

2. Полупроводниковые приборы электронных схем

К полупроводникам относятся материалы, удельное сопротивление имеет промежуточное значение между сопротивлением проводников и диэлектриков. Удельное сопротивление полупроводников убывает с увеличением температуры и зависит от наличия примесей в материале и изменения освещенности. Удельное сопротивление полупроводников при комнатной температуре находится в интервале от 10^{-3} до 10^6 Ом·м.

Типичными представителями полупроводников являются кристаллы германия и кремния. В этих кристаллах атомы соединены между собой ковалентной связью. При нагревании ковалентная связь нарушается, атомы ионизируются. Это обуславливает возникновение свободных электронов и "дырок"-мест с недостающим электроном и имеющим положительный заряд. При этом электроны соседних атомов могут занимать вакантные места, образуя "дырку" в соседнем атоме. Таким образом не только электроны, но и "дырки" могут перемещаться по кристаллу. При помещении такого кристалла в электрическое поле электроны и дырки придут в упорядоченное движение - возникнет электрический ток.

В чистом кристалле электрический ток создается равным количеством электронов и "дырок". Проводимость, обусловленную движением свободных электронов и равного им количества "дырок" в полупроводниковом кристалле без примесей, называют **собственной проводимостью полупроводника**.

Проводимость проводников зависит от наличия примесей. Примеси бывают донорные и акцепторные. **Донорная примесь** - примесь с большей валентностью. Например, для четырехвалентного кремния донорной примесью является пятивалентный **мышьяк**. Четыре валентных электрона атома мышьяка участвуют в создании ковалентной связи, а пятый станет электроном проводимости. При нагревании нарушается ковалентная связь, возникают дополнительные электроны проводимости и "дырки". Поэтому в кристалле количество свободных электронов преобладает над количеством "дырок". Проводимость такого проводника является электронной, полупроводник является **полупроводником n-типа**. Электроны являются **основными носителями** заряда, "дырки" - **неосновными**.

Акцепторная примесь - примесь с меньшей валентностью. Например, для четырехвалентного кремния акцепторной примесью является трехвалентный **индий**. Три валентных электрона атома индия участвуют в создании ковалентной связи с тремя атомами кремния, а на месте четвертой незавершенной ковалентной связи образуется "дырка".

При нагревании нарушается ковалентная связь, возникают дополнительные электроны проводимости и "дырки". Поэтому в кристалле количество "дырок" преобладает над количеством свободных электронов. Проводимость такого проводника является дырочной, полупроводник является **полупроводником p-типа**. "Дырки" являются **основными носителями** заряда, электроны - **неосновными**.

2.1. Свойства pn -перехода

Большинство полупроводниковых электронных приборов построены на основе соединения полупроводниковых материалов с различным типом проводимости: дырочной (p) и электронной (n). На рисунке 2.1а **дырки**, преобладающие в области p -типа, условно изображены красными кружками, а **электроны**, преобладающие в области n -типа — синими.

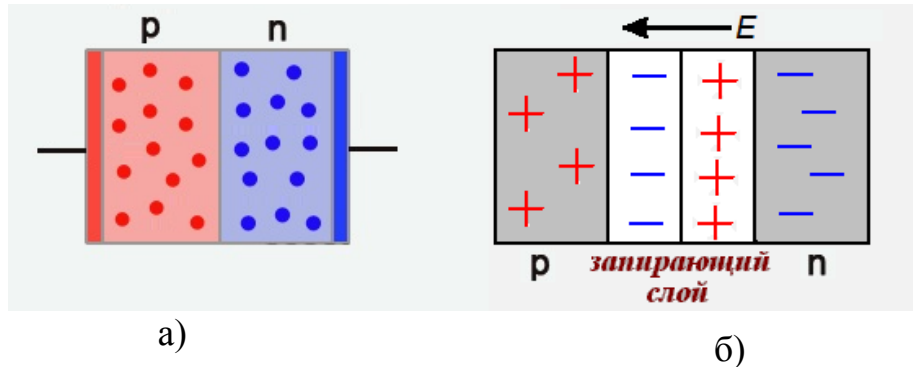


Рисунок 2.1 – Полупроводниковая pn -структура

Важные свойства полупроводников проявляются в очень узком слое вещества между двумя частями полупроводника, обладающими проводимостями различных видов. Этот слой получил название электронно-дырочного перехода или сокращенно pn -перехода. Определяющее свойство pn -перехода – его односторонняя проводимость.

