

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт»

С.Н. Барсуков

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ И МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

Конспект лекций, часть 2

Харьков «ХАИ» 2007

4. Полупроводниковые диоды

4.1. Полупроводники как материалы полупроводниковой электроники

В полупроводниковой электронике находит применение широкий класс полупроводниковых материалов. К основным из них следует отнести:

1. Элементарные полупроводники, относящиеся к IV группе периодической системы элементов: кремний (Si), германий (Ge), т.е. 4-х валентные вещества.

2. Алмазоподобные полупроводники (по типу кристаллической решетки), т.е. вида $A^{III}B^V$, представляющие собой соединения элементов III группы (Al, Ge, In) с элементами V группы (As, P, Sb). Это такие вещества, как арсенид галлия (GaAs), фосфиды галлия и индия (GaP, InP), а также непрерывный ряд твердых растворов вида $Ga_xAl_{1-x}As$, $GaAs_{1-x}P_x$. В этих соединениях на один атом вещества приходится в среднем по 4 валентных электрона, поэтому по структуре кристаллической решетки они являются аналогами германия и кремния.

С точки зрения электропроводности полупроводники отличаются от металлов двумя факторами:

- "аномальной" зависимостью проводимости от температуры (увеличение электропроводности при возрастании температуры);
- сильной зависимостью проводимости от концентрации примесей.

Первый фактор является негативным с точки зрения стабильности параметров полупроводниковых приборов. В то же время возможность управлять в широких пределах электропроводностью полупроводника путем технологически регулируемого внедрения примесей является основой разнообразных применений полупроводников.

В структурах полупроводниковых приборов используют следующие разновидности полупроводников: собственный полупроводник, а также примесные полупроводники с дырочным и электронным типом проводимости.

Собственный полупроводник – это практически химически чистый беспримесный полупроводник. Проводящие свойства такого элемента определяются особой структурой энергетической диаграммы (рис. 4.1), где выделены такие энергетические зоны: ВЗ – валентная зона, ЗП – зона проводимости, а также запрещенная зона с энергетической шириной $\Delta\varepsilon_g$. При внешнем энергетическом

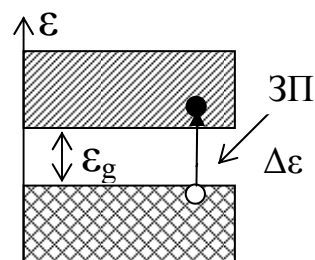


Рис. 4.1

ческом воздействии $\Delta\varepsilon > \Delta\varepsilon_g$, электрон переходит из валентной зоны на соответствующий энергетический уровень зоны проводимости (см. рис. 4.1). В результате появляются свободные подвижные носители зарядов: электроны в зоне проводимости и дырки в валентной зоне. (*Дырка* – это положительно заряженная квазичастица, которой соответствует не занятое электроном энергетическое состояние валентной зоны.) Концентрация этих зарядов определяет проводимость полупроводника.

Следовательно, проводящие свойства собственного полупроводника зависят от двух факторов:

внешнего энергетического воздействия (температуры);

внутреннего параметра полупроводника (ширины запрещенной зоны).

Из табл. 4.1 следует, что из типовых полупроводниковых материалов: германий, кремний и арсенид галлия лучшей температурной стабильностью обладает арсенид галлия.

Таблица 4.1

Полупроводник	InAs	PbS	Ge	Si	GaAs	GaP	CdS
Ширина запрещенной зоны $\Delta\varepsilon_g$, эВ	0,36	0,37	0,66	1,12	1,43	2,24	2,59

Концентрация температурно-зависимых электронов определяется следующим законом

$$n_i = B_n T^{3/2} e^{-\frac{\Delta\varepsilon_g}{2KT}},$$

где K – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, B_n – постоянный множитель, n_i – количество электронов в единице объема вещества (индекс i указывает на тип полупроводника intrinsic – собственный).

Концентрации свободных электронов для типовых полупроводников отличаются друг от друга на три порядка (табл. 4.2). Для сравнения концентрация свободных электронов в металлах имеет порядок 10^{22} 1/см³.

Таблица 4.2

Полупроводник	Ge	Si	GaAs
Концентрация свободных электронов, n_i [1/см ³]	$2,4 \cdot 10^{13}$	$1,45 \cdot 10^{10}$	$1,3 \cdot 10^7$

Очевидно, что в собственном полупроводнике обязательно выполняется условие равенства концентраций дырок и электронов:

$$p_i = n_i.$$

Это равенство является условием *электрической нейтральности* единицы объема собственного полупроводника.

Процесс *термогенерации* интерпретируется также на основе кристаллической структуры полупроводника. Собственный полупроводник представляет собой регулярную пространственно-периодическую структуру, плоская модель которой приведена на рис. 4.2. Между четырехвалентными атомами полупроводника, находящимися в узлах

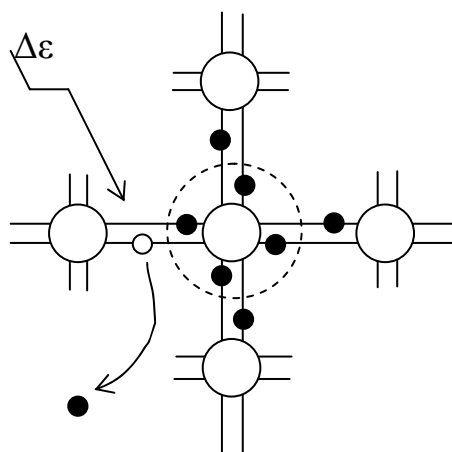


Рис. 4.2

решетки, устанавливаются ковалентные (двойные) связи. Каждая ковалентная связь создается для данного атома собственным электроном и электроном соседнего атома. Уровни энергий таких связанных электронов лежат в валентной зоне (см. рис. 4.1). Под влиянием внешнего энергетического воздействия $\Delta\varepsilon$ разрывается одна из валентных связей, электрон становится свободным, что соответствует его переходу на энергетический уровень проводимости. Разорванная валентная связь представляет собой вакантное место, т.е. дырку, которое может занять любой другой электрон.

Таким образом, с точки зрения кристаллической структуры *дырка* – это разорванная валентная связь в системе ковалентных связей атомов.

Таким образом, с точки зрения кристаллической структуры *дырка* – это разорванная валентная связь в системе ковалентных связей атомов.

Примесные полупроводники находят основное применение в полупроводниковой электронике. Технологически контролируемое введение в полупроводник незначительного количества примесей существенно изменяет его электрофизические параметры. Во-первых, сильно возрастает концентрация свободных носителей заряда. Во-вторых, их концентрация определяется не случайным внешним фактором – температурой, как у собственного полупроводника, а степенью его легирования. В-третьих, появляется возможность получения структур с избыточной концентрацией электронов (полупроводник *n*-типа) или дырок (*p*-типа).

Для получения полупроводников с дырочным типом проводимости применяют акцепторную примесь (accēptare - принимать), а для электронного полупроводника – донорную (donare - жертвовать).

Полупроводники *n*-типа (электронный, донорный) получают, используя пентавалентную донорную примесь. При формировании ковалентных связей с атомами основного вещества один электрон примеси имеет малую энергию связи с атомом (рис. 4.3). Поэтому энергетический уровень этого электрона (примесный уровень $\Delta\varepsilon_d$) находится вблизи зоны проводимости (рис. 4.4).

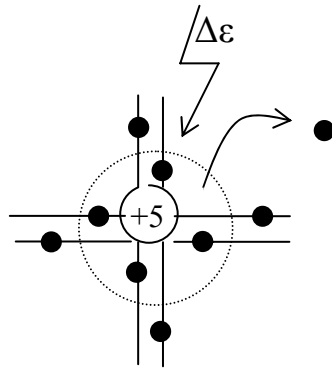


Рис. 4.3

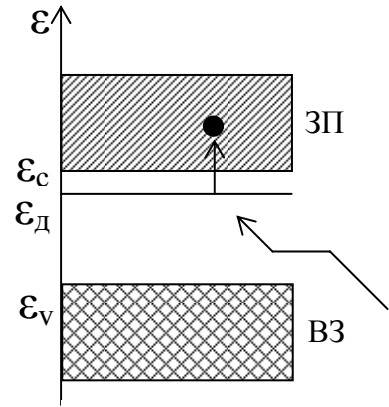


Рис. 4.4

Под действием небольшой энергии активации $\Delta\varepsilon_{\partial} = \varepsilon_c - \varepsilon_{\partial} \simeq \simeq 0,05$ эВ "лишний" электрон теряет связь с атомом примеси и становится свободным электроном проводимости. При этом нейтральный атом примеси превращается в положительный ион, т.е. примесь ионизируется. С энергетической точки зрения этот процесс соответствует переходу электрона с донорного уровня в зону проводимости. Концентрация свободных электронов резко возрастает и практически равна концентрации атомов примеси. Суммарная величина заряда в единице объема вещества должна равняться нулю, что соответствует статическому условию электрической нейтральности полупроводника:

$$n_n = p_n + N_{\mathcal{D}}^+, \quad (4.1)$$

где переменная определяет концентрацию, а индекс – тип полупроводника. Следовательно, концентрация электронов в n -полупроводнике n_n намного превышает концентрацию дырок p_n :

$$n_n \gg p_n, \quad \text{т.е.} \quad n_n \simeq N_{\mathcal{D}}^+,$$

поэтому в рассматриваемом типе полупроводника электроны – это основные носители заряда (ОНЗ), а дырки – неосновные носители заряда (ННЗ).

Полупроводник p -типа (дырочный, акцепторный) формируется при легировании трехвалентной акцепторной примесью. При этом атом примеси забирает еще один недостающий электрон от атома основного вещества (рис. 4.5).

Нейтральный атом примеси превращается в отрицательный ион, а появившаяся разорванная валентная связь представляет собой дырку. Малая энергия активации атомов акцепторной примеси определяет положение примесного энергетического уровня ε_a вблизи валентной зоны (рис. 4.6). Вследствие перехода электрона из валентной зоны на примесный уровень появляется дырка в валентной зоне.

Условие электронейтральности дырочного полупроводника имеет следующий вид:

$$p_p = n_n + N_A^-, \quad (4.2)$$

где p_p - концентрация ОНЗ (дырок);
 n_p - концентрация ННЗ (электронов);
 N_A^- - концентрация акцепторных отрицательных ионов,

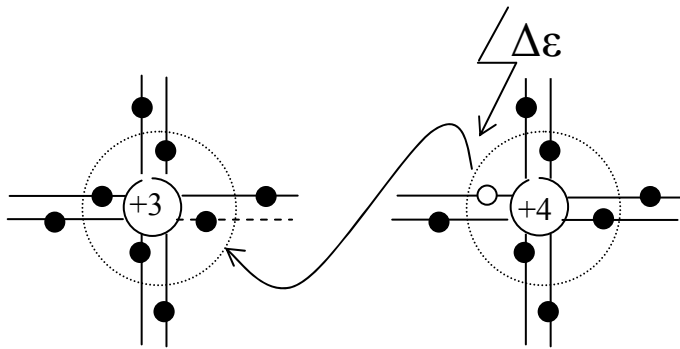


Рис. 4.5

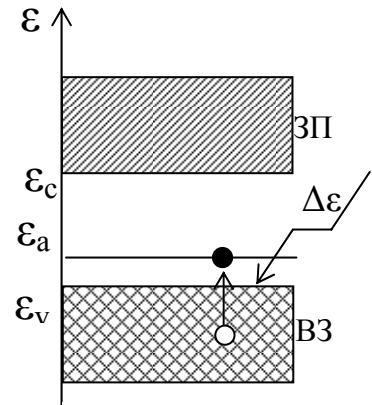


Рис. 4.6

причем

$$p_p \gg n_p, \text{ т.е. } p_p \approx N_A^-.$$

При комнатной температуре все атомы примеси ионизируются. Дальнейший рост концентрации свободных носителей заряда возможен только в результате процесса термогенерации пар электрон-дырка по принципу беспримесного полупроводника.

Для любого типа полупроводника справедливо соотношение, являющееся следствием термодинамического равновесия между процессами генерации носителей заряда и их рекомбинацией:

$$p \cdot n = n_i^2, \quad (4.3,а)$$

т.е. произведение концентраций разноименных свободных носителей заряда есть величина постоянная, равная квадрату концентрации собственных носителей. В частном случае

$$p_p \cdot n_p = n_i^2 \quad \text{— для } p\text{-полупроводника,}$$

$$n_n \cdot p_n = n_i^2 \quad \text{— для } n\text{-полупроводника.} \quad (4.3,б)$$

Это равенство отражает тот факт, что увеличение концентрации носителей одного знака приводит к уменьшению концентрации другого знака за счет роста вероятности рекомбинации.

