеновых выпрямительных пластин последовательно для получения более высокого выпрямленного напряжения и параллельно для выпрямления больших токов.

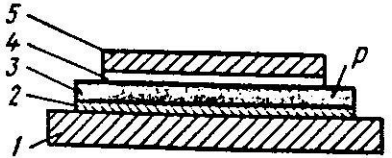


рис. 3.42. Структура селеновой выпрямительной пластины:

- 1 — алюминиевое основание;
- 2 — тонкий слой висмута или никеля, нанесенный на протравленное алюминиевое основание;
- 3 — слой селена;
- 4 — электрод из сплава висмута, кадмия и олова

... (выпрямитель 15ГЕ1440У-С).

... (выпрямитель 140ГЖ24Я4У).

Площадь отдельных селеновых выпрямительных пластин, выпускаемых промышленностью, 0,1 ... 400 см².

... (выпрямитель 140ГЖ24Я4У).

Электрические свойства. ВАХ селеновой выпрямительной пластины представлена на рис. 3.43.

... (для разных групп)

... (соединено последовательно)

Большая барьерная емкость селеновых выпрямителей при относительно малой допустимой плотности прямого тока ограничивает их применение при повышенных частотах.

Параметры селеновых выпрямителей изменяются со временем как при хранении, так и при работе. Длительное хранение приводит к возрастанию обратного тока. Этот процесс, известный под названием **расформовки**, вызван диффузией галоидов и некоторым изменением химического состава полупроводника. Расформовка, как правило, процесс обратимый. После подачи на выпрямитель обратного или переменного напряжения обратный ток уменьшается со временем, достигая номинального значения в течение 2...3 мин.

Интенсивность возрастания прямого (напряжения на селеновых выпрямителях, вызванное старением при хранении без нагрузки, но ускоряется при эксплуатации. Процесс старения связан с увеличением сопротивления слоя селена вследствие обеднения его галогенными примесями, а также с увеличением сопротивления омического перехода между селеном и алюминиевым электродом. Интенсивность этих процессов возрастает с повышением температуры, что и определяет ~~важный предел для выбора рабочих температур селеновых выпрямителей, который составляет для разных серий выпрямителей 75 и 125 °С.~~

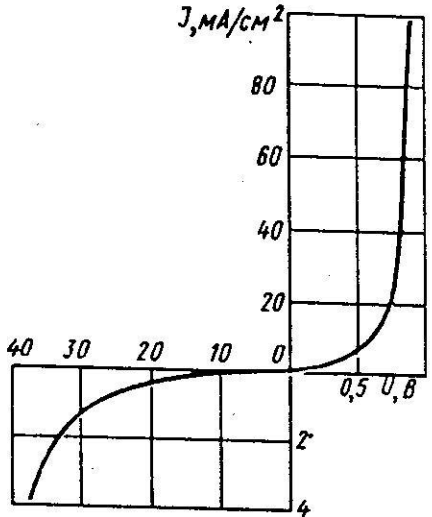


Рис. 3.43. ВАХ селеновой выпрямительной пластины

Таким образом, ~~важными параметрами и свойствами селеновых поликристаллических выпрямителей являются:~~ ~~уменьшение количества кристаллических кремниевых и германиевых выпрямительных диодов.~~ Однако ~~применение комбинированных выпрямителей в различных установках остается дилеммой, а промышленный выпуск различных типов селеновых выпрямителей не снижается.~~ Впервые это, во многом, произошло вследствие ~~необходимости селеновых выпрямителей и, следовательно, низкой их себестоимости.~~

Во многих случаях ~~необходимость замены селеновых выпрямителей вызвана их старением.~~ Выходом из этой ситуации является ~~увеличение температуры или полярности и, следовательно, изменение знака своих свойств для ее пробоя.~~ Тепловой пробой происходит при шнуровании тока с резким увеличением плотности обратного

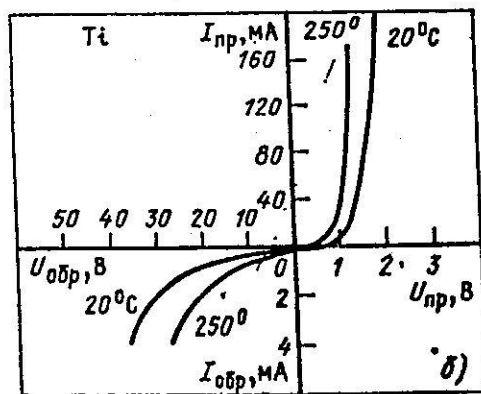
тока в месте пробоя. Из-за увеличения удельной выделяющейся мощности в месте пробоя происходит расплавление селена, который затем при быстром охлаждении переходит в аморфное состояние. Удельное сопротивление аморфного селена на несколько порядков выше, чем кристаллического. В результате пробитое место выпрямительной пластины оказывается изолированным, происходит ~~самоисцеление~~ места пробоя.