Так как в области p с дырочной проводимостью подвижных электронов значительно меньше, чем в области n с электронной проводимостью, то электроны из n -слоя начинают переходить в p -слой (у их границы), а дырки в то же время будут двигаться в обратном направлении. При этом электрическая нейтральность каждой области окажется нарушенной. В пограничном слое с проводимостью типа n образуется положительный объемный заряд, а в p -области, то есть по другую сторону границы,— отрицательный (рис.2.1б). Таким образом, в тонком слое полупроводника у границы раздела p - и n -областей образуются две зоны объемных разноименных электрических зарядов. Этот слой и представляет собой собственно pn -переход. Естественно, возникновение разноименных зарядов влечет за собой появление электрического поля E , направленного от области положительного заряда к отрицательной. Это поле препятствует проникновению электронов в p -область, а дырок в n -область, т.е. образуется запирающий слой. Лишь отдельные электроны и дырки, обладающие повышенной энергией, могут преодолевать его тормозящее действие. Возникает стабильное состояние pn -перехода.

Если к полупроводнику приложить электрическое напряжение, то в зависимости от полярности этого напряжения pn -переход проявляет совершенно различные свойства.

Когда отрицательный полюс источника G подключен к n -области кристалла, а положительный — к p -области (рис.2.2а), внешнее электрическое поле, со-

здаваемое источником G , и поле pn -перехода E направлены в противоположные стороны, запирающий слой при этом практически исчезает. Поэтому электроны из n -области смогут проникать в p -область, а дырки из p -области в n -область. Таким образом, в цепи источник питания — полупроводник возникает так называемый прямой ток $I_{пр}$.

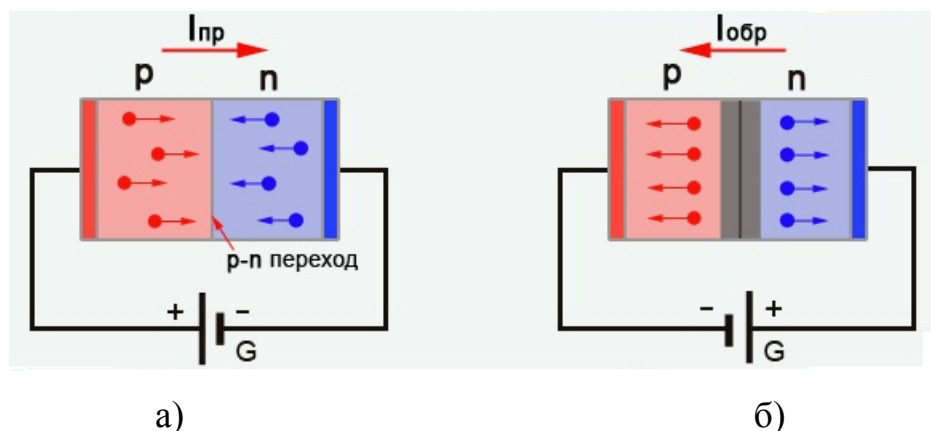


Рисунок 2.2 – Токи в pn -переходе

Если же отрицательный полюс источника питания подключен к p -области кристалла, а положительный к n -области, то электрические поля источника G и pn -перехода E совпадают (рис.2.2б). Суммарное поле возрастает и в еще большей степени (чем до присоединения источника питания) будет препятствовать передвижению электрических зарядов через pn -переход. Если рассматривать идеальный случай, то электрического тока через переход не будет. Такую полярность приложенного к кристаллу напряжения называют обратной.

Однако в реальных условиях в полупроводнике, кроме основных носителей электрических зарядов — электронов и дырок, образующихся при введении примесей, имеются и неосновные носители зарядов (их значительно меньше) электроны и дырки, образующиеся вследствие теплового движения атомов в кристалле. Часть этих электронов и дырок способна проходить (дрейфовать) через pn -переход даже при обратной полярности приложенного к полупроводнику напряжения. При этом возникает так называемый обратный ток $I_{обр}$, который существенно (в сотни раз) меньше прямого тока. Следовательно, pn -переход полупроводника проявляет свойство односторонней проводимости, которое лежит в основе полупроводниковых диодов и транзисторов.