Параметр, характеризующий *инерционные свойства* носителя заряда, называется подвижностью. Формально подвижность определяется как средняя дрейфовая скорость в поле единичной напряженности

$$\mu = \frac{v}{E}.$$

Подвижность носителей заряда является одним из существенных параметров полупроводника. Значения этого параметра во многом определяют пригодность вещества для изготовления полупроводниковых приборов. Выбор полупроводника с большей подвижностью зарядов позволяет реализовать прибор с большим потенциальным быстродействием.

Большая подвижность электрона, чем дырки, определяется меньшей его эффективной массой. Табл. 4.3 иллюстрирует зависимость подвижности от вида носителя заряда и материала полупроводника при $T = 300$ К.

Таблица 4.3

Подвижность, $\frac{см^2}{В \cdot с}$	Si	Ge	GaAs	InAs	InSb
μ_n электрона	1600	3900	8000	22600	78000
μ_p дырки	500	1900	400	200	750

Из типовых полупроводниковых материалов наилучшими частотными характеристиками обладает арсенид галлия. Два последних материала приведены для сравнения.

В примесных полупроводниках с увеличением концентрации примесей подвижность уменьшается, так как увеличивается рассеяние на ионизированных атомах примесей.

Токи в полупроводниках. Направленное движение носителей заряда в полупроводниках происходит под действием двух причин: дрейфа и диффузии.

Дрейф – это направленное движение носителей заряда под действием электрического поля.

Если ввести параметр удельной проводимости полупроводника

$$\sigma = qn\mu, \quad (4.4)$$

то плотность дрейфового тока соответствует закону Ома в дифференциальной форме

$$j = \sigma E.$$

Суммарная плотность дрейфового тока с учетом как электронов, так и дырок определяется по формуле

$$j_{др} = q(n\mu_n + p\mu_p) \cdot E.$$

Диффузионный ток связан с процессом направленного движения носителей заряда под действием разности концентраций (градиента концентраций). Так как перемещение зарядов происходит в направлении убывания концентрации, то плотности токов для дырок и электронов соответственно будут такими:

$$j_p = qD_p \left(-\frac{dp}{dx} \right) = -qD_p \frac{dp}{dx}, \quad (4.5)$$

$$j_n = (-q)D_n \left(-\frac{dn}{dx} \right) = qD_n \frac{dn}{dx}.$$

Здесь D – коэффициент диффузии [см²/с], значение которого определяется соотношением Эйнштейна

$$D = \varphi_T \mu,$$

где $\varphi_T = KT / q$ – тепловой потенциал, при комнатной температуре $T = 300$ К, $\varphi_T = 0,0258$ В.

4.2. Электронно-дырочный переход и его основное свойство

Электронно-дырочный переход (p - n -переход) – это переходный слой между двумя областями монокристалла полупроводника с различными типами проводимости. Эта область формируется при легировании полупроводника донорной (n -тип) и акцепторной (p -тип) примесями. Рассмотрим физические процессы при образовании перехода в симметричной структуре, т.е. $N_A = N_D$ (рис. 4.7).

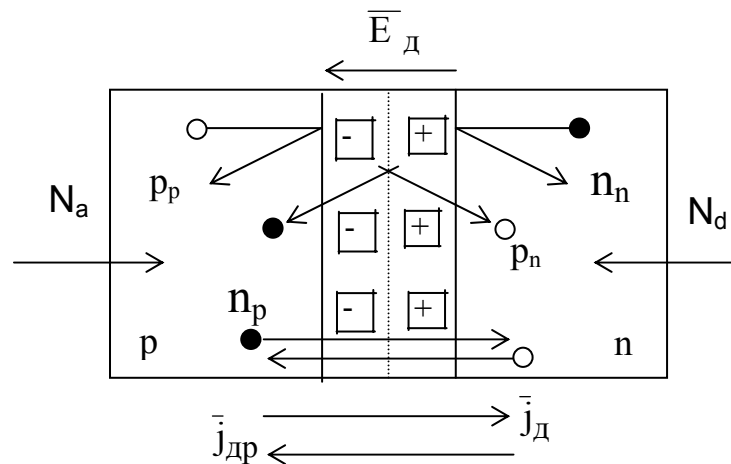


Рис. 4.7

В исходном состоянии по обе стороны от границы раздела соблюдаются условия электрической нейтральности:

$$p_p = N_A^- + n_p \text{ (} p\text{-тип)}, \quad n_n = N_D^+ + p_n \text{ (} n\text{-тип)}$$

с повышенной концентрацией дырок $p_p \gg n_p$ и электронов $n_n \gg p_n$ в соответствующих областях. Причем объемные заряды основных носителей практически компенсируются противоположными зарядами неподвижных ионов:

$$p_p \approx N_A^-, \quad n_n \approx N_D^+.$$

При таких условиях структура не может находиться в состоянии равновесия из-за резкого различия по концентрации одноименных носителей заряда по обе стороны от границы раздела:

$$p_p \gg p_n, \quad n_n \gg n_p.$$

Поэтому возникают следующие процессы по перераспределению зарядов:

1. Наличие градиента концентраций по одноименным зарядам вызывает процессы диффузионного переноса ОНЗ через границу раздела из приграничных областей. Такому направленному переносу носителей заряда соответствует диффузионный ток \bar{J}_D , совпадающий с направлением движения дырок.

2. Вследствие ухода ОНЗ нарушаются условия электрической нейтральности в приграничных областях: $N_A^- > p_p$, $N_D^+ > n_n$. Обнажаются заряды ионов: отрицательных в p -области, положительных в n -области, т.е. возникает двойной слой ионов – область пространственного заряда.

3. Между пространственно разнесенными разноименными зарядами ионов возникает диффузионное электрическое поле \bar{E} , направленное из области n в область p . Оно обеспечивает динамическую устойчивость, т.е. равновесное состояние данной структуры.

4. Возрастающее поле приводит к уменьшению диффузионного переноса основных носителей заряда. Так как вектор скорости диффузионного переноса направлен навстречу электрической силе $\bar{F} = q\bar{E}$ (см. верхнюю часть рис. 4.7), то диффузионное поле перехода является потенциальным барьером для основных носителей заряда.

5. Диффузионное поле является ускоряющим для неосновных носителей заряда, обеспечивая их дрейф через переход (см. нижнюю часть рис. 4.7), иначе говоря, это поле представляет собой потенциальную яму для ННЗ. Дрейфовому механизму переноса этих зарядов соответствует дрейфовый ток \bar{j}_{dp} , совпадающий с направлением движения дырок.

6. Процесс формирования электрического перехода завершается при установлении динамического равновесия между величинами дрейфового и диффузионного токов.

В результате контактных явлений образуется p - n -переход, состоящий из ионов примеси и нейтральных атомов основного вещества. Эта область представляет собой обедненный слой с пониженной кон-

центрацией подвижных носителей заряда и, как следствие, имеющий повышенное омическое сопротивление. Внутри перехода существует электрическое поле, связанное с величиной контактной разности потенциалов:

$$\varphi_k = \varphi_T \ln \frac{n_n p_p}{n_i^2},$$

или с учетом концентрации собственных носителей заряда (4.3,б)

$$\varphi_k = \varphi_T \ln \frac{p_p}{p_n} = \varphi_T \ln \frac{n_n}{n_p}. \quad (4.6)$$

Именно соотношение между концентрацией одноименных носителей заряда в разных областях проводимости определяет величину контактной разности потенциалов.

В зависимости от материала исходного полупроводника величина контактной разности потенциалов лежит в следующих пределах:

$$\varphi_k = 0,25 \dots 0,45 \text{ В} \quad - \quad \text{для Ge,}$$

$$\varphi_k = 0,5 \dots 0,9 \text{ В} \quad - \quad \text{для Si.}$$

Параметр φ_k увеличивается в полупроводниках с большей шириной запрещенной зоны, с увеличением концентрации легирующих примесей и уменьшается с ростом температуры.

Свойство односторонней проводимости перехода проявляется в большой величине прямого тока и малом значении обратного. Подключение к *p-n*-переходу внешнего источника напряжения нарушает динамическое равновесие между диффузионной и дрейфовой компонентами токов. В зависимости от полярности приложенного напряжения переход получает прямое смещение (подача прямого напряжения) или обратное. Смещение является прямым, если выполняется правило своего знака: к *p*-области (positiv) приложен положительный потенциал источника, а к *n*-области (negativ) – отрицательный потенциал. При обратном смещении нарушается соответствие потенциалов источника типу проводимости областей *p-n*-структуры, причем изменение полярности внешнего источника приводит к весьма существенному отличию прямого и обратного токов.

Прямое смещение *p-n*-перехода соответствует рис. 4.8. Внешний источник напряжения U создает внутри структуры электрическое поле $\vec{E}_{вн}$, направленное навстречу диффузионному полю перехода \vec{E}_d . Суммарное поле $E = E_d - E_{вн}$ внутри перехода уменьшается, т.е. падает величина потенциального барьера $\varphi_B = \varphi_k - U$. При этом уменьшается ширина перехода, которая в равновесном состоянии равнялась d . С уменьшением потенциального барьера большая часть ОНЗ (p_p, n_n) преодолевает этот барьер, что приводит к резкому увеличению диф-

фузионной компоненты тока \bar{J}_{diff} (направление тока совпадает с направлением диффузии дырок).

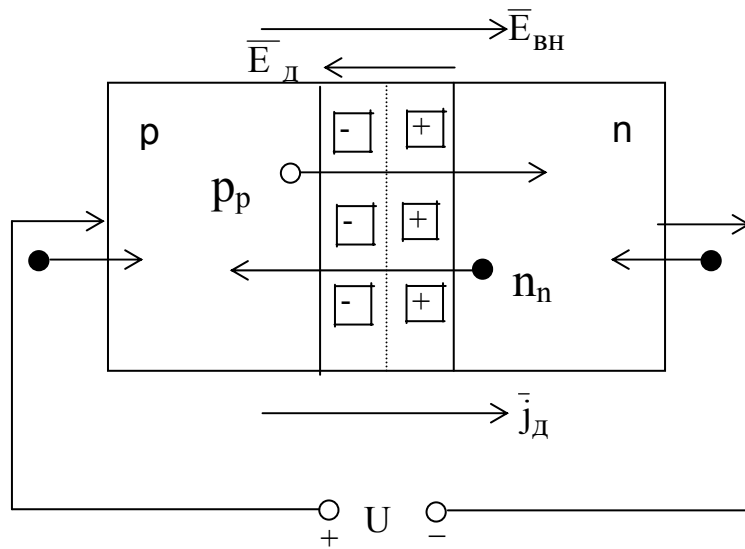


Рис. 4.8

Итак, в прямосмещенном $p-n$ -переходе протекает достаточно большой прямой ток, созданный основными носителями зарядов, который имеет диффузионный характер.

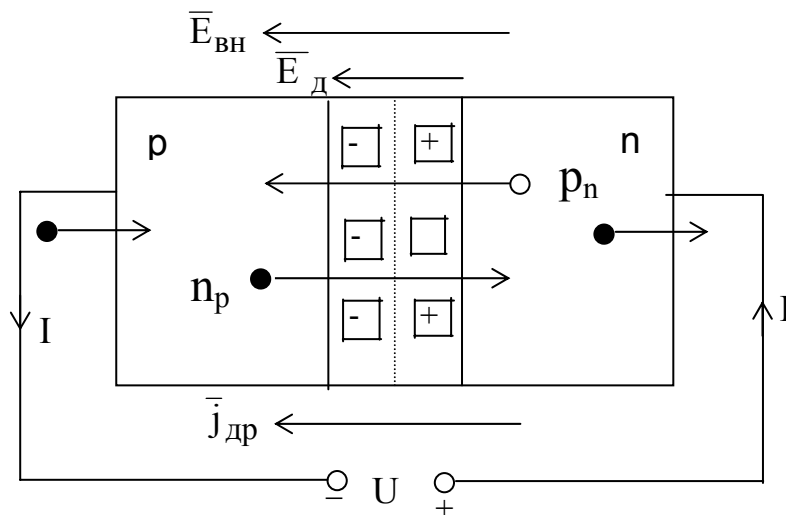


Рис. 4.9

Обратное смещение перехода соответствует нарушению правила своего знака (рис. 4.9). В этом режиме приоритетные условия создаются для дрейфа НЗ, а диффузионный ток ОНЗ практически отсутствует. Малая величина обратного тока обусловлена небольшой концентрацией НЗ, которые и создают этот ток. Поле, созданное внешним источником $\bar{E}_{вн}$, совпадает по направлению с полем перехода $\bar{E}_д$, что приводит к увеличению суммарного поля $E = E_д + E_{вн}$, а следова-

тельно, и высоты потенциального барьера для ОНЗ, поэтому диффузионный ток стремится к нулю. Дрейф ННЗ под действием ускоряющего суммарного поля перехода создает обратный ток перехода $\bar{j}_{др}$.