медноокисные /крат ~ 15-20 В/
/набор в виде шайб/

титановые выпрямители работают в **широком диапазоне температур $-50 \div +250^\circ\text{C}$** и сохраняют выпрямительные свойства до температуры **$+400^\circ\text{C}$** . Даже при такой высокой температуре ток **даже увеличивается лишь вдвое**, а напряжение пробоя практически не меняется.

титановые выпрямители имеют высокое значение прямого падения напряжения (**$U_{пр} = 1 \div 1,5 \text{ В}$** и более), а пробивное напряжение (**$U_{проб} = 40 \div 50 \text{ В}$**). Их срок службы значительно меньше, чем у кремниевых и германиевых диодов, и резко снижается с повышением температуры.

титановые выпрямители выполняют в виде выпрямительных столбов, состоящих из отдельных пластин.



Импульсные диоды

Полупроводниковые диоды широко используют в качестве *ключа*, т. е. устройства, имеющего два состояния: «открыто», когда сопротивление прибора очень мало, и «закрыто», когда его сопротивление очень велико. Время перехода диода из одного состояния в другое должно быть по возможности небольшим, так как этим определяется быстрдействие аппаратуры. Предназначенные для этой цели диоды называют *импульсными* или *ключевыми*.

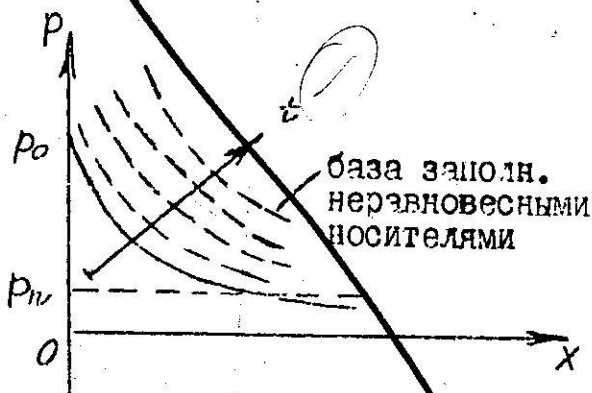
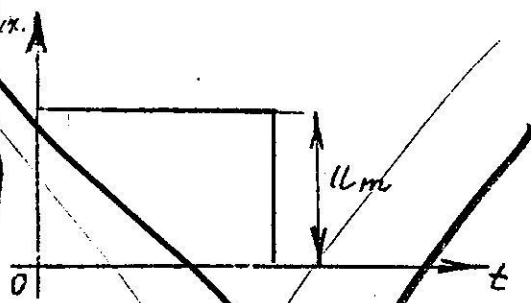
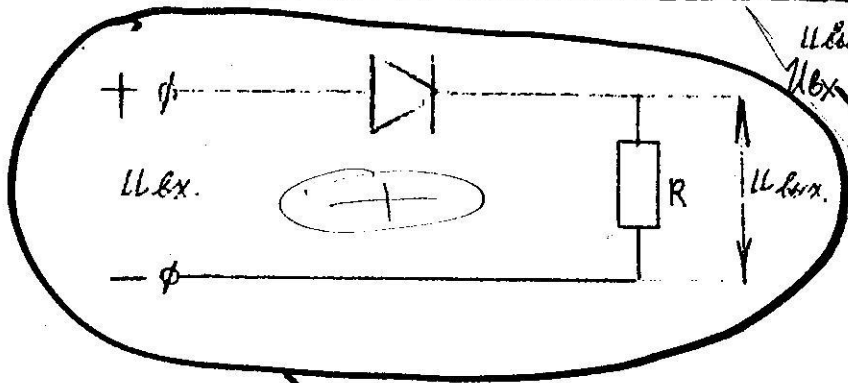


Импульсные полупроводниковые диоды — это диоды, предназначенные для работы в режиме импульсного тока и напряжения.



Основное назначение импульсных диодов — работа в качестве **коммутационных элементов** электрических цепей. Кроме того, импульсные диоды широко применяют в радиоэлектронике для детектирования высокочастотных сигналов и для других целей.