2.2. Полупроводниковые диоды

Полупроводниковым диодом называют полупроводниковый прибор с одним или несколькими p - n -переходами и двумя выводами. В полупроводниковых диодах используется свойство p - n переходов хорошо проводить электрический ток в одном направлении и плохо — в противоположном. Электрод, соединенный с полупроводником с дырочной проводимостью называется анодом (А), а электрод, соединенный с областью с электронной проводимостью — катодом

(К). Ток диода направленный от анодного А вывода к катодному К называется прямым $I_{пр}$, а ток в противоположном направлении – обратным $I_{обр}$.

Структура полупроводникового диода с электронно-дырочным переходом и его общее условное графическое обозначение показаны на рис. 2,3 а, б.

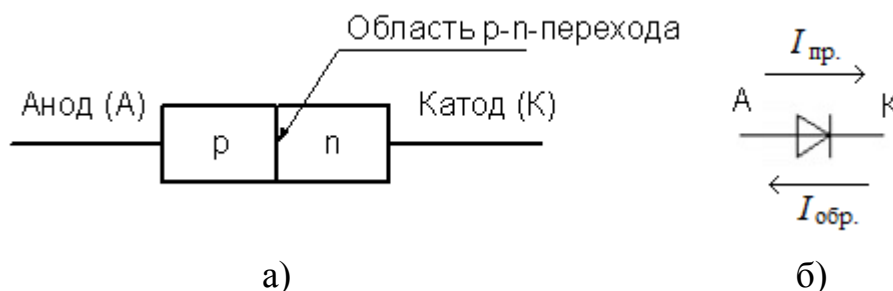


Рисунок 2.3 – Структура и обобщенное обозначение диода

Полупроводниковые диоды отличаются друг от друга материалом полупроводника. Наиболее часто в них используют германий или кремний, индий, арсенид галлия и др.

В зависимости от основного назначения и вида используемых явлений в p - n -переходе различают шесть основных функциональных типов полупроводниковых диодов: выпрямительные, высокочастотные, импульсные, туннельные, стабилитроны, варикапы, свето- и фотодиоды. Каждый тип диода содержит ряд типоминиалов, регламентированных соответствующим ГОСТом.

Выпрямительные диоды предназначены для преобразования переменного тока в постоянный. Главная особенность выпрямительных диодов – большие площади p - n -перехода, поскольку они рассчитаны на выпрямление больших по величине токов. Одни из них пропускают большие токи, однако частотный диапазон не превышает 100 кГц.

Высокочастотные диоды служат для выпрямления (детектирования), модуляции сигналов высоких и сверхвысоких частот (СВЧ), достигающих сотни гигагерц. Прямой ток в таких диодах не превышает нескольких десятков миллиампер.

Диоды Шоттки имеют переход металл — полупроводник, который обладает выпрямительным эффектом. Накопление заряда в переходе этого типа выражено слабо. Поэтому время переключения может быть уменьшено до значения порядка 100 пс. Другой особенностью этих диодов является малое (по сравнению с обычными кремниевыми диодами) прямое напряжение, составляющее около 0,3 В.

Импульсные диоды предназначены для использования в качестве формирователей импульсов или ключевых элементов в импульсных схемах. Для диода состояние «включено» соответствует прямому смещению p - n перехода, состояние «выключено» – обратному.

Стабилитроны служат для обеспечения постоянства напряжения на нагрузке при изменении входного напряжения и сопротивления нагрузки. В этих диодах используется явление неразрушающего электрического пробоя

(лавинного пробоя) p - n перехода при определенных значениях обратного напряжения.

Туннельные диоды используются в схемах генераторов и усилителей СВЧ-диапазона, в быстродействующих ключевых и импульсных схемах.

Варикапы, это диоды, в которых используется свойство изменения емкости p - n перехода при изменении протекающего через него тока.

Светодиоды – приборы, излучающие свет при прохождении через них прямого тока. Фотодиоды используются в качестве приемников светового излучения. Очень широко используется комбинация светодиод - фотодиод, конструктивно объединенная в одном приборе, называемом оптроном или оптопарой, и служит для идеальной гальванической развязки управляющих и нагрузочных цепей.

Условные графические обозначения диодов и их разновидностей показано на рис.2.4.