Под действием ЗЭН появляется ток во внешних выводах I , направленный по-прежнему от высокого потенциала к низкому.

Следовательно, обратный ток перехода имеет дрейфовый характер, является током ННЗ и тепловым током, так как концентрация ННЗ, а значит, и ток зависят от температуры.

Характерная особенность обратного тока – его независимость от величины обратного напряжения, что связано с малой концентрацией ННЗ. Поэтому этот ток называется также током насыщения.

Таким образом, свойство односторонней проводимости связано с наличием двух типов зарядов: ОНЗ (с высокой концентрацией) и ННЗ (с низкой концентрацией), а также фактора, регулирующего потоки этих зарядов, – диффузионного поля перехода. Причем E_d действует ускоряюще на ННЗ и оказывает тормозящее действие на ОНЗ. Усиливает или ослабляет этот регулирующий фактор соответствующая полярность внешнего источника смещения.

Вольт-амперная характеристика p-n-перехода. Электронно-дырочный переход является существенно нелинейным элементом. Если для резистора ток изменяется пропорционально приложенному напряжению, т.е. подчиняется линейному закону Ома, то рассматриваемая структура имеет нелинейную вольт-амперную характеристику (ВАХ).

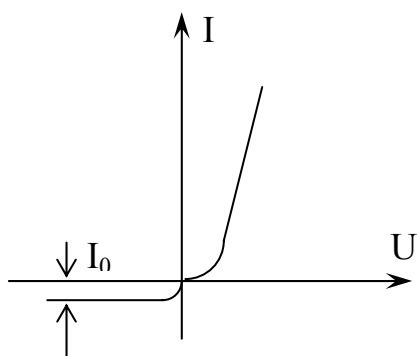


Рис. 4.10

Вольт-амперная характеристика определяет зависимость между током, протекающим через переход, и напряжением, приложенным к нему: $I = f(U)$. Эта характеристика показана на рис. 4.10. Прямая ветвь соответствует положительным напряжениям (прямое смещение перехода) и формируется диффузионным током ОНЗ. Обратная ветвь определяет ток насыщения I_0 , который является дрейфовым током ННЗ. Прямая и обратная ветви приведены в различных масштабах токов, что вызвало излом характеристики в начале координат.

Аналитическое представление ВАХ соответствует следующей экспоненциальной зависимости:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{U}{\Phi T}} - 1 \right), \quad (4.7)$$

где I_0 - обратный ток перехода,

φ_T - тепловой потенциал.

Для нелинейной ВАХ вводятся два понятия сопротивления. Пусть к p - n -переходу приложено напряжение $U(t) = U_p + u(t)$, содержащее как постоянную составляющую U_p , так и малую переменную составляющую $u(t)$. Тогда статическое сопротивление

$$R_{cm} = \frac{U_p}{I_p} \quad (4.8)$$

определяет сопротивление перехода постоянному току, а динамическое (дифференциальное)

$$R_d = \frac{dU}{dI} \approx \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (4.9)$$

соответствует сопротивлению по переменной составляющей. Для аналитического расчета R_d нужно взять производную от ВАХ (4.7):

$$\frac{1}{R_d} = \frac{dI}{dU} = \frac{I_0}{\varphi_T} e^{\frac{U}{\varphi_T}} = \frac{I + I_0}{\varphi_T}.$$

Пренебрегая малой величиной обратного тока, получаем расчетное соотношение для динамического сопротивления

$$R_d \approx \frac{\varphi_T}{I} \quad (4.10)$$

или при комнатной температуре

$$R_d \simeq \frac{26}{I(\text{mA})} (\text{Ом}).$$

При приближенном графическом расчете динамического сопротивления в окрестности рабочей точки строится характеристический треугольник, катеты которого определяют нужные для расчета (4.9) приращения ΔU и ΔI (рис. 4.11). Очевидно, что значения сопротивлений зависят от положения рабочей точки, а также уменьшаются с увеличением прямого напряжения. На ВАХ перехода влияет также выбор материала, из которого выполнена данная структура (рис. 4.12). Материал с более широкой запрещенной зоной $\Delta \varepsilon_{g2}$ обеспечивает большую высоту потенциального барьера и, как следствие, меньшее значение прямого тока $I_2 < I_1$ при одной и той же величине напряжения. Обратная ветвь характеристики для такого материала также соответствует меньшему значению тока насыщения, так как это ток неосновных но-

сителей заряда. Их концентрация уменьшается с увеличением ширины запрещенной зоны.

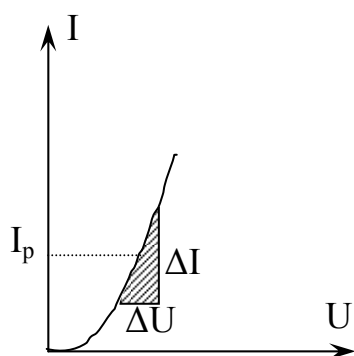


Рис. 4.11

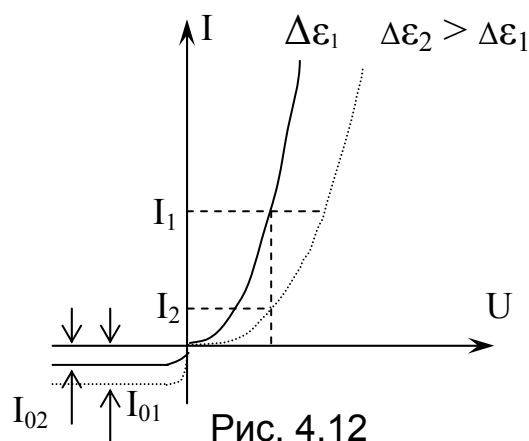


Рис. 4.12

ВАХ реальных p-n-переходов.

Реальные переходы являются несимметричными, т.е. дырочная и электронная области имеют разную степень легирования: слаболегированная область – база, высоколегированная – эмиттер.

Так, на рис. 4.13 при условии $N_A \gg N_D$ p-область представляет собой эмиттер, а n-область – базу.

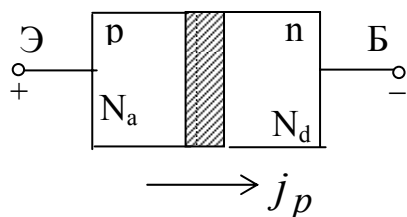


Рис. 4.13

Вследствие этого прямой диффузионный ток \bar{j}_p определяется в основном дырочной компонентой. Геометрически переход также несимметричен. На рис. 4.13 пунктиром показана «нейтральная» граница раздела.

Наличие более высокоомной базовой области приводит к тому, что внешнее напряжение действует не непосредственно на p-n-переход, а перераспределяется между базой и самим переходом.

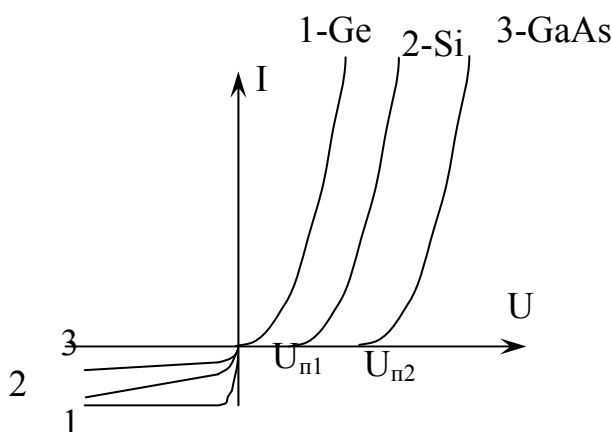


Рис. 4.14

Тогда в масштабе реальных рабочих токов прямая ветвь ВАХ имеет ярко выраженный пороговый эффект (рис. 4.14). Начальный участок прямой ветви, соответствующий малым токам, в данном масштабе не виден на графике, причем материалу с более широкой запрещенной зоной соответствует большее значение порогового напряжения.

Если для Ge-переходов $U_{n1} \approx 0$, то для Si - $U_{n1} \approx 0,5$ В, а для GaAs - $U_{n2} > 0,7$ В.

4.3. Диод как ключевой элемент

Идеальный ключевой элемент имеет ВАХ, представленную на рис. 4.15. Он характеризуется идеальным свойством односторонней проводимости: нулевым значением обратного тока и нулевым падением напряжения в проводящем состоянии. Бесконечное значение крутизны в начале координат указывает на нулевое значение статического и динамического сопротивлений.

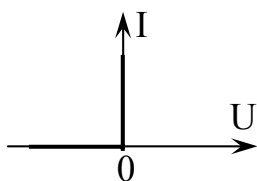


Рис. 4.15

Реальный диод имеет конечные значения обратного тока и прямого напряжения. Состояния ключевого элемента: проводящее (замкнутый ключ) и непроводящее (разомкнутый ключ) определяются полярностью импульсов, подаваемых на диод. Диод обеспечивает передачу импульса одной полярности от источника в нагрузку и блокирует передачу импульса противоположной полярности. В этом случае используется свойство односторонней проводимости диода. Наличие стрелки в условном графическом обозначении этого элемента отражает его основное свойство (рис. 4.16). Диод проводит ток, если его направление совпадает со стрелкой (I_{np} – прямой ток). При этом следует помнить, что ток протекает от высокого потенциала к низкому. Тогда эмиттерному выводу диода (аноду) соответствует положительный потенциал, а базе (катоде) – отрицательный.

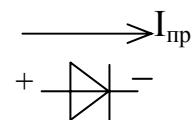


Рис. 4.16

Второй особенностью реального диодного ключевого элемента является его инерционность. Основные причины инерционности – это наличие барьерной и диффузионной емкости в структуре диода.

Диффузионная емкость – это емкость, образованная объемными зарядами инжектированных в базу неосновных и неравновесных основных носителей. Появление диффузионной емкости связано с процессом накопления избыточных носителей заряда в базовой области структуры (рис. 4.17). Прямое смещение перехода обеспечивает большую величину инжекционного тока (тока диффузии), который нарушает электрическую нейтральность базы (избыточный заряд дырок). В результате действия ЗЭН восстанавливается нейтральность

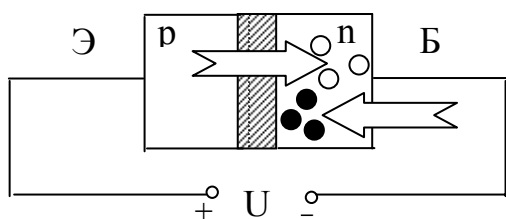


Рис. 4.17

этой области за счет эквивалентного потока дополнительных электронов от внешнего источника смещения. При конечном времени жизни неравновесных носителей устанавливается динамическое равновесие между процессами инжекции и рекомбинации в базовой области, что поддерживает наличие избыточного заряда. Таким образом, условиями реализации диффузионной емкости являются:

Таким образом, условиями реализации диффузионной емкости являются:

наличие прямого смещения (инжекционного тока) и конечного времени жизни неравновесных носителей заряда.