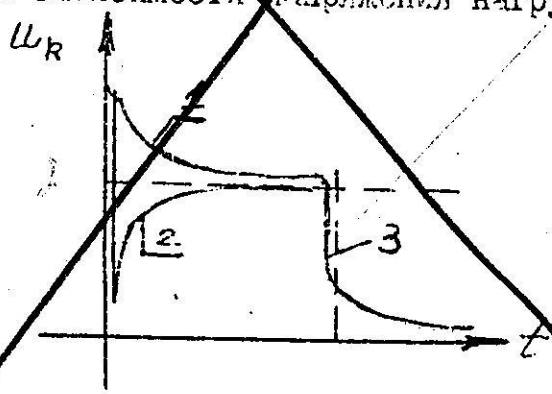


При подаче импульса прямого напряжения носители инжектируются в базу и заполняют ее объем, при этом *град* концентрационных избыточных носителей уменьшается, уменьшается диффузионный ток.

$t_{уст.}$ - ~~время установления прямого сопротивления диода~~ / время заряда диффузионной емкости/.

$I_{имп.}$ - предельный импульсный ток.

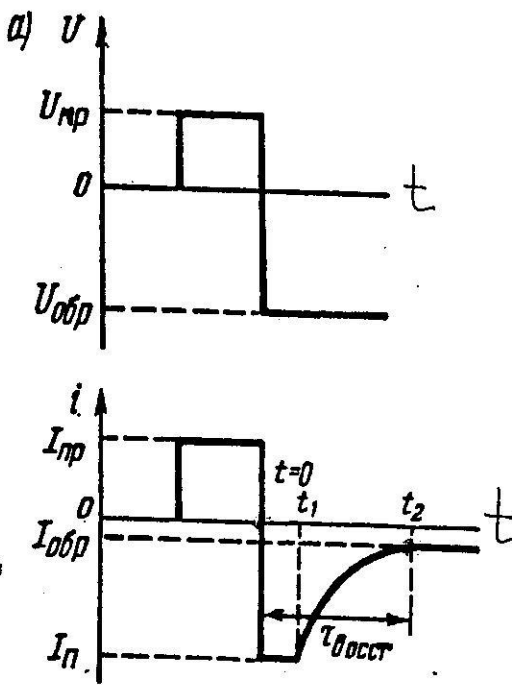
Кроме процесса уменьшения тока в диоде идет обратный ему процесс, т.е. с ростом числа носителей в базе увеличивается ее проводимость, увеличивается ток диода, т.к. большая доля $U_{пр.}$ падает на переходе. В зависимости от того, сколь высокоомна база возможны различные зависимости напряжения нагрузки от времени.



Если база высокоомна, реализуется кривая - 2, если база низкоомна - кривая I.

Эффект влияния базы - эффект модуляции сопротивления базы.

После снятия $U_{пр.}$ диод является источником последующего ЭДС - кривая 3 - разряд инжекционной емкости.



При протекании прямого тока через диод в его базе из-за инжекции накапливаются неосновные неравновесные носители заряда. Если изменить полярность приложенного к диоду напряжения с прямой на обратную, этот заряд постепенно рассасывается, и возникающий обратный ток вследствие высокой концентрации неосновных неравновесных носителей в базе окажется вначале значительно больше статического тока насыщения; величина его будет ограничиваться лишь внешней нагрузкой. При быстром переключении с прямого напряжения на обратное диод за-

пирается не сразу. Это явление связано со спецификой работы p-n-перехода и обусловлено так называемым эффектом накопления заряда. Накопленный заряд и обуславливает кратковременный «выброс» обратного тока до значения I_n (рис. 2.26a).

Кратковременное увеличение обратного тока приводит к такому же кратковременному уменьшению дифференциального обратного сопротивления: $R_{обр} = (\Delta I_{обр} / \Delta U_{обр})^{-1}$ импульсного диода. Для восстановления стационарного обратного сопротивления требуется некоторое время, называемое временем восстановления обратного сопротивления диода $\tau_{восст}$. Это промежуток времени от момента, когда ток через диод равен нулю, до момента, когда его обратный ток уменьшится до значения тока насыщения (рис. 2.26a). За время восстановления обратного сопротивления все инжектированные неосновные носители рекомбинируют с основными или экстрагируются плем перехода.

