

Электроника.

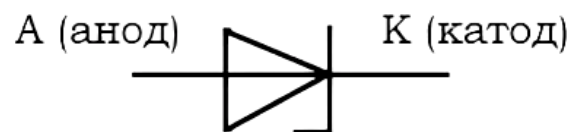
Лекция 2

Тема: Диоды. Математические модели диодов. Маркировка диодов.

Диоды. Схемы включения и основные характеристики диодов. Схемы стабилизаторов напряжения. Математические модели диодов. Примеры маркировки диодов.

Стабилитроны

Стабилитроны — это диоды, использующие участок вольт-амперной характеристики р-п-перехода, соответствующий обратному электрическому пробую (рис. 1.5, в). Стабилитрону, как показывает само название, свойственна стабильность, т. е. неизменность падения напряжения на нем при изменениях в несколько раз тока, протекающего через него. Благодаря этому свойству стабилитроны широко применяются в качестве источников опорного напряжения, которое должно оставаться неизменным при каких-либо изменениях других параметров схемы. Применяются они и как стабилизаторы напряжения при небольших мощностях нагрузки. Условно графическое обозначение обыкновенного стабилитрона приведено на рисунке.



Рассмотрим и проанализируем схему простейшего стабилизатора напряжения (параметрический стабилизатор), схема приведена на рис. 1.5, б. Во избежание теплового пробоя последовательно со стабилитроном включают резистор R_0 (рис. 1.5, б), ограничивающий ток $I_{ст}$, который является обратным током для р-п-

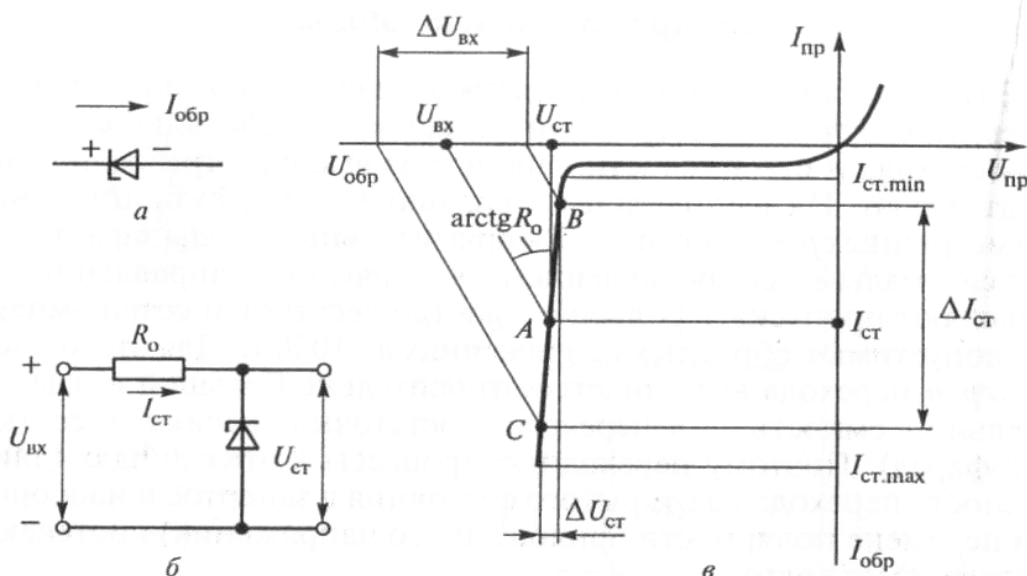


Рис. 1.5 Стабилитрон:

а — условное обозначение; б — схема включения; в — вольт-амперная характеристика

структуры стабилитрона. При изменениях входного напряжения dU_{BX} (рис. 1.5, в) меняются ток dI_{cm} и падение напряжения от этого тока на R_0 . Значения тока I_{cm} и его изменений определяются точками А, В и С пересечения вольт-амперной характеристики р-п-перехода и прямых, проведенных под углом $\arctg R_0$ из точек U_{BX} и его изменений, отложенных на оси $U_{обр.}$. Точка А определит значение U_{cm} при среднем значении U_{BX} , а точки В и С — изменения dU_{cm} при изменениях dU_{BX} .