Количественно величина емкости определяется приращением накопленного заряда при изменении напряжения:

$$C_{\text{д}} = \frac{dQ}{dU}. \quad (4.11)$$

Этот процесс описывается следующей логической цепочкой:

$$\Delta U \uparrow \rightarrow \Delta j_{\text{диф}} \uparrow \rightarrow \Delta p_n \uparrow (\Delta Q \uparrow).$$

Для получения расчетной формулы выражение (4.11) записывается в эквивалентной форме:

$$C_{\text{д}} = \frac{dQ}{dI} \cdot \frac{dI}{dU}.$$

Так как $dI/dU = 1/R_{\text{д}}$ определяется через динамическое сопротивление, а накопленный заряд пропорционален времени жизни и величине прямого инжекционного тока ($Q = I\tau$, и $dQ/dI = \tau$), то

$$C_{\text{д}} = \frac{\tau}{R_{\text{д}}} = \frac{\tau I}{\Phi_T}. \quad (4.12)$$

Заметим, что произведение $C_{\text{д}}R_{\text{д}} = \tau$ всегда имеет размерность времени. При более точном расчете значение емкости, определяемой по формуле (4.12), следует уменьшить вдвое.

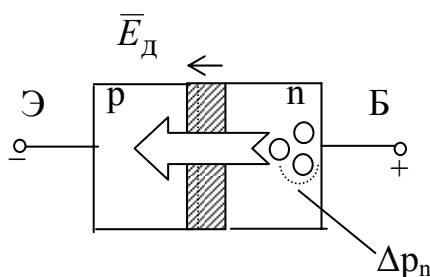


Рис.4.18

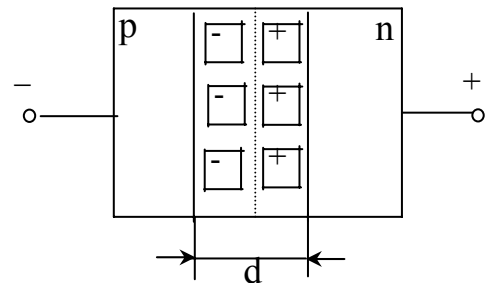


Рис. 4.19

Физически емкость проявляется в инерционности процесса установления обратного тока через переход при действии на него переменного напряжения. Появление выброса обратного тока во время отрицательного полупериода вызвано экстракцией накопленных в базе дырок обратно через p - n -переход (см. рис. 4.18). При повышенных частотах это приводит к ухудшению свойства односторонней проводимости. Для уменьшения диффузионной емкости базу легируют рекомбинационными примесями, которые снижают время жизни неосновных носителей.

Барьерная (зарядная) емкость – это емкость, образованная ионами примеси внутри самого p - n -перехода (рис. 4.19). Емкостный эффект проявляется в изменении объемного заряда ионов при измене-

нии обратного напряжения в соответствии со следующей логической цепочкой:

$$\Delta U \uparrow \rightarrow \Delta N_{\text{д}}^+, \Delta N_{\text{А}}^{-} \uparrow \rightarrow \Delta d \uparrow \rightarrow \Delta Q \uparrow.$$

Наличие емкости приводит к появлению дополнительной компоненты – емкостного тока

$$I_c(t) = \frac{dQ}{dt} = \frac{dQ}{dU} \cdot \frac{dU}{dt} = C_{\text{Б}} \frac{dU}{dt}.$$

Если провести аналогию с плоским конденсатором, обладающим емкостью

$$C = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{S}{d},$$

то расстояние между обкладками равно ширине *p-n*-перехода, причем ширина перехода зависит от величины обратного напряжения

$$d = a \left(\varphi_k + |U_{\text{обр}}| \right)^m,$$

где *a* – размерная константа, а *m* – зависит от закона распределения примесей при формировании перехода. В таком случае величина барьерной емкости определяется нелинейной зависимостью от обратного напряжения:

$$C_{\text{Б}} = \frac{C_0}{\left(1 + \frac{|U_{\text{обр}}|}{\varphi_k} \right)^m}, \quad (4.13)$$

где *C*₀ – номинальная емкость при *U* = 0, а *m* = 0,5 – 0,3 (0,5 – резкий переход, 0,3 – плавный).

Очевидно, что увеличение обратного напряжения приводит к расширению перехода, а следовательно, к уменьшению емкости. В то же время повышение концентрации примесей увеличивает плотность объемного заряда ионов, а значит, и барьерную емкость.

4.4. Нелинейный делитель напряжения

В отличие от резистивного линейного делителя напряжения, в нелинейном делителе вместо одного из резисторов включен нелинейный элемент – диод (рис. 4.20).

Для заданных *E, R* и известной характеристики диода определим величину тока в цепи *I* и падение напряжения на диоде *U*. Особенность схемы заключается в наличии нелинейного элемента – диода, в котором зависимость тока от напряжения не подчиняется закону Ома,

а описывается нелинейной ВАХ: $I = f(U)$. Анализ схемы можно провести двумя методами.

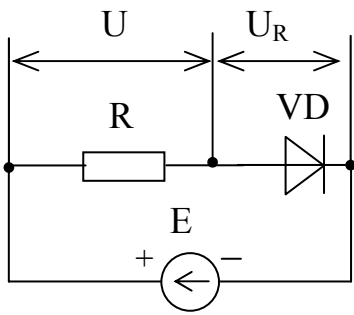


Рис.4.20

Графоаналитический метод. Анализируемая схема содержит два пассивных элемента – диод и резистор, которые описываются следующими зависимостями: $I = f(U)$, $U_R = IR$. Заменяем второе соотношение на уравнение, записанное по второму закону Кирхгофа, чтобы получить систему из двух уравнений с двумя неизвестными I, U : $I = f(U)$, $E = U + IR$. Так как одно из уравнений нелинейное, то решать систему точным аналитическим методом не представляется возможным.

Поэтому используется графический метод решения. Для этого находим точку пересечения нелинейной ВАХ с прямой, которая описывается

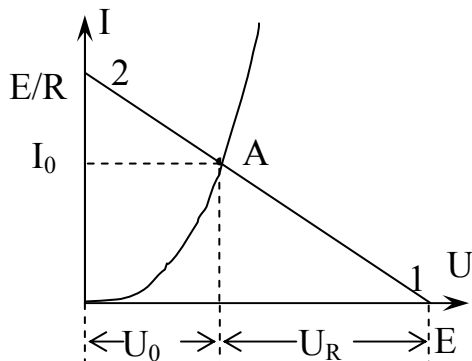


Рис. 4.21

вторым уравнением системы. Прямую строим по двум точкам, взятым на осях координат (рис. 4.21). Координаты точки (1), лежащей на оси напряжений, $I = 0$, $U = E$, для точки (2), лежащей на оси токов, $U = 0$, $I = E/R$. Ненулевые координаты определяются подстановкой соответствующих нулевых токов и напряжений в уравнение прямой. Эти же значения тока и напряжения можно определить схемотехнически.

Точка (1) соответствует режиму холостого хода, когда цепь разомкнута, т.е. $I = 0$. Точка (2) – режиму короткого замыкания, когда диод замкнут накоротко, так как $U = 0$. Тогда длины отрезков, отсекаемых прямой на осях координат, численно равны напряжению холостого хода и току короткого замыкания: $U_x = E$, $I_{кз} = E/R$, что отмечается соответствующими индексами. Построенная прямая называется нагрузочной прямой.

Нагрузочная прямая – это ВАХ линейного элемента (резистора нагрузки), построенная в системе координат нелинейного элемента (диода). Решением системы уравнений является точка А – рабочая точка. Ее координаты определяют ток в цепи I_0 и падение напряжения на диоде U_0 . ЭДС источника E перераспределяется между диодом и резистором, т.е. $E = U_0 + U_R$.

Приближенный аналитический метод. В этом методе задаются средней величиной падения напряжения на диоде, например, $U = 0,7$ В – для кремниевого диода, $U = 0,3$ В – для германиевого. Основанием для такого приближения является большая крутизна ВАХ

диодов особенно при повышенных токах. Поэтому ток в цепи определяется через падение напряжения на резисторе:

$$I_0 = \frac{U_R}{R} = \frac{E - U}{R}. \quad (4.14)$$

4.5. Выпрямительные диоды

Выпрямительный диод предназначен для преобразования переменного тока в однополярный пульсирующий. Работа диода основана на свойстве односторонней проводимости. Процесс преобразования приложенного к диоду переменного напряжения приведен на рис. 4.22.

В преобразованном законе изменения тока содержится постоянная составляющая

$$I_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} I_m \sin(\omega t) dt = \frac{I_m}{\pi}, \quad (4.15)$$

так как циклическая частота $\omega = 2\pi/T$. Поэтому приведенное выше преобразование называется выпрямлением.

Пример маркировки выпрямительного диода КД109А. Первый элемент (буква или цифра) определяет полупроводниковый материал, на основе которого изготовлен диод (Г или 1 – германий, К или 2 – кремний, А или 3 – арсенид галлия). Второй элемент (буква Д) – подкласс диода (выпрямительный, импульсный, универсальный). Третий элемент (цифра) определяет функциональное назначение диода (101-299 – выпрямительные, причем две последние цифры – это порядковый номер разработки). Шестой элемент (буква А) определяет разновидность по некоторым параметрам.

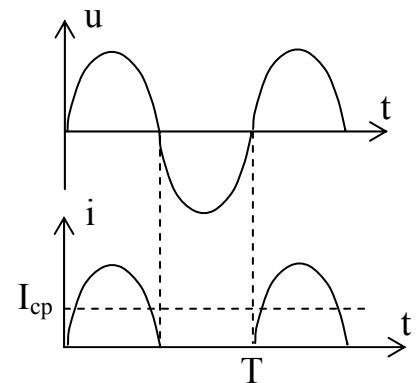


Рис. 4.22

Основные параметры выпрямительных диодов объединяются в такие группы:

1. Предельно эксплуатационные – это максимальные параметры, превышение которых приводит к выходу прибора из строя. Эти значения ограничивают возможный рабочий диапазон ВАХ как на прямой, так и на обратной ветви (рис. 4.23). Очевидно, что ограничению подлежат наиболее динамичные параметры:

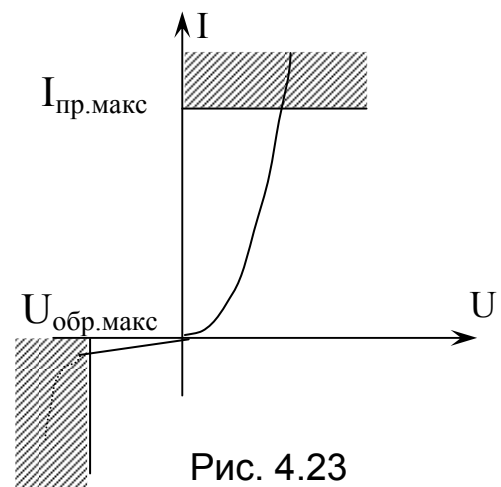


Рис. 4.23

а) максимальное значение прямого тока $I_{\text{пр.макс}}$ (или средний прямой ток, учитывая эффект выпрямления,

см. рис. 4.22); б) максимальное обратное напряжение $U_{обр. макс}$ (постоянное или импульсное). Превышение прямого тока приводит к недопустимому разогреву структуры, а увеличенное значение обратного напряжения выводит на участок пробоя ВАХ, что нарушает свойство односторонней проводимости. Обычно это напряжение берется с некоторым запасом $U_{обр. макс} = (0,5 - 0,8)U_{проб.}$. По величине среднего выпрямленного тока различают диоды малой $I_{пр.ср.макс} < 0,3$ А (параметр маркировки – 101-199) и средней мощности $0,3 А < I_{пр.ср.макс} < 10$ А (201-299). Диапазоны указанных предельных параметров составляют: по обратному напряжению – от десятков до тысяч вольт, по прямому току – от сотен миллиампер до десятков (сотен) ампер.

Температурный диапазон работы диодов ограничен снизу $t = -60^{\circ}\text{C}$, а сверху, в зависимости от материала, Ge – 85°C , Si – 125°C , GaAs – 150°C .

2. Статические электрические параметры определяют степень близости реального выпрямительного диода к идеальному. Идеальный ключевой элемент имеет ВАХ, представленную на рис. 4.15. Он характеризуется идеальным свойством односторонней проводимости.

Реальный диод имеет следующие (конечные) значения соответствующего тока и напряжения (см. рис. 4.23):

а) $U_{пр}$ – прямое падение напряжения при заданном прямом токе ($I_{пр.макс}$), или среднее значение этого напряжения (десятичные доли вольта);

б) $I_{обр}$ – обратный ток при заданном обратном напряжении ($U_{обр. макс}$) (от долей микроампер до единиц миллиампер).