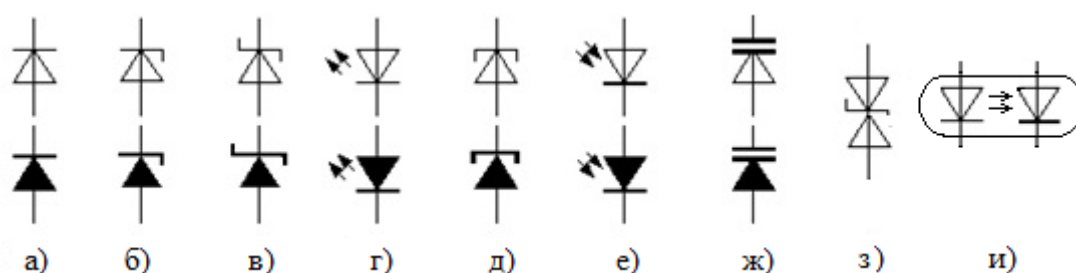


Рисунок 2.4 – Условные графические обозначения диодов в схемах:

- а) выпрямительные; б) стабилитроны; в) диоды Шоттки; г) светодиоды; д) туннельные; е) фотодиоды; ж) варикапы; з) двуполярные стабилитроны; и) оптронные диодные пары

По способу изготовления различают диоды плоскостные (планарные) и точечные. В плоскостных диодах граница между областями полупроводника представляет собой плоскость соприкосновения, а в точечных диодах полупроводник контактирует с металлической иглой. В точечных диодах тонкая заостренная золотая проволоочка (игла) с нанесенной на нее примесью галлия приваривается при помощи импульса тока к пластинке полупроводника с определенным типом электропроводности.

Плоскостные диоды изготавливаются методами сплавления и диффузии. В сплавных диодах p - n переход получают вплавлением в кристалл полупроводника электронно проводимости кусочка сплава, содержащего атомы акцепторной примеси. В диффузионных диодах используется метод диффузии донорных или акцепторных примесей в твердый полупроводник. Проникая на некоторую глубину под поверхность, диффундирующие атомы меняют тип проводимости этой части кристалла, вследствие чего возникает p - n переход.

На рис. 2.5 изображены структуры точечного (а), сплавного (б) и планарно-эпитаксиального (в) диодов. К электродам подсоединены металлические выводы, посредством которых диод включается в цепь.

Точечные диоды имеют малую емкость p - n перехода и поэтому применяются на любых частотах вплоть до СВЧ. Однако они могут пропускать токи не

более нескольких десятков миллиампер. Плоскостные диоды, в зависимости от площади перехода, обладают емкостью в десятки пикофарад и более. Поэтому их применяют на частотах не более десятков кГц. Допустимый ток в плоскостных диодах бывает от десятков миллиампер до сотен ампер и больше.

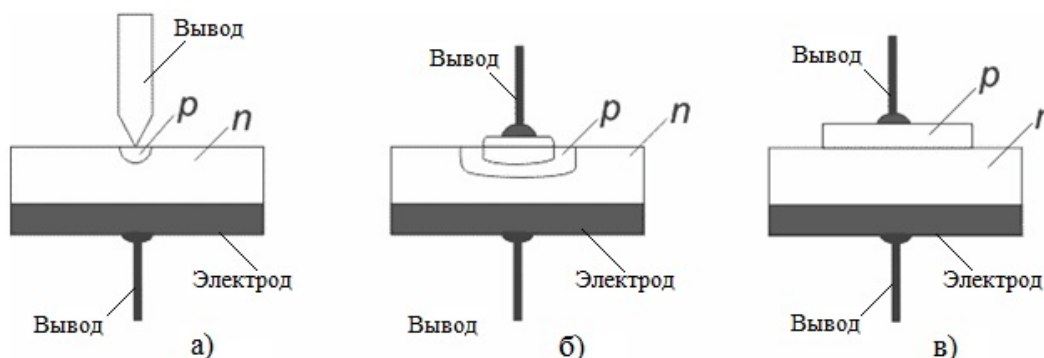


Рисунок 2.5 – Конструкции точечного (а), сплавного (б) и диффузионного диодов (в)

Основными параметрами диодов являются:

Постоянный прямой ток $I_{пр}$ - постоянный ток, протекающий через диод в прямом направлении.

Постоянное прямое напряжение $U_{пр}$ - постоянное напряжение на диоде при заданном прямом токе.

Постоянное обратное напряжение $U_{обр}$ - постоянное напряжение приложенное к диоду в обратном направлении.