Дифференциальное сопротивление стабилитрона на участке ВС равно

$$r_{\partial u\phi} = dU_{cm} / dI_{cm}. \quad (1.1)$$

Если напряжение U_{cm} может изменяться в обе стороны от своего среднего значения, то точку А выбирают на середине линейного участка вольт-амперной характеристики стабилитрона, причем

$$U_{BX.} = U_{cm.} + I_{cm} R_0 \quad (1.2)$$

Перейдя от (1.2) к приращениям, запишем

$$d U_{BX.} = dU_{cm.} + dI_{cm} R_0$$

а подставив dI_{cm} из (1.1), получим

$$d U_{BX.} = dU_{cm.} + dU_{cm.} R_0 / r_{\partial u\phi}$$

откуда

$$dU_{cm.} = d U_{BX.} / (1 + R_0 / r_{\partial u\phi})$$

При $R_0 \gg r_{\partial u\phi}$ получим, что $dU_{cm.} \ll dU_{BX}$ и стабилизация тем лучше, чем больше отношение $R_0 / r_{\partial u\phi}$,

Основными параметрами стабилитронов являются:

- напряжение стабилизации $U_{cm.}$;
- минимальный ток стабилизации I_{cm} , при котором наступает устойчивый электрический пробой р-п-перехода;
- максимальный ток стабилизации $I_{cm \max}$, при котором мощность, рассеиваемая на стабилитроне, не превышает допустимого значения;
- дифференциальное сопротивление $r_{\partial u\phi}$;
- максимальная мощность рассеяния P_{\max} , при которой еще не наступает тепловой пробой р-п-перехода;
- температурный коэффициент стабилизации α_{cm} — отношение относительного изменения напряжения стабилизации к абсолютному изменению температуры окружающей среды (выражается в %/ град):

$$\alpha_{cm} = dU_{cm} / (U_{cm} \cdot dT)$$

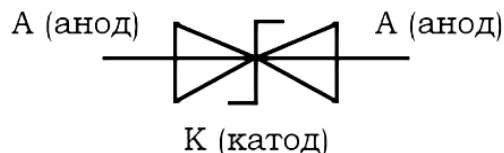
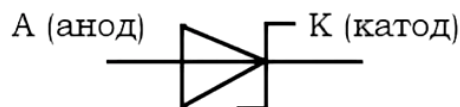
Выпускаются кремниевые стабилитроны на напряжение стабилизации от 5 до 400 В и на мощность от 250 мВт до 50 Вт.

Стабистор—это полупроводниковый диод, напряжение на котором при прямом включении

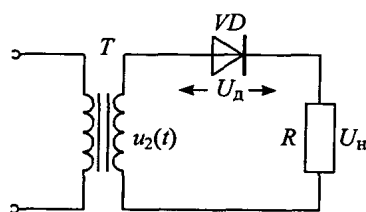
(около 0,7 В) мало зависит от тока (прямая ветвь на соответствующем участке почти вертикальная). Стабилитрон предназначен для стабилизации малых напряжений. Условно графическое обозначение приведено на рисунке.

Двуханодный стабилитрон это два стабилитрона включенных вместе. Т.о. можно подключать его произвольно, так все выводы анод. Условно графическое обозначение приведено на рисунке.

Ниже на фотографиях показан внешний вид некоторых стабилитронов отечественного и импортного производства.



как



Диоды Шоттки

В основе выпрямляющего диода может использоваться не только переход между полупроводниками р-и n-типа, но и между полупроводником и металлом.

Такие диоды называются **диодами Шоттки**.