3. Динамические параметры характеризуют выпрямительный эффект диода при действии на него переменного напряжения. К ним относятся:

а) $I_{вн.ср}$ – среднее за период значение выпрямленного тока;

б) $I_{обр.ср}$ – среднее за период значение обратного тока;

г) $f_{гр}$ – граничная частота, на которой выпрямленный ток уменьшается до заданного уровня.

Операция усреднения соответствует выражению (4.15). При повышении частоты выпрямленный ток уменьшается, так как увеличивается импульс обратного тока в результате проявления эффекта накопления носителей заряда.

Выпрямительные диоды имеют следующие особенности. Малое сопротивление в прямом направлении позволяет пропускать большие прямые токи. Высокие значения прямых токов требуют электрических переходов с большой площадью. Поэтому диоды имеют большие значения барьерных и диффузионных емкостей, т.е. работают на низких частотах. Частотный диапазон составляет от 50 Гц для сети переменного тока и достигает нескольких десятков килогерц в транзисторных преобразователях напряжения.

Диоды имеют сравнительно большие размеры и предусматривают конструктивные особенности для возможности рассеивания больших тепловых мощностей.

В основном эти диоды изготавливаются на основе кремния, меньшая часть – на основе германия, кроме того, выпускаются диоды из арсенида галлия. Используются электрические переходы в виде *p-n*-структур, металл-полупроводник. Выпрямляющие переходы с чередованием *p-i-n*-областей характеризуются повышенными значениями обратных напряжений.

Кремниевые диоды в сравнении с германиевыми обладают целым рядом преимуществ: они имеют большие значения прямых токов и обратных напряжений, меньшие величины обратных токов

$$I_{обр}(Ge) = I_{обр}(Si)10^{1,5...2},$$

а также рассеивают большие мощности. К числу их недостатков следует отнести более высокие падения напряжений: $U_{пр}(Si) = 0,7...1,2$ В, $U_{пр}(Ge) = 0,3...0,5$ В. Это связано с большей величиной контактной разности потенциалов, а также более высоким сопротивлением базы из-за меньшей подвижности носителей заряда.

Диоды из арсенида галлия могут работать при больших температурах (до $250^{\circ}C$) и имеют лучшие частотные характеристики, но при этом более высокие падения напряжения (АД112А $U_{пр} = 3$ В, АД110А $U_{пр} = 1,5$ В) и небольшие допустимые обратные напряжения ($U_{обр.макс} = 30 ... 50$ В).

4.5.1. Применение выпрямительных диодов

1. Однополупериодная схема выпрямления. Схема содержит выпрямительный диод VD, резистор нагрузки R и емкость фильтра C

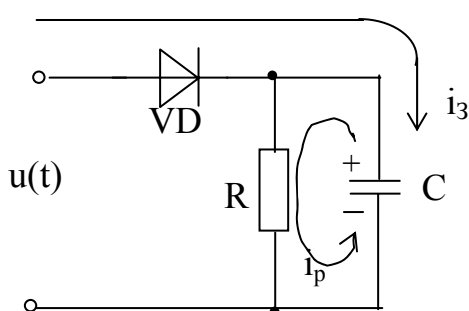


Рис. 4.24

(рис. 4.24). Диод преобразует входное переменное напряжение в пульсирующее U_R . При отсутствии емкости выпрямленное напряжение выделяется на резисторе нагрузки. Емкость осуществляет сглаживание выходного напряжения U_{RC} (отфильтровывает, выделяет постоянную составляющую U_0). В течение интервала времени t напряжение на емкости превосходит мгновенное значение входного напряжения $U_C > U(t)$, поэтому диод закрыт. Емкость медленно разряжается через резистор. Как только входное напряжение превысит емкостное $U(t) > U_C$, диод открывается и происходит быстрый заряд емкости в течение t_3 через диод.

При этом он пропускает короткие импульсы зарядного тока i_3 длительностью t_3 , причем импульсный ток заряда намного больше среднего выпрямленного тока, так как из условия равенства зарядов $I_3 t_3 = I_{cp} T$ (рис. 4.25). Для эффективного сглаживания выпрямленного напряжения резистор нагрузки должен шунтироваться (закорачиваться) емкостью по переменной составляющей, т.е. соотношение между емкостным и активным сопротивлением должно удовлетворять следующему неравенству:

$$X = \frac{1}{\omega C} \ll R.$$

Учитывая, что $\omega = 2\pi/T$, и полагая, что десятикратное отличие в сопротивлениях достаточно, получаем эквивалентное равенство

$$\tau_p = RC = 10T/2\pi > T.$$

Следовательно, постоянная времени разряда емкости должна превышать период входного напряжения T . Заметим, что емкость разряжается по закону экспоненты

$$u_c(t) = U_{c0} e^{-\frac{t}{\tau_p}},$$

т.е. в течение $t = \tau_p$ напряжение на емкости уменьшается в e раз.

Параметр, который определяет качество выпрямительной схемы, – это коэффициент пульсаций $K_{\Pi} = \Delta U/U_0$, где ΔU – диапазон напряжения пульсаций. Так как ток через диод протекает в течение небольшого интервала времени, то пульсации выходного напряжения аппроксимируются пилообразным законом. Изменение заряда на емкости $\Delta Q = \Delta UC = I_0 T$, где средний ток в нагрузке $I_0 = U_0/R$, откуда $\Delta U = U_0 T/(RC)$, следовательно, коэффициент пульсаций

$$K_{\Pi} = \frac{T}{\tau_p} = \frac{1}{fRC}. \quad (4.16)$$

4.6. Опорные диоды

Опорные диоды – это полупроводниковые приборы, в которых используются участки ВАХ с высокой крутизной, т.е. слабой зависимостью изменений напряжения от изменений тока.

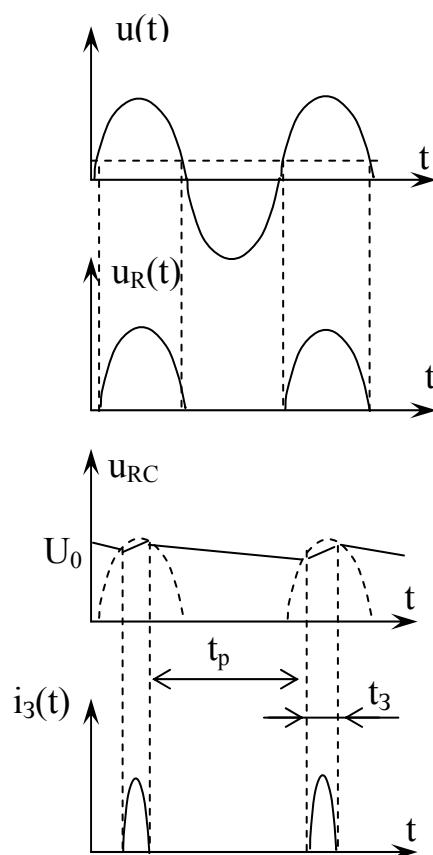


Рис. 4.25

Такие диоды осуществляют процесс стабилизации напряжения, т.е. поддержание практически неизменной величины напряжения в широком диапазоне изменений тока. На ВАХ диода имеются два участка с высокой крутизной как при прямом, так и при обратном смещении (рис. 4.26). Диод работает на участке стабилизации, если прямое напряжение превышает некоторое пороговое значение $U_{пр} > U_n$, а обратное – напряжение пробоя $U_{обр} > U_{проб}$. В соответствии с этим существуют две разновидности опорных диодов: 1) стабилитроны, использующие участок электрического пробоя (обратное смещение $U > 3$ В); 2) стабисторы, работающие на участке прямой ветви диода ($U_{ст} = 0,7...2$ В). Диапазоны стабилизируемого напряжения $U_{ст} = 0,7...2$ В – для стабистора и $U_{ст} > 3$ В – для стабилитрона определяются, соответственно, падением напряжения на прямосмещенном кремниевом переходе и минимальным напряжением электрического пробоя.

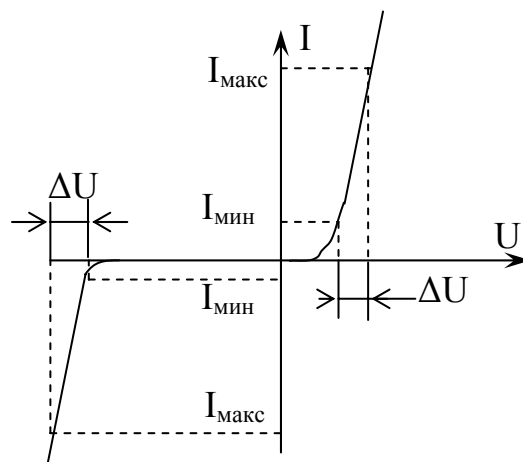


Рис. 4.26

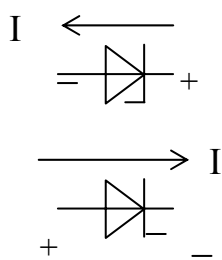


Рис. 2.27

Условные графические обозначения приведены на рис. 2.27. Здесь же указаны полярности рабочих напряжений, а также направления рабочих токов. В маркировке опорных диодов для указания подкласса стабилитронов или стабисторов используется функциональный элемент обозначения С (например КС168А). Три последующих цифровых элемента обозначают мощность диода и напряжение стабилизации. Опорные диоды разбиты на три подгруппы по величине рассеиваемой мощности, а внутри каждой подгруппы проведена дифференциация по величине напряжения стабилизации (табл. 4.4).

Таблица 4.4

$P < 0,3$ Вт	$P = 0,3...5$ Вт	$P > 5$ Вт	$U_{ст},$ В
101...199	401...499	701...799	0,1...9,9
210...299	510...599	801...899	10...99
301...399	601...699	901...999	101...199

По двум последним цифрам определяется величина напряжения стабилизации, причем значащая разрядность цифр зависит от строки таблицы. В первой строке между двумя последними цифрами ставится запятая, во второй – непосредственно выделяются две цифры, а в третьей – к двум цифрам добавляется единица в старшем разряде. Так, указанный выше диод имеет $U_{ст} = 6,8$ В и соответствует маломощному диоду с мощностью $P < 0,3$ Вт. Для более поздних разработок

диодов две последние цифры не определяют точное значение напряжения стабилизации, а только указывают на принадлежность к соответствующему диапазону. Так, например, стабилитроны средней мощности КС406А, КС509А имеют напряжения стабилизации, соответственно, $U_{ст1} = 8,2 \text{ В}$, $U_{ст2} = 14,7 \text{ В}$. Первый из указанных выше диодов принадлежит 1-ой строке таблицы, а второй – 2-ой строке. Для опорных диодов ранних выпусков присвоен числовой интервал 801...899 без градации по мощности и напряжению стабилизации. Так, мощный стабилитрон Д815А имеет $U_{ст} = 5,6 \text{ В}$.

Первоначальный выбор требуемого диода проводится по двум основным классификационным параметрам: рассеиваемой мощности и напряжению стабилизации.

Основные параметры опорного диода характеризуют, в частности, «геометрические» особенности ВАХ (рис. 4.28). К таким параметрам относятся:

- 1) номинальное (среднее) значение напряжения стабилизации или диапазон его изменения ($U_{ст.мин} \dots U_{ст.макс}$);
- 2) диапазон изменения тока на участке стабилизации ($I_{ст.мин} \dots I_{ст.макс}$);
- 3) динамическое сопротивление R_d , которое определяет крутизну характеристики;
- 4) температурный коэффициент напряжения стабилизации

$$ТКН = \alpha = \frac{\Delta U}{U_{ст} \Delta T},$$

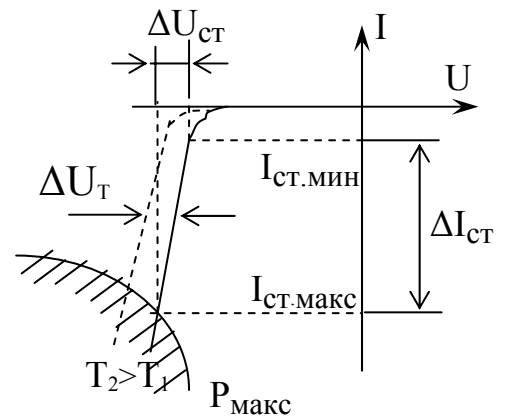


Рис. 4.28

где $\Delta T = T_2 - T_1$, что определяет температурную стабильность диода по основному параметру – напряжению стабилизации;

- 5) максимально допустимая рассеиваемая мощность $P_{макс} = I_{ст.макс} U_{ст.макс}$, которая предохраняет переход диода в режим теплового пробоя.