- 6 групи
- $\tau_{восст} \Rightarrow$
- > 500нс
- 150-500нс
- 30-150
- 5-30
- 1-5
- < 1нс

На рис. 2.27 показано распределение концентрации дырок вдоль базы импульсного диода после переключения прямого напряжения на обратное в различные моменты времени. Кривая 1 отражает распределение дырок в базе диода в момент времени $t=0$; кривая 5 соответствует установлению обратного тока, т.е. фиксирует распределение концентрации дырок спустя некоторое время, равное $\tau_{восст}$. Остальные кривые даны для промежуточных значений времени.

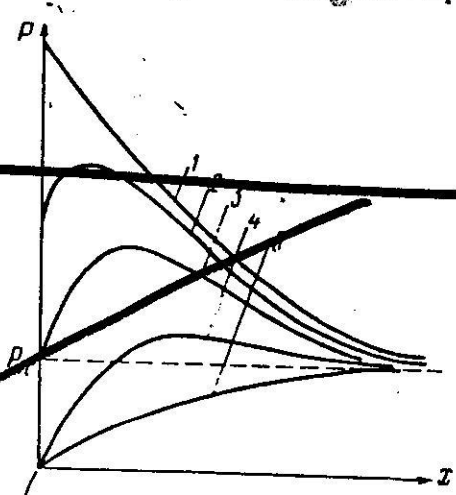


Рис. 2.27. Распределение концентрации накопленных дырок в базе импульсного диода для различных моментов времени

граница p-n переход - база



Рассмотрим подробнее процесс переключения диода с прямого напряжения на обратное. До момента времени $t=0$ через переход протекал прямой ток. В момент $t=0$ напряжение, приложенное к переходу, изменяет знак на обратный. С этого момента переход перестает инжектировать дырки в базу (их распределение вдоль базы соответствует кривой 1). Под воздействием отрицательного напряжения он захватывает дырки, попавшие в его поле. Происходит рассасывание накопленных дырок. Уменьшение их концентрации особенно заметно на границе перехода (кривая 2 для момента времени $0 < t < t_1$). Концентрация дырок уменьшается также вследствие их рекомбинации с электронами по всей длине базы.

С момента переключения диода и до момента времени t_1 в цепи существует неизменный ток, который иногда называют током «полочки» $I_{п.}$ Величина этого тока ограничивается внешним сопротивлением нагрузки и поддерживается зарядом уходящих через переход дырок до момента времени t_1 (кривая 3). Далее заряд уходящих через переход дырок становится недостаточным для поддержания тока (кривая 4) и обратный ток сладеет, стремясь к стационарному значению $I_{обр}$ при $t_2 = \tau_{восст}$ (распределение дырок по кривой 5). Последний случай соответствует равновесному состоянию для концентрации дырок в базе.

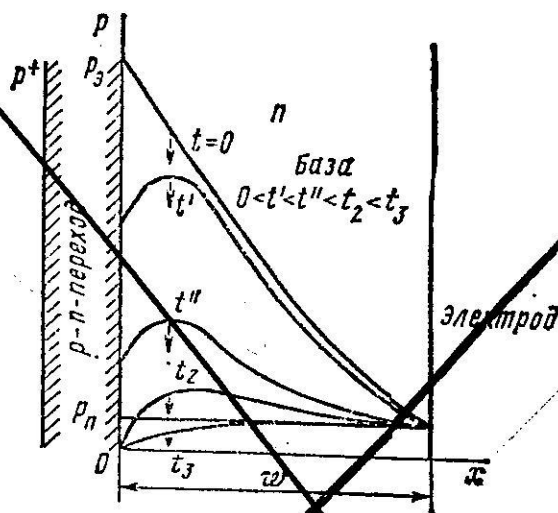
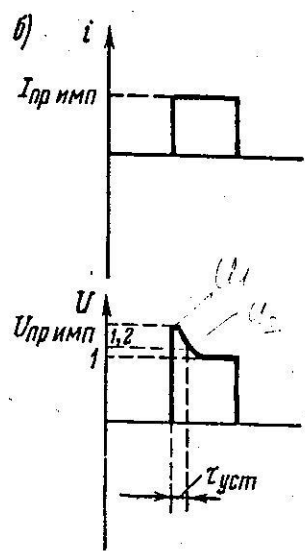