Постоянный обратный ток $I_{обр}$ - постоянный ток, протекающий через диод в обратном направлении при заданном обратном напряжении.

Средний прямой ток $I_{пр.ср.}$ - прямой ток, усредненный за период.

Средний обратный ток $I_{обр.ср.}$ - обратный ток, усредненный за период.

Максимальная частота f_{max} — наибольшая частота подводимого напряжения, при которой диод работает достаточно эффективно, а нагрев диода не превышает допустимой величины.

Дифференциальное сопротивление диода $r_{диф}$ - отношение приращения напряжения на диоде к вызвавшему его малому приращению тока.

Максимально допустимые параметры: к ним относятся все вышеперечисленные только с индексом "max" и словами "максимально допустимый(ое)".

К параметрам стабилитрона дополнительно относятся **Напряжение стабилизации $U_{ст}$** - напряжение на стабилитроне при заданном токе стабилизации и **Допускаемый разброс напряжения стабилизации от номинального $\Delta U_{ст.ном.}$** - максимально допустимое отклонение напряжения стабилизации от номинального для стабилитронов данного типа.

К параметрам варикапов дополнительно относятся **Емкость варикапа C_v** - емкость, которая измеряется между выводами при заданном обратном напряжении и **Коэффициент перекрытия по емкости K_c** - отношение емкостей варикапа при двух заданных обратных напряжениях.

Важнейшей характеристикой диода является его вольт-амперная характеристика, представляющая собой зависимость тока через диод от приложенного напряжения. Вид такой характеристики изображен на рис.2.6.

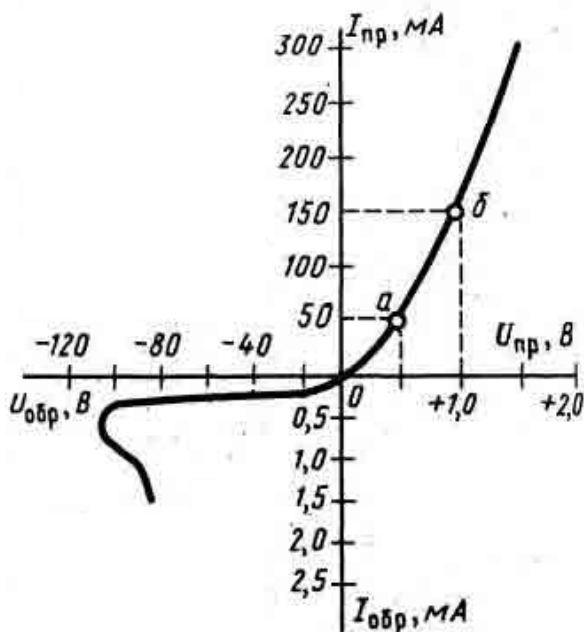


Рисунок 2.6 – Вольт-амперная характеристика диода

По вертикальной оси в верхней части обозначены значения прямого тока ($I_{пр}$), а в нижней части — обратного тока ($I_{обр}$). По **горизонтальной** оси в правой части обозначены значения прямого напряжения $U_{пр}$, а в левой части – обратного напряжения ($U_{обр}$).

Вольт-амперная характеристика состоит как бы из двух ветвей: **прямая ветвь**, в правой верхней части, соответствует прямому (пропускному) току через диод, и **обратная ветвь**, в левой нижней части, соответствующая обратному (закрытому) току через диод.

Прямая ветвь идет круто вверх и характеризует быстрый рост прямого тока через диод с увеличением прямого напряжения. **Обратная ветвь** проходит почти параллельно горизонтальной оси и характеризует медленный рост обратного тока. Чем круче к вертикальной оси прямая ветвь и чем ближе к горизонтальной обратная ветвь, тем лучше выпрямительные свойства диода. Наличие небольшого обратного тока является недостатком диодов. Из кривой вольт-амперной характеристики видно, что прямой ток диода ($I_{пр}$) в сотни раз больше обратного тока ($I_{обр}$).

При увеличении прямого напряжения через *p-n* переход ток вначале возрастает медленно, а затем начинается участок быстрого нарастания тока. Следует учитывать, что **германиевый** диод открывается и начинает проводить ток при прямом напряжении 0,1 – 0,2В, а **кремниевый** при 0,5 – 0,6В.