К предельным эксплуатационным параметрам относятся: $P_{макс}$, $I_{ст.макс}$, $I_{ст.мин}$. Превышение первых двух параметров приводит к выходу прибора из строя, а при $I < I_{ст.мин}$ резко уменьшается крутизна ВАХ и увеличивается уровень шума на предпробойном участке. Минимальные значения тока стабилизации находятся в пределах 0,5...3 мА.

Динамическое сопротивление определяет качество стабилизации. Чем меньше этот параметр (выше крутизна ВАХ), тем в меньших пределах изменяется напряжение стабилизации при изменении тока. Это сопротивление составляет от единиц до десятков ом для маломощных диодов и увеличивается до сотен ом в диодах большей мощности. Это

связано с тем, что напряжение стабилизации увеличивается с уменьшением степени легирования.

В зависимости от применения существуют следующие разновидности опорных диодов: общего назначения, импульсные, двуханодные, прецизионные (термокомпенсированные).

Диоды общего назначения используют для получения фиксированного (опорного) напряжения в схемах, для стабилизации постоянного напряжения в некотором диапазоне изменения тока. В цепях переменного тока - для ограничения мгновенных значений напряжения, т.е. получения неизменного напряжения в некотором малом временном интервале. В импульсных схемах они используются как быстродействующие пороговые элементы, так как в этих диодах нет инжекционных процессов накопления. Импульсные опорные диоды применяются для ограничения (фиксации) амплитуды импульсных сигналов.

В таких диодах минимизирована барьерная емкость, что позволяет получать малую длительность переходных процессов. Например, импульсный стабилитрон 2С175Е имеет общую емкость не более 7 пФ и время переключения порядка 1 нс.

Двуханодные диоды эквивалентны встречно-последовательному включению двух идентичных опорных диодов (рис. 4.29), поэтому

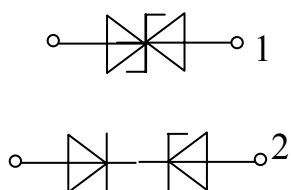


Рис. 4.29

имеют специфическое условное графическое обозначение. Эти диоды имеют симметричную ВАХ и применяются для стабилизации двухполярных напряжений или двухстороннего ограничения переменных, а также для защиты элементов цепи от перенапряжений обеих полярностей, причем в них нормируется несимметричность уровней напряжений стабилизации. Так, диод КС182А при $U_{ст} = 8,2$ В имеет несимметричность напряжения $\Delta U = 0,33$ В.

Так, диод КС182А при $U_{ст} = 8,2$ В имеет несимметричность напряжения $\Delta U = 0,33$ В.

4.6.1. Параметрический стабилизатор напряжения

Принцип стабилизации напряжения раскрывается на основе простейшей схемы (рис. 4.30). Она содержит два основных элемента: стабилитрон VD и балластный резистор R_B . Резистор нагрузки R_H – это элемент цепи, на котором стабилизируется напряжение U_H . Схема обеспечивает практическую неизменность выходного напряжения при изменении входного ΔE относительно номинального E . Следует отметить, что диод подключается параллельно резистору нагрузки, так как именно при таком включении напряжение на этих двух элементах совпадает.

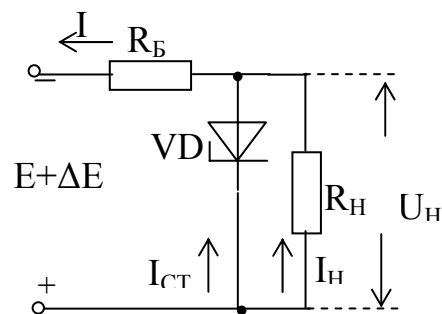


Рис. 4.30

Балластный резистор выполняет двойную роль: в статическом режиме ограничивает величину тока через диод, а в динамическом – обеспечивает эффект стабилизации.

Статический режим работы схемы анализируется при постоянном номинальном значении входного напряжения E . ЭДС входного источника распределяется между нагрузкой и балластным резистором:

$$E = U_H + U_B, \quad (4.17)$$

а общий ток I делится между диодом и резистором нагрузки:

$$I = I_{CT} + I_H. \quad (4.18)$$

Установим взаимосвязь между входным и выходным напряжениями. Тогда на основе (4.17) с учетом (4.18) имеем

$$E = U_H + (I_{CT} + I_H)R_B. \quad (4.19)$$

Выражая токи через выходное напряжение, получим

$$E = U_H + \left(\frac{U_H}{R_{CT}} + \frac{U_H}{R_H} \right) R_B,$$

или окончательно

$$E = U_H \left(1 + \frac{R_B}{R_{CT}} + \frac{R_B}{R_H} \right), \quad (4.20)$$

где R_{CT} - статическое сопротивление диода.

Для анализа схемы в динамическом режиме заменим диод динамическим сопротивлением R_D . Тогда эквивалентная схема относительно изменений входного напряжения приведена на рис. 4.31. Эквивалентное сопротивление параллельной цепи определяется по формуле

$$R_3 = \frac{R_D R_H}{R_D + R_H}$$

а так как $R_D \ll R_H$, то справедливо приближенное равенство

$$R_3 = \frac{R_D}{\frac{R_D}{R_H} + 1} \approx R_D.$$

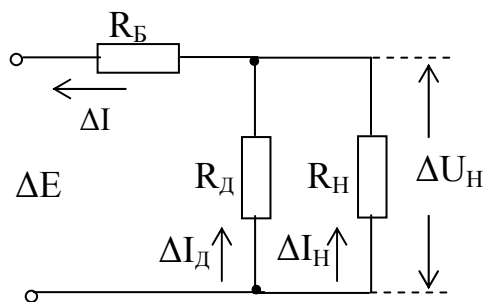


Рис. 4.31

В этой схеме реализован принцип делителя напряжения относительно изменений входного напряжения, т.е. ΔE распределяется между R_B и R_D . Так как $R_D \ll R_B$, то основное приращение напряжения падает на балластном резисторе, а изменение выходного напряжения незначительно:

$$\Delta U_H = \Delta E \frac{R_D}{R_B + R_D} \approx \Delta E \frac{R_D}{R_B},$$

т.е. $\Delta U_H \ll \Delta E$. Отсюда становится очевидным назначение и название балластного резистора, он играет роль балласта, на котором падает основное изменение напряжения, поэтому только небольшая часть изменяющегося напряжения выделяется на резисторе нагрузки.

В этой схеме реализован также вспомогательный эффект – делителя приращений тока. Изменение общего тока, возникшее из-за нестабильности входного напряжения, делится между параллельными элементами R_D и R_H . Так как $R_D \ll R_H$, то основное изменение тока пройдет через диод $\Delta I_D \gg \Delta I_H$, а поэтому $\Delta U_H = I_H R_H$ также будет незначительным. Из эквивалентной схемы (см. рис. 4.31) следует

$$\Delta U_H = \Delta I \frac{R_D R_H}{R_D + R_H},$$

откуда

$$\Delta I_H = \Delta I \frac{R_D}{R_D + R_H} \approx \Delta I \frac{R_D}{R_H}, \quad \text{т.е.} \quad \Delta I_H \ll \Delta I.$$

В целом для динамического режима можно записать следующее соотношение по второму закону Кирхгофа:

$$\Delta E = \Delta U_H + (\Delta I_{CT} + \Delta I_H) R_B,$$

или по аналогии с (4.20)

$$\Delta E = \Delta U_H \left(1 + \frac{R_B}{R_H} + \frac{R_B}{R_D} \right). \quad (4.21)$$

Качество стабилизации всей схемы определяется коэффициентом стабилизации

$$K_{CT} = \frac{\Delta E / E}{\Delta U_H / U_H}, \quad (4.22)$$

который показывает, во сколько раз относительные изменения входного напряжения больше, чем выходного. Используя взаимосвязь входных и выходных напряжений в статике (4.20) и динамике (4.21), получаем

$$K_{CT} = \frac{1 + \frac{R_B}{R_D} + \frac{R_B}{R_H}}{1 + \frac{R_B}{R_{CT}} + \frac{R_B}{R_H}}. \quad (4.23)$$

Таким образом, здесь реализован схемотехнический принцип стабилизации напряжения, основанный на нелинейном делителе напряжения. Нелинейный элемент – диод, включенный в одно из плечей делителя, имеет существенные отличия в двух параметрах: статическом и динамическом сопротивлениях ($R_{CT} \gg R_D$). Благодаря этому он

удерживает сравнительно большое статическое напряжение при малой величине падения напряжения относительно его изменений.

Наряду с физическим и аналитическим обоснованиями принципа работы схемы можно дать и геометрическую интерпретацию на основе нагрузочной прямой. Построим линию нагрузки, используя опыты холостого хода и короткого замыкания. Режим холостого хода соответствует разрыву ветви с диодом (см. рис. 4.30). В точках подключения диода напряжение холостого хода составляет

$$U_x = \frac{E}{R_H + R_B} R_H.$$

Режим короткого замыкания $U = 0$ соответствует короткому замыканию ветви с диодом, тогда ток короткого замыкания в цепи $I_K = E/R_B$. Отмечая точки холостого хода (1) и короткого замыкания (2) на осях координат ВАХ диода, получаем нагрузочную прямую (рис. 4.32). Нестабильность входного напряжения вызывает параллельное смещение нагрузочной прямой. Аналогично можно проанализировать изменение положения прямой при варьировании резисторов R_B и R_H .

Основная характеристика рассмотренной схемы, определяющая

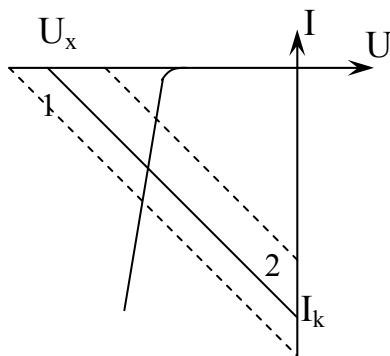


Рис. 4.32

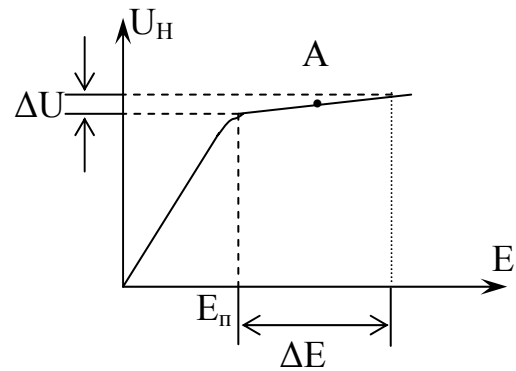


Рис. 4.33

взаимосвязь входного и выходного напряжений, - это передаточная динамическая характеристика $U_H = f(E)$ (рис. 4.33). При $E < E_п$ схема работает в режиме холостого хода, т.е. диод закрыт, а входное напряжение делится между R_B и R_H . Значение порогового входного напряжения определяется из условия перехода диода в режим пробоя $U_x = U_{ст}$ т.е.

$$E_п = U_{ст} \left(1 + \frac{R_B}{R_H} \right).$$

По этой характеристике находится экспериментальное значение коэффициента стабилизации (2.9). Номинальные значения напряжений E и U_H соответствуют рабочей точке А (см. рис. 4.33).

4.6.2. Импульсные ограничители

При ограничении импульсных сигналов следует использовать импульсные ограничительные диоды, например 2С211Е. Схема, приведенная на рис. 4.34, обеспечивает селекцию импульсов по амплитуде. Если амплитуда импульса меньше порога ограничения, то цепь разомкнута. В этом случае амплитуды импульсов недостаточно для обеспечения электрического пробоя диода, работающего в режиме стабилитрона. Импульсы, амплитуды которых превышают порог ограничения, переводят диод в режим электрического пробоя. Тогда на резисторе нагрузки выделяются «верхушки» импульсов (за вычетом падения напряжения на диоде).