Рассмотрим структуру металл — полупроводник n-типа. Если работа выхода электронов у металла выше, чем у полупроводника, то преобладающим будет перемещение электронов из полупроводника в металл (свободным электронам металла труднее приобрести энергию, равную работе выхода, чем электронам полупроводника). В результате металл заряжается отрицательно, а оставшиеся в

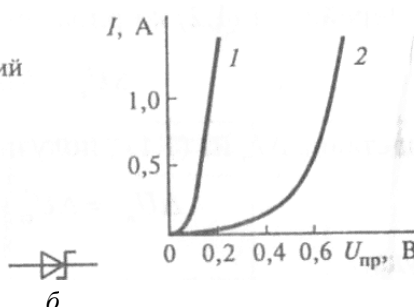


Рис. 1.6. Металлополупроводниковый диод Шоттки: а — структура диода; б — условное обозначение; в — вольт-амперная характеристика; 1 — переход Шоттки; 2 — p-n-переход

полупроводнике ион донорной примеси создают в его приграничном слое положительный потенциал (рис. 1.6, *а*). Такое распределение зарядов создает контактную разность потенциалов U_K (потенциальный барьер), препятствующий дальнейшему перемещению электронов. При этом тонкий приграничный слой полупроводника обедняется носителями. Таким образом, в месте контакта металла и полупроводника возникает переход, аналогичный р-п-переходу. Если к такому переходу приложить обратное напряжение, совпадающее с U_K , то ширина обедненной области увеличится, а сопротивление перехода возрастет. Если приложить прямое напряжение, то оно будет противодействовать U_K при этом переход сужается, потенциальный барьер уменьшается и через переход начинает течь ток. Вольт-амперные характеристики такого перехода и р-п-перехода оказываются аналогичными.

Основной отличительной особенностью характеристик диода Шоттки является значительно меньшее прямое падение напряжения по сравнению с диодами на основе р-п-перехода (рис. 1.6, *в*). Это объясняется тем, что в диоде Шоттки одно из веществ перехода — металл, и следовательно, его электрическое сопротивление (и соответствующее падение напряжения на нем) значительно меньше, чем у полупроводника.

Другая особенность диода Шоттки — отсутствие проникновения неосновных носителей заряда из металла в полупроводник (в рассматриваемом случае — дырок, которые для п-области являются неосновными). Это значительно повышает быстродействие диодов Шоттки по сравнению с обычными диодами, так как отпадает необходимость в рассасывании таких носителей при смене полярности внешнего напряжения.

Диоды Шоттки, у которых выпрямляющий переход представляет собой тонкую пленку молибдена или алюминия, нанесенную на пластинку кремния методом вакуумного напыления, обладают емкостью, не превышающей 0,01 пФ. Это обеспечивает чрезвычайно малое время их переключения (доли наносекунды) и предельно высокую частоту работы (десятки гигагерц). Мощные диоды позволяют пропускать токи в десятки ампер при обратных напряжениях до 500 В. Благодаря меньшему прямому напряжению (0,3 В вместо 0,7 В у диодов PN-типа) они обеспечивают более высокий КПД. Условное обозначение металлополупроводникового диода Шоттки приведено на рис. 1.6, *б*.

Варикапы

Напомним, что при подаче обратного напряжения р-п-структура уподобляется конденсатору, пластинами которого являются р-и п-области, разделенные диэлектриком (переходом, почти свободным от носителей заряда). Образующаяся при этом барьерная емкость может быть использована в качестве конденсатора в электронной аппаратуре. **Варикапы** — это полупроводниковые диоды, работа которых основана на явлении барьерной емкости запертого р-п-перехода. Поскольку размеры области р-п-перехода зависят от значения приложенного к нему обратного напряжения, то и величина барьерной емкости изменяется вместе с этим напряжением. Условно графическое обозначение приведено на рисунке.