Рис. 3.17

Изменение концентрации накопленного заряда в базе плоскостного диода в режиме переключения показано на рис. 3.17. К моменту окончания прямого импульса в базе существует установившееся распределение концентрации (кривая $t=0$). При переключении диода, когда возникает обратный ток $I_2 = \mathcal{E}_2 / R_2$, кривая t' распределения концентрации у перехода получает обратный наклон. Создается диффузионный ток дырок из базы в переход. Одновременно из базы во внешнюю цепь в таком же количестве выводятся электроны, чем сохраняется нейтральность базы. Неравновесная концентрация неосновных носителей заряда уменьшается как за счет рассмотренного процесса, так и вследствие рекомбинации (кривая t''). Градиент концентрации носителей заряда у перехода и ток остаются при этом постоянными до тех пор, пока концентрация дырок у перехода не спадет до нуля ($t = t_2$). Далее градиент концентрации начинает уменьшаться и обратный ток достигает величины $I_{обр}$.



$\frac{U_1}{U_2} = 1,2$
 $U_2 = 2,733$

Рассмотрим прохождение через диод импульса прямого тока (рис. 2.26б). В первый момент после включения диода напряжение на нем резко возрастает, что объясняется высоким сопротивлением базы. По мере увеличения числа инжектированных носителей это сопротивление уменьшается до значения, определяемого прямым током. Промежуток времени, в течение которого прямое сопротивление устанавливается равным 1,2 своего стационарного значения, называется *временем установления прямого сопротивления* перехода $\tau_{уст}$. При выключении прямого тока на переходе какое-то время остается некоторое напряжение, обусловленное инжектированными носителями, которые исчезают в результате рекомбинации.

Помимо $\tau_{уст}$ и $\tau_{восст}$ к параметрам импульсных диодов относится также импульсное сопротивление $R_{имп} = U_{пр.имп. макс} / I_{пр.имп. макс}$. Для импульсных полупроводниковых диодов также указываются в справочниках постоянное прямое напряжение $U_{пр}$ при протекании постоянного тока $I_{пр}$ заданной величины и обратный ток $I_{обр}$ при приложении обратного напряжения $U_{обр}$ заданной величины. Предельные режимы характеризуются максимально допустимым обратным напряжением $U_{обр. макс}$ и максимально допустимым импульсом прямого тока $I_{пр.имп. макс}$.

Основные требования, предъявляемые к импульсным диодам, следующие: небольшая площадь p-n-перехода, минимальное время жизни неосновных неравновесных носителей в базе, низкое сопротивление материала полупроводника. Технология изготовления импульсных полупроводниковых диодов не отличается от технологии обычных выпрямительных диодов, за исключением лишь того, что импульсные диоды должны иметь меньшую площадь перехода для уменьшения его емкости. Импульсные диоды изготавливают либо точечными, либо с мезаструктурой (с уменьшенной площадью перехода). Часто для уменьшения времени жизни неравновесных носителей применяют кремний, легированный золотом.

Время установления прямого сопротивления диода $\tau_{уст}$ — инерция времени от момента подачи импульса прямого тока (при нулевом напряжении) до осциллирования напряжения

Соответственно одним из основных параметров импульсного диода является время восстановления обратного сопротивления t_{rv} равное интервалу времени от момента прохождения нуля после переключения диода с заданного прямого тока в состояние заданного обратного напряжения до момента достижения обратным током заданного низкого значения. По значению этого параметра все импульсные диоды подразделяют на шесть групп, характеризующихся временем восстановления обратного сопротивления более 500 нс, 150...500, 30...150, 5...30, 1...5 нс.

Соответственно другим специфическим параметром импульсного диода является время установления прямого тока при переключении диода с обратного тока на прямой (при нулевом начальном напряжении смещения) до достижения заданного значения прямого тока на диоде.

Значения этих параметров зависят от структуры диода, от времени жизни неосновных носителей заряда в базе диода, а также от условий измерения. Так, при увеличении прямого тока, проходящего через диод до переключения на обратное напряжение, время восстановления обратного сопротивления увеличивается, что вызвано необходимостью рассасывания большего количества накопленных в базе неосновных носителей заряда. При увеличении обратного напряжения по абсолютному значению время восстановления обратного сопротивления уменьшается, т.е. обратное напряжение способствует процессу рассасывания неосновных носителей заряда из базы диода.

СВЧ СВЧ ДИОДЫ

Сверхвысокочастотный полупроводниковый диод СВЧ-диод = это полупроводниковый диод, предназначенный для преобразования и обработки СВЧ-сигнала.

Полупроводниковые СВЧ-диоды уже длительное время применяются в различной радиоэлектронной аппаратуре и измерительной технике СВЧ-диапазона, т.е. на частотах более 300 МГц.