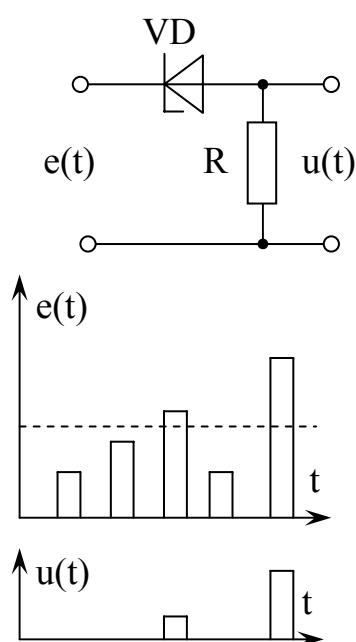


Рис. 4.34

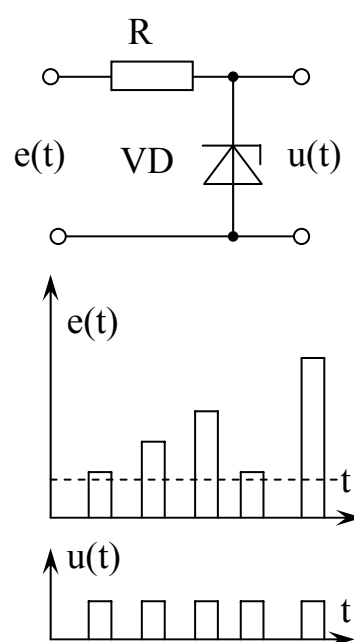


Рис. 4.35

Схема, приведенная на рис. 4.35, обеспечивает фиксацию амплитуды импульсов. Если порог ограничения стабилитрона меньше амплитуды любого из импульсов, то диод работает в режиме электрического пробоя. Тогда на диоде поддерживается эталонная амплитуда импульсов.

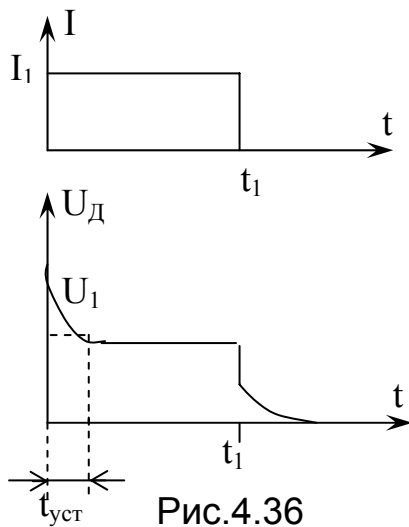
4.7. Диоды, работающие в режиме переключения

4.7.1. Импульсные диоды

Импульсный диод – это диод, имеющий малую длительность переходных процессов и предназначенный для применения в импульсных режимах работы.

Переходные процессы в диоде возникают при включении или переключении его с прямого смещения на обратное. Физическими причинами

инерционности являются: эффект накопления и рассасывания неравновесных носителей заряда в базе (эффект диффузионной емкости), а также перезаряд барьерной емкости перехода.



Переходной процесс при прохождении через диод импульса прямого тока большой амплитуды показан на рис. 4.36. В первый момент на диоде падает относительно большое напряжение U_1 , которое постепенно уменьшается до установившегося значения. Этот переходной процесс включения связан с эффектом модуляции проводимости базы диода. По мере накопления избыточных носителей заряда в базе при инжекции уменьшается ее объемное сопротивление, что приводит к уменьшению падения напряжения. Время

установления прямого напряжения $t_{уст}$ – это интервал времени от начала импульса прямого тока до момента достижения заданного значения прямого напряжения на диоде ($1,2U_{уст}$).

С момента окончания импульса прямого тока t_1 происходит медленное уменьшение напряжения на диоде, что соответствует этапу послеинжекционной ЭДС. Концентрация избыточных носителей заряда в базе не может измениться мгновенно, поэтому напряжение уменьшается по мере рекомбинации зарядов в базе. Скачок напряжения в момент времени t_1 обусловлен исчезновением падения напряжения на объемном сопротивлении базы при нулевом значении тока.

Переходный процесс переключения диода приведен на рис. 4.37

Диод управляется генератором ЭДС - E с малым внутренним сопротивлением. В момент времени t_1 происходит коммутация диода с прямого смещения на обратное. Проводящее состояние диода $t < t_1$ характеризуется постоянным прямым током I_1 , величина которого ограничивается сопротивлением источника. В этом случае в базовой области устанавливается динамическое равновесие между процессами инжекции неравновесных носителей заряда и их рекомбинацией, что определяет величину накопленного заряда

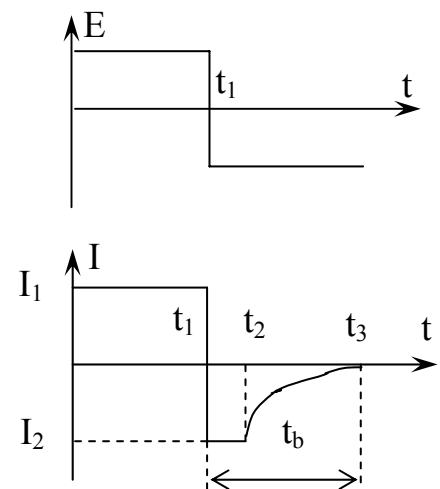


Рис. 4.37

$Q_n = I_1 \tau$, где τ - время жизни избыточных зарядов. Переходный процесс переключения состоит из следующих этапов:

Этап высокой обратной проводимости $t_1 < t < t_2$. Ток изменяет направление, так как происходит экстракция неосновных неравновесных носителей заряда через переход в эмиттерную область.

Этап восстановления обратного сопротивления $t > t_2$. После уменьшения концентрации избыточных зарядов до нуля вблизи перехода происходит экспоненциальное падение тока.

Длительность переходного процесса t_e определяется двумя вышеуказанными этапами. Время восстановления обратного сопротивления – это интервал времени, в течение которого обратный ток после смены полярности напряжения уменьшается до заданного значения.

Параметры импульсных диодов могут быть сгруппированы следующим образом:

1. Динамические параметры, определяющие быстродействие диода:

- время установления прямого сопротивления τ_y ;
- время восстановления обратного сопротивления τ_e ;
- емкость диода C_D (от долей до единиц пикофарад).

Параметр τ_y определяет время включения диода, которое ограничивает минимальную длительность импульса. Параметр τ_e задает время переключения диода с прямого смещения на обратное, т.е. определяет минимальный период следования импульсов. В качестве критерия быстродействия может указываться также заряд переключения. Это величина заряда, который выводится из базы для перевода диода в закрытое состояние, т.е. связан с отрицательным выбросом обратного тока. Заряд переключения меньше накопленного, так как часть избыточных зарядов рекомбинирует внутри базы.

2. Статические параметры, определяющие степень идеальности диода как прибора с односторонней проводимостью:

- постоянное прямое падение напряжения $U_{пр}$ (при заданном прямом токе);
- постоянный обратный ток $I_{обр}$ (при заданном обратном напряжении).

3. Предельные параметры, предотвращающие пробой или тепловое разрушение структуры:

- постоянное или импульсное обратное напряжение $U_{обр}$ (от десятков до единиц вольт);
- максимальное значение прямого тока $I_{пр.макс}$ (постоянного, импульсного или среднего).

Импульсные диоды изготавливаются на основе германия, кремния и арсенида галлия. Наряду с дискретными вариантами (одиночными диодами) выпускаются наборы диодов: сборки или матрицы

(КДС525А, 2ДС627А, 2Д917А). Это совокупность идентичных диодных структур, выполненных на одном кристалле, которые не соединены электрически или объединены по заданной схеме. Число диодов в такой конструкции от 4 до 16.

4.7.2. Диоды с накоплением заряда

Диод с накоплением заряда (ДНЗ) – это диод, принцип действия которого основан на эффекте накопления неосновных носителей заряда в базовой области.

В этом диоде в качестве рабочего участка используется импульс обратного тока, который формируется в процессе рассасывания накопленных ранее избыточных носителей заряда, причем технологически обеспечиваются условия получения короткого прямоугольного импульса с большой амплитудой. За счет внутреннего встроенного электрического поля уменьшается также длительность спада обратного тока $\Delta t = t_3 - t_2$ (рис. 4.38), появление которого связано с рассасыванием НЗ из внутренних областей базы. Поэтому этот прибор называют также диодом с резким восстановлением обратного сопротивления (т.е. с малым временем t_B).

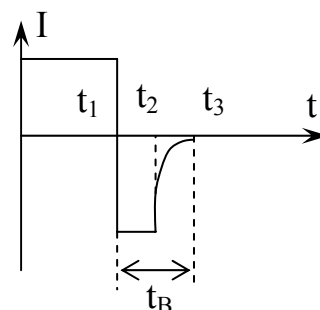


Рис. 4.38

Работа диода состоит из двух этапов. В течение первого ($t > t_1$), подготовительного, этапа происходит накопление зарядов в базовой области за счет инжекции. Во время второго ($t_1 < t < t_3$) - формируется короткий рабочий импульс. Встроенное электрическое поле, уменьшающее длительность обратного импульса, получают за счет неравномерного распределения примесей в базовой области. Вследствие местной диффузии электронов происходит перераспределение зарядов в приграничной области. Появляется двойной слой разноименных зарядов, состоящий из избыточных электронов с одной стороны и нескомпенсированных положительных ионов примеси с другой (рис. 4.39).

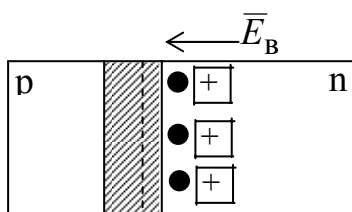


Рис. 4.39

Между ними возникает встроенное электрическое поле E_e . Это поле препятствует диффузии дырок вглубь базы во время инжекции, поэтому избыточные заряды накапливаются в приграничной области p - n -перехода. При переключении диода с прямого смещения на обратное это поле ускоряет процесс рассасывания дырок, обеспечивая их движение в сторону перехода.

ДНЗ относятся к импульсным диодам, что и определяет их основные токовые параметры этого общего класса. Кроме того, эти диоды имеют такие специфические параметры:

1. Время выключения $t_{\text{вык}}$ определяет длительность формируемого обратного импульса.

2. Заряд переключения $Q_{\text{пк}}$ – это часть накопленного заряда, которая вытекает во внешнюю цепь при изменении направления тока с прямого на обратный.

3. Эффективное время жизни неосновных носителей заряда $\tau_{\text{эфф}}$ определяет длительность рекомбинации избыточных неосновных носителей заряда в базе диода. Формально это время соответствует отношению заряда, переносимого переходным обратным током, к значению прямого тока $\tau_{\text{эфф}} = Q/I_{\text{пр}}$.

4. Максимально допустимый импульсный обратный ток $I_{\text{макс. имп}}$ является предельным параметром, а также определяет амплитуду импульса обратного тока, формируемого диодом.

Например, время выключения диода 2Д528А составляет 50 пс, импульсный прямой ток – 200 мА, а 2Д524Б – 200 пс и 1 А соответственно.

Одно из основных назначений ДНЗ – это формирование коротких импульсов большой амплитуды с длительностью в несколько десятков пико- или наносекунд.

4.7.3. Р-і-п-диоды

Р-і-п-диод – это диод с трехслойной структурой, состоящей из высокоомного слоя собственного полупроводника, расположенного между двумя сильнолегированными областями р- и n-типов (рис. 4.40).

Работа диода основана на эффекте накопления избыточных зарядов в области собственного полупроводника.

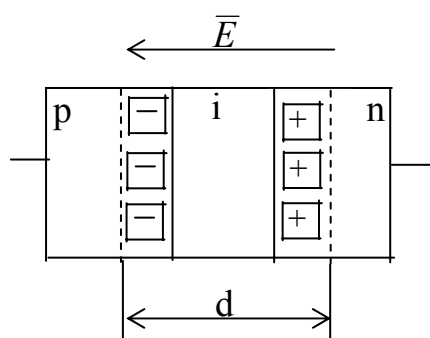


Рис. 4.40

Область полупроводника с собственной электропроводностью значительно увеличивает толщину р-п-перехода d , что позволяет получить малые емкости диода. Сопротивление обедненной области обычно велико (порядка нескольких десятков килоом), так как наличие внутреннего поля еще более обедняет i -слой, т.е. число собственных носителей заряда уменьшается. Такие диоды еще называют регулируемыми резистивными диодами, так как его сопротивление

в значительной мере определяется концентрацией зарядов в i -области. Величина сопротивления может меняться в широких пределах в зависимости от протекающего через диод тока.

Количество зарядов, накопленных в i -области, определяется величиной тока инжекции и временем жизни неравновесных носителей, а проводимость прибора – плотностью зарядов в промежуточном слое.