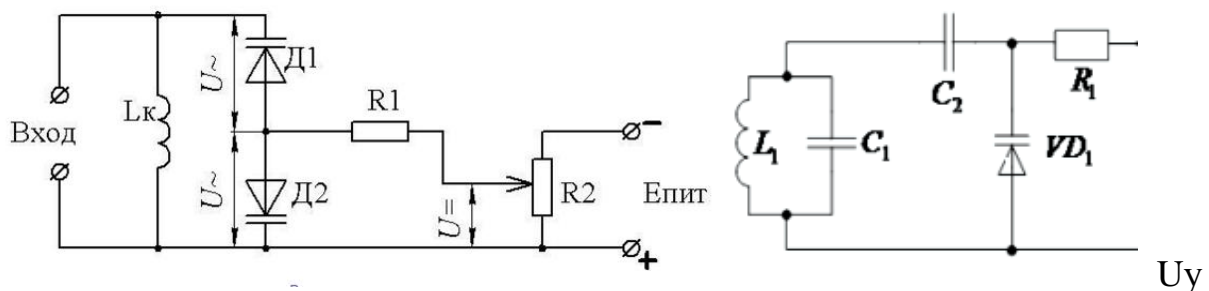


Внешнее обратное напряжение, втягивая электроны в глубь n-области, а дырки — в глубь p-области, расширяет р-n-переход и изменяет барьерную емкость. Основной характеристикой варикапа является зависимость его емкости от значения обратного напряжения — вольт-фарадная характеристика. Основными параметрами варикапов являются номинальная емкость и диапазон ее изменения, а также допустимые обратное напряжение и мощность. Варикапы применяются для электрической настройки колебательных контуров в радиоаппаратуре. Чаще всего они встречаются в схемах приборов, принимающих радиосигналы. Сюда относятся телевизионные тюнеры и традиционные радиоприемники. Наиболее ярким примером действия варикапа является опция «автопоиск каналов», давно ставшая обязательной в современных телевизорах. Разрабатываются варикапы на основании диодов, но по сути они являются конденсаторами. Их основными положительными качествами выступают:

- низкий уровень потерь электроэнергии;
- незначительный коэффициент температурной емкости;
- небольшая стоимость;
- надежность и продолжительный срок службы.

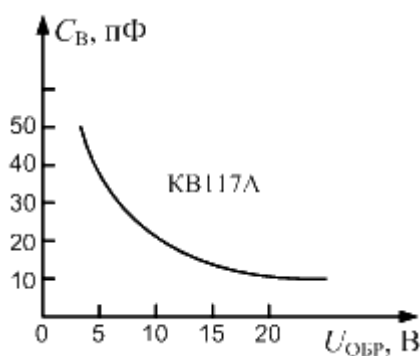
На практике весьма успешно диоды КВ используются на предельно высоких частотах, в условиях, где емкость конденсатора достигает долей пикофарад. Благодаря им удастся избежать изменений частоты колебательного контура, что недопустимо для оборудования. В телевизионной и специальной радиотехнике очень часто применяются сдвоенные и строенные варикапы с общим катодом. Вот так они обозначаются на принципиальных схемах

Примеры включения варикапа в колебательный контур



Изменяя Епит мы можем регулировать ёмкость варикапов Д1 и Д2,. В другой схеме регулирования происходит при изменение Uy.

Ниже приведении кривые зависимости емкости варикапа от обратного напряжения.



Основные характеристики варикапа(для конкретной частоты порядка МГц):

- коэффициент перекрытия по емкости $K_c = C_{\max} / C_{\min}$, либо C_{\max} и C_{\min} ;
- общая емкость $C_{\text{ном}}$ при определённом $U_{\text{обр}}$;
- постоянный обратный ток $I_{\text{обр.мак}}$;
- постоянное обратное напряжение $U_{\text{обр.мак}}$;
- рассеиваемая мощность.

Светодиоды

На основе явлений, происходящих в р-п-переходе при протекании через него прямого тока, можно получать полупроводниковые приборы, способные генерировать оптическое излучение. Такими приборами являются **полупроводниковые светодиоды**. Работа светодиодов основана на **инжекционной электролюминесценции**, т.е. генерации оптического излучения в р-п-переходе, находящемся под прямым внешним напряжением. Под воздействием внешней энергии электроны в атомах переходят в возбужденное состояние с более высоким уровнем энергии W_2 называемым метастабильным уровнем возбуждения. При возвращении этих электронов с метастабильного уровня W_2 на исходный W_1 происходит испускание фотонов с длиной волны, определяемой соотношением:

$$\lambda = 1,23 (W_2 - W_1).$$

Условно графическое обозначение приведено на рисунке.



К преимуществам полупроводниковых светодиодов относятся высокий по сравнению с лампами накаливания КПД, относительно узкий спектр излучения и хорошая диаграмма направленности, высокое быстродействие и малое напряжение питания. Все это обеспечивает удобство согласования с интегральными микросхемами, высокую надежность, долговечность и технологичность. Спектр излучения, а, следовательно, и его цвет, зависит от используемого полупроводникового материала. Светодиоды изготавливают не на основе кремния или германия, как большинство полупроводниковых приборов, а на основе арсенида-фосфида галлия. Яркость свечения пропорциональна прямому току светодиода. Ток в несколько миллиампер уже достаточно для отчетливой индикации. Светодиоды изготавливают как в виде отдельных индикаторов, так и в виде семисегментных или точечных матриц. Семисегментные матрицы состоят из семи светящихся полосок — сегментов, из которых можно синтезировать изображение любой цифры от 0 до 9 (такие матрицы используются, например, в электронных часах с цифровой индикацией). В точечных матрицах изображение формируется из светящихся точек. На основе точечных матриц можно синтезировать уже не только изображение цифры, но и любого индицируемого знака (буквы, специального символа и т.д.).

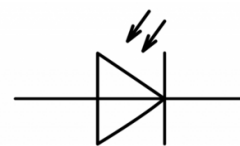
Фотодиоды

Простейший **фотодиод** представляет собой обычный полупроводниковый диод (см. рис. 1.4, а), в котором обеспечивается возможность воздействия оптического излучения на р-п-переход. В равновесном состоянии, когда поток излучения полностью отсутствует, концентрация носителей, распределение потенциала и

энергетическая зонная диаграмма фотодиода полностью соответствуют обычной р-п-структуре.

При воздействии излучения в направлении, перпендикулярном плоскости р-п-перехода, в результате поглощения фотонов с энергией, большей, чем ширина запрещенной зоны, в л-области возникают электронно-дырочные пары. Эти электроны и дырки называют фотоносителями. При диффузии фотоносителей в глубь п-области основная доля электронов и дырок не успевает рекомбинировать и доходит до границы р-п-перехода. Здесь фотоносители разделяются электрическим полем р-п-перехода, причем дырки переходят в р-область, а электроны не могут преодолеть поле перехода и скапливаются у границы р-п-перехода и п-области.

Таким образом, ток через р-п-переход обусловлен дрейфом неосновных носителей — дырок. Дрейфовый ток фотоносителей называется **фототоком** I_{ϕ} . Фотоносители — дырки — заряжают р-область положительно относительно л-области, а фотоносители — электроны — п-область отрицательно по отношению к р-области. Возникающая разность потенциалов называется фотоЭДС E_{ϕ} . Генерируемый ток в фотодиоде — обратный, он направлен от катода к аноду, причем его величина тем больше, чем больше освещенность. Условно графическое обозначение приведено на рисунке.



Фотодиоды могут использоваться для получения электрической энергии. Так, солнечные батареи изготавливают на основе фотодиодов с большой площадью р-п-перехода.

Оптроны

Светодиоды и фотодиоды часто используются в паре. При этом они помещаются в один корпус таким образом, чтобы светочувствительная площадка фотодиода располагалась напротив излучающей площадки светодиода. Полупроводниковые приборы, использующие такие пары «светодиод — фотодиод», называются оптронами (рис. 1.7). Они широко используются в электронной аппаратуре для гальванической развязки входных и выходных цепей.

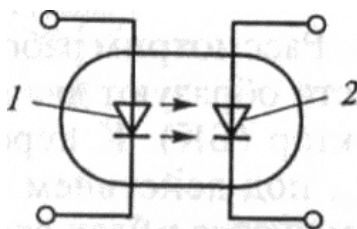


Рис.1.7 Оптод 1-светодиод; 2-фотодиод

Входные и выходные цепи в таких приборах оказываются электрически никак не связанными, поскольку передача сигнала осуществляется через оптическое излучение.