Работа диода в режиме переключения основана на резком отличии концентрации свободных носителей заряда в i -области при прямом и обратном смещениях. Быстродействие процесса ограничено временем рассасывания носителей заряда из i -слоя при переключении с прямого напряжения на обратное. Предельные частоты переключения составляют 40 ГГц.

В корпусе прибора может содержаться либо одиночная структура ($p-i-n$) – 2A503A, либо пара с общим анодом ($n-i-p-i-n$) – 2A505A.

Основные параметры диодов:

1. Емкость диода C (0,2...1) пФ.
2. Время обратного восстановления $\tau_{обр}$ (60...2 мкс, для СВЧ-диодов уменьшается до 5...100 нс).
3. Прямое сопротивление потерь при заданном токе определяет активную составляющую полного сопротивления диода (единицы ом).
4. Максимально допустимая величина обратного напряжения предотвращает переход диода в режим пробоя (100...200) В.
5. Максимальная величина рассеиваемой мощности (от единиц до десятков ватт).
6. Максимальная величина прямого тока (100...500) мА.

Три последних параметра относятся к предельно допустимым, первые два определяют инерционные свойства, причем за время $\tau_{обр}$ происходит рассасывание зарядов из i -области, т.е. восстанавливается обратное сопротивление. Время прямого восстановления на один-два порядка меньше.

4.7.4. Диоды Шотки

Диод Шотки – это диод, выпрямительное свойство которого основано на использовании электрического перехода металлполупроводник.

Электрический переход между металлом и полупроводником может обладать свойством односторонней проводимости (выпрямляющий переход) или подчиняться линейному закону Ома (омический переход). Омический переход применяется для формирования внешних выводов от полупроводниковых областей.

В рассматриваемом приборе используется электрический переход Шотки. Этот переход возникает между металлом и полупроводником, если они имеют разные величины работ выхода электронов. Для полупроводника n -типа работа выхода из него должна быть меньше, чем работа выхода из металла, т.е. $A_n < A_M$ (p -тип полупроводника удовлетворяет обратному неравенству $A_n > A_M$).

В результате перераспределения электронов в приконтактной области формируется электрический переход. Он состоит из положительных ионов полупроводника и приповерхностного слоя электронов

металла (рис. 4.50). Поле перехода представляет собой потенциальный барьер для электронов полупроводника. Только небольшая часть высокоэнергетичных электронов способна преодолеть этот барьер и перейти в область металла.

Равновесное состояние структуры характеризуется толщиной перехода d , напряженностью поля \vec{E} и высотой энергетического $q\phi_K$ или потенциального барьера

$$\phi_K = \frac{A_M - A_{\Pi}}{q}. \quad (4.24)$$

Эта величина еще называется контактной разностью потенциалов.

Прямое смещение на переходе уменьшает потенциальный барьер для электронов полупроводника, что приводит к увеличению этой компоненты тока (рис. 4.51). Встречный поток электронов из металла при этом остается прежним, так как металл экранирует поле перехода и высота барьера для этих электронов не изменяется. Следовательно, прямой ток создается потоком электронов через переход, переходящих из полупроводника в металл.

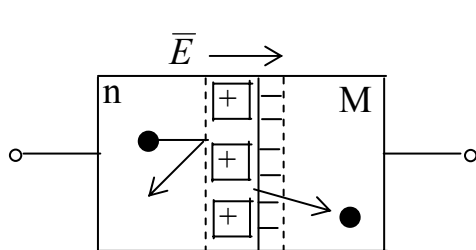


Рис. 4.50

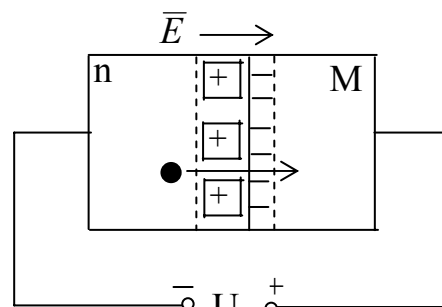


Рис. 4.51

При обратном смещении перехода остается только компонента малого электронного потока из металла в полупроводник, что связано с увеличением барьера для прямого потока. Обратный ток является током насыщения, так как не зависит от величины обратного напряжения.

ВАХ диода формально описывается зависимостью, аналогичной $p-n$ -переходу

$$I = I_s \left(e^{\frac{U}{\Phi_T}} - 1 \right), \quad (4.25)$$

причем экспоненциальный характер сохраняется в очень широком диапазоне изменения тока.

Для диодов Шоттки можно привести следующие отличительные особенности:

1. Отсутствует диффузионная емкость, связанная с процессами накопления и рассасывания неосновных носителей в базовой области. Поэтому высокое быстродействие определяется только малым временем перезаряда барьерной емкости.

2. Величины прямого падения напряжения меньше, чем в кремниевых $p-n$ -переходах. Типовые значения составляют $0,4 \dots 0,5$ В.

3. Способность пропускать большие величины прямых токов. Это связано с хорошим теплоотводом от металлической области структуры и малым прямым напряжением.

4. Сравнительно небольшие величины максимально допустимых обратных напряжений (несколько десятков вольт). Это определяется краевыми эффектами при пробое. Кроме того, для арсенида галлия не удастся получить малую концентрацию дефектов, что также уменьшает пробивное напряжение.

Диоды изготавливают на основе кремния или арсенида галлия с электропроводностью n -типа из-за большей подвижности носителей заряда. Условное обозначение диода приведено на рис. 4.52. Маркировка диода определяется областью его применения. Диоды Шоттки используются, в частности, в быстродействующих импульсных схемах.

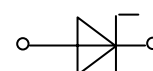


Рис. 4.52

4.7.5. Туннельные диоды (Езаки)

Туннельный диод – это диод на основе вырожденного полупроводника, в котором туннельный эффект приводит к появлению на прямой ветви участка с отрицательным динамическим сопротивлением.

Условное графическое обозначение диода показано на рис. 4.53. Прибор работает при прямом смещении перехода, полярность этого напряжения также указана на рисунке. Для изготовления этих диодов

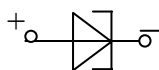


Рис. 4.53

применяются полупроводники с высокой концентрацией примесей в p - и n -областях. Вследствие сильной степени легирования переход имеет малую толщину, примерно на два порядка меньшую, чем в обычных диодах. Кроме того, в вырожденных полупроводниках

изменяется структура энергетической диаграммы. В результате квантово-механического взаимодействия

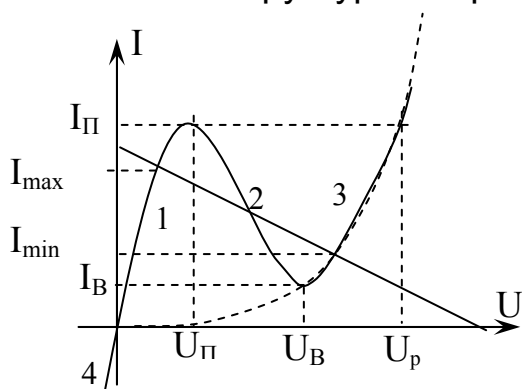


Рис. 4.54

атомов примеси примесные уровни расщепляются в примесную зону, которая сливается с валентной зоной p -области и с зоной проводимости n -области.

Вольт-амперная характеристика диода показана на рис. 4.54. Эта зависимость имеет две особенности. В диапазоне прямых напряжений

$U_n < U < U_e$ («падающий» участок – 2) диод имеет отрицательное динамическое сопротивление, когда с увеличением напряжения ток уменьшается. Кроме того, этот диод не обладает свойством односторонней проводимости. При изменении полярности напряжения (участок 4) обратный ток имеет такую же величину, как и прямой (участок 1).

Для сравнения на рисунке пунктиром показана ВАХ диода, соответствующая обычному $p-n$ -переходу. Превышение прямого тока для туннельного диода на участках 1,2 над диффузионным током свидетельствует о наличии дополнительного механизма токопереноса – туннельного тока.

Основные параметры туннельных диодов целесообразно разбить на следующие группы:

1. Статические параметры, отражающие геометрические особенности ВАХ (см. рис. 4.54):

- ток пика I_n - прямой ток в точке максимума характеристики;
- ток впадины I_e - прямой ток в точке минимума ВАХ;
- отношение токов пика и впадины I_n/I_e косвенно определяет крутизну падающего участка ВАХ;
- напряжение пика U_n - прямое напряжение, соответствующее пиковому току;
- напряжение впадины U_e - прямое напряжение, соответствующее току впадины;
- напряжение раствора U_p - прямое напряжение большее U_e , при котором ток равен пиковому.

2. Динамические параметры:

- емкость диода C_B ;
- отрицательное сопротивление R_d .

3. Предельные эксплуатационные параметры:

- максимальное значение прямого тока $I_{пр. макс}$ (или $U_{пр. макс}$);
- максимальное значение обратного тока $I_{обр. макс}$;
- максимальная рассеиваемая мощность $P_{макс}$.

Форма ВАХ определяет применение туннельных диодов в быстродействующих импульсных и переключательных схемах. Различие двух уровней сигнала обеспечивают параметры I_n/I_e , а также U_n, U_e, U_p . При этом линия нагрузки должна пересекать ВАХ на трех участках прямой ветви диода (см. рис. 4.54), тогда нужно выбирать $R_H > R_d$.

Подкласс туннельных диодов при их маркировке отмечают элементом – буквой И. Третий элемент маркировки диода (цифра) определяет функциональное назначение: 3 – переключательный (АИ301А).

4.7.6. Обращенные диоды

Обращенный диод – это разновидность туннельного диода, проводимость которого при обратном напряжении больше, чем при прямом.

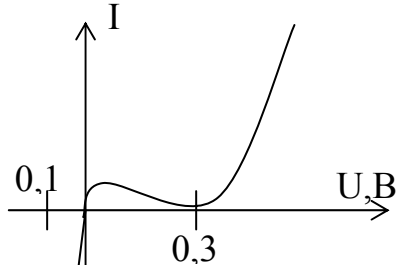


Рис. 4.55

ВАХ этого диода является обратной (перевернутой) по отношению к характеристике классического *p-n*-перехода и занимает меньший интервал напряжений (рис. 4.55). Обратная ветвь $0 < U_{обр} < 0,1$ В соответствует проводящему состоянию диода, а участок прямой ветви $U < 0,3$ В – непроводящему. В интервале напряжений $-0,1 < U < 0,3$ В диод обладает свойством односторонней проводимости в обратном проявлении.

Условное обозначение диода показано на рис. 4.56. Здесь же указана полярность напряжения, соответствующая проводящему состоянию (ток направлен против стрелки диода). В маркировке диода 1И401А использованы следующие основные элементы:

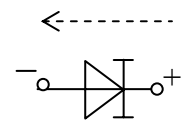


Рис. 4.56

И – подкласс туннельных диодов;

4 – обращенный диод (как разновидность туннельного).

Принцип действия прибора основан на туннельном эффекте в обратносмещенном переходе, выполненном из полупроводника, находящегося на границе вырождения. В отличие от туннельного диода степень легирования здесь ниже.

Основные параметры обращенных диодов:

1. Постоянное прямое напряжение (при заданной малой величине прямого тока) $U_{пр}$ ограничивает рабочий участок непроводящей прямой ветви (Ge – 0,35 В, GaAS – 0,6 В).

2. Постоянное обратное напряжение (при заданном обратном токе) определяет падение напряжения для проводящего состояния $U_{обр}$ (около 0,1 В);

3. Постоянный обратный ток является предельным параметром, ограничивающим рабочий участок проводящего состояния $I_{обр. макс}$ (1...8 мА).

4. Постоянный прямой ток является предельным параметром для непроводящего состояния $I_{пр. макс}$ (0,3...0,8 мА).

5. Емкость диода определяет инерционные свойства C (единицы пикофард).

Из анализа параметров следуют основные преимущества обращенных диодов: малое падение напряжения делает их незаменимыми при обработке слабых сигналов, высокое быстродействие диода определяется малой величиной его емкости, так как проводящая обратная ветвь диода соответствует туннельному току, поэтому отсутствует эффект накопления неосновных носителей ($C_{\text{диф}} = 0$), а туннелирование – это малоинерционный процесс. Следует обратить внимание также на малую величину максимально допустимого напряжения для непроводящего состояния.

Диоды применяются в быстродействующих импульсных схемах при малых уровнях сигналов.