Использование оптронов в электронно-вычислительных устройствах является одним из основных

методов повышения помехоустойчивости аппаратуры. Основным носителем помех в радиоэлектронной аппаратуре — корпус. Корпус используется как один из полюсов электропитания, поэтому подключение к нему разных силовых устройств приводит к наведению кратковременных импульсных помех при коммутациях силовых цепей. В то же время для передачи информации чисто электрическим путем между устройствами — источником и приемником информации — должна быть электрическая связь по корпусу. Если к этому же корпусу подключены силовые цепи, то помехи, вызванные коммутациями в этих цепях, приводят к сбоям в работе других устройств, подключенных к корпусу.

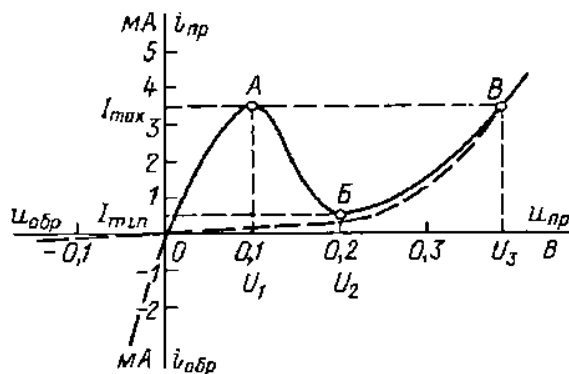
Передача информации с помощью оптронов позволяет развязать электрические цепи питания источника и приемника информации, так как носителем информации является электрически нейтральное оптическое излучение. Таким образом, устройства могут иметь разные корпуса, т.е. оказываются гальванически развязанными и не подверженными воздействию помех.

Кроме защиты от воздействия помех, гальваническая развязка на основе оптронов позволяет решить еще одну задачу — совместную работу устройств, находящихся под разными потенциалами. Любая, даже небольшая, разность потенциалов не позволяет чисто электрически соединять разные устройства, поскольку это приведет к выходу их из строя. Передача сигнала в оптроне возможна, даже если цепи светодиода и фотодиода находятся под разными (в некоторых оптронах до 500 В) напряжениями. Таким образом, устройства, информационно связанные с помощью оптронов, могут находиться под разными потенциалами.

Туннельный диод.

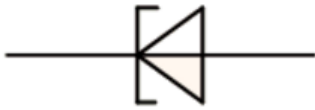
Туннельный диод — это полупроводниковый диод на основе вырожденного полупроводника, в котором туннельный эффект приводит к появлению на вольт-амперной характеристике при прямом напряжении участка отрицательной дифференциальной проводимости.

Вольт-амперная характеристика туннельного диода (рис. ниже) поясняет если проанализировать энергетические диаграммы, при разных напряжениях. При $U = 0$ ток равен нулю. Увеличение прямого напряжения до 0,1 В дает возрастание прямого туннельного тока до максимума (точка *A*). Дальнейшее увеличение прямого напряжения до 0,2 В сопровождается уменьшением туннельного тока. Поэтому в точке *B* получается минимум тока и характеристика имеет *падающий участок AB*, для которого характерно отрицательное сопротивление переменному току.



После этого участка ток снова возрастает за счет диффузионного прямого тока, характеристика которого на рис. 8.11 показана штриховой линией. Обратный ток получается такой же, как прямой, т. е. во много раз больше, нежели у обычных диодов.

Условно графическое обозначение приведено на рисунке.



Основные параметры туннельных диодов

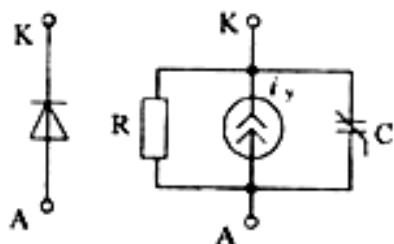
- — ток максимума I_{\max} , ток минимума I_{\min} (часто указывается отношение I_{\max}/I_{\min} которое бывает равно нескольким единицам),
- напряжение максимума U_1 ,
- напряжение минимума U_2 ,
- наибольшее напряжение U_3 , соответствующее току I_{\max} на втором восходящем участке характеристики (участок *БВ*).
- Разность $\Delta U = U_2 - U_1$ — называется *напряжением переключения* или *напряжением скачка*.

Токи в современных туннельных диодах составляют единицы миллиампер, напряжения — десятые доли вольта. К параметрам также относится отрицательное дифференциальное сопротивление диода (обычно несколько десятков ом), общая емкость диода (единицы или десятки пикофарад), время переключения (доли наносекунды) и максимальная, или критическая, частота (сотни гигагерц).

Лавинно- пролётные диоды— это полупроводниковый диод, работающий в режиме лавинного размножения носителей заряда при обратном смещении электрического перехода и предназначенный для сверхвысокочастотных колебаний

Пусть к ЛПД приложено постоянное обратное напряжение и некоторое переменное. Под действием положительной полуволны обратного напряжения (имеется в виду, что эта полуволна соответствует возрастанию обратного напряжения на диоде) в режиме пробоя происходит лавинообразное нарастание тока — «электрическая лавина». Вследствие инерционности процессов в полупроводниках, т. е. конечности времени пробега носителей через *n-p-переход*, этот ток достигает максимума с некоторым запаздыванием по отношению к вызвавшей его положительной полуволне переменного напряжения. Под действием постоянного напряжения «лавина» продолжает двигаться и в течение следующего, отрицательного полупериода напряжения. Таким образом, импульс тока, соответствующий «лавине», противоположен по знаку отрицательной полуволне переменного напряжения. Следовательно, для переменного тока возникает отрицательное сопротивление. Подключая ЛПД к колебательной системе СВЧ, можно за счет отрицательного сопротивления получить режим генерации колебаний или усиления.

Математические модели диодов представлена на рис.4



Слева изображено условно графическое обозначение диода справа его модель. Назначение элементов в модели : постоянное сопротивление R включено в схему с целью учета тока утечки; ёмкость C моделирует барьерную и диффузионную емкости; управляемый источник тока i_y моделирует статическую вольтамперную характеристику.

Рис. 4

Классификация и система обозначений

Рассмотрим это в общем, для чтения отечественной маркировке диодов.

$\frac{К}{1} \frac{С}{2} \frac{1}{3} \frac{33}{4} \frac{Б}{5}$

Первый элемент (цифра или буква) обозначает исходный полупроводниковый материал, Для обозначения *исходного полупроводникового материала* используются следующие символы:

- Г, или 1, — германий или его соединения;
- К, или 2, — кремний или его соединения;
- А, или 3, — соединения галлия;
- И, или 4, — соединения индия.

второй (буква) — подкласс приборов,

Для обозначения *подклассов диодов* используется одна из следующих букв:

- Д — диоды выпрямительные и импульсные;
- Ц — выпрямительные столбы и блоки;
- В — варикапы;
- И — туннельные диоды;
- А — сверхвысокочастотные диоды;
- С — стабилитроны;
- Г — генераторы шума;
- Л — излучающие оптоэлектронные приборы;
- О — оптопары.

третий (цифра) — основные функциональные возможности прибора,

Диоды (подкласс Д):

- 1 — выпрямительные диоды с постоянным или средним значением прямого тока не более 0,3 А;
- 2 — выпрямительные диоды с постоянным или средним значением прямого тока более 0,3 А, но не свыше 10 А;
- и т.д.

Стабилитроны (подкласс С):

1 — стабилитроны мощностью не более 0,3 Вт с номинальным напряжением стабилизации менее 10 В;

2 — стабилитроны мощностью не более 0,3 Вт с номинальным напряжением стабилизации 10... 100 В;

четвертый — число, обозначающее порядковый номер разработки, и т.д. (для стабилитронов это и указатель на напряжение стабилизации

пятый элемент — буква, условно определяющая классификацию (разбраковку по параметрам) приборов, изготовленных по единой технологии.

Для нашего примера это кремниевый диод, стабилитрон мощностью не более 0,3 Вт с номинальным напряжением стабилизации менее 10 В, напряжение стабилизации отсюда 3,3 В и с учётом 4-элемента, с разбраковкой по параметру Б.