Различают статическое сопротивление полупроводникового диода:

$$R_{\text{ст}}(I) = U/I.$$

и его дифференциальное сопротивление:

$$R_{\text{д}}(I) = dU/dI = \Delta U/\Delta I.$$

На разных участках вольт-амперной характеристики эти сопротивления будут различными, т. е. являются функциями протекающего через диод тока I .

2.3. Типовые схемы информационной техники на диодах

В информационной и вычислительной технике наиболее широко используются различного типа выпрямители переменного тока и стабилизаторы постоянного напряжения. На рис. 2.7 показаны схемы различных выпрямителей переменного тока.

На рис. 2.7а приведена схема однополупериодного выпрямителя. Работа выпрямителя происходит следующим образом.

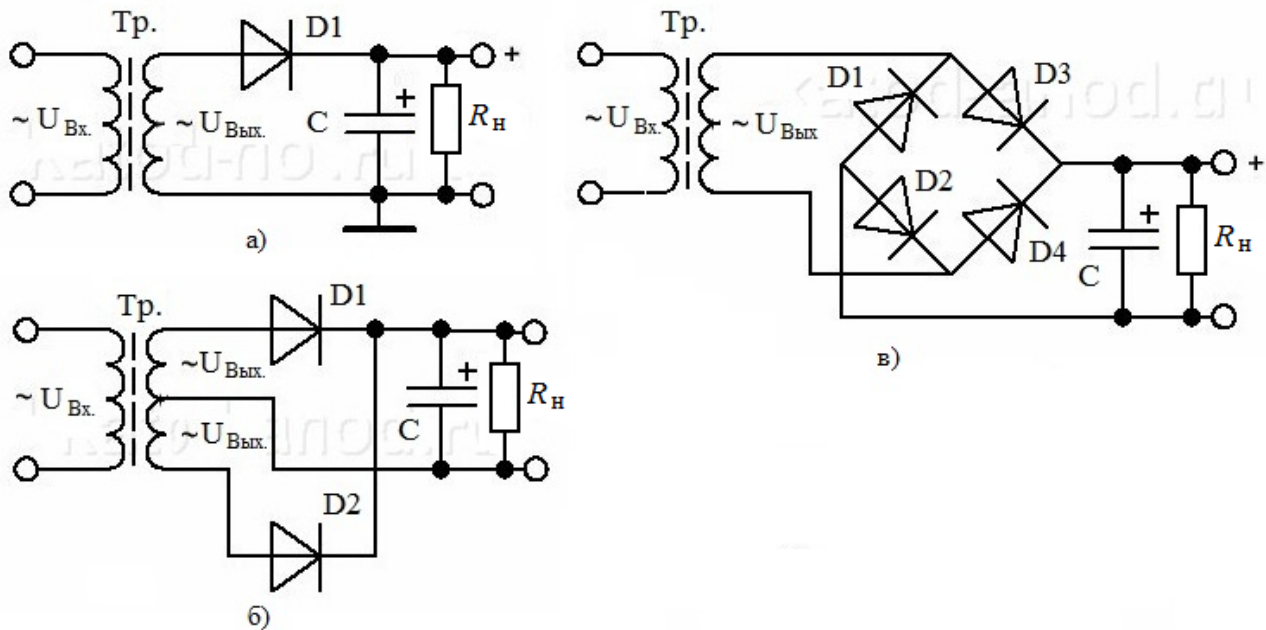


Рисунок 2.7 – Типовые схемы выпрямителей

Если генератор вырабатывает синусоидальное напряжение,

$$e(t) = E_m \sin \omega t,$$

то в течение положительного (+) полупериода напряжение для диода D1 является прямым, его сопротивление мало, и через резистор проходит ток, который создает на резисторе R_{H} падение напряжения $U_{\text{вых}}$, повторяющее входное напряжение $e(t)$. В следующий, отрицательный (-) полупериод, напряжение для диода D1 является обратным, сопротивление диода велико, тока через нагрузку практически нет и, следовательно, $U_{\text{вых}} = 0$. Таким образом, через диод D1 и R_{H} протекает пульсирующий выпрямленный ток. Он создает на резисторе R_{H} пульсирующее выпрямленное напряжение $U_{\text{вых}}$.

Полезной частью выпрямленного напряжения является его постоянная составляющая или среднее значение U_{cp} (за полупериод):

$$U_{cp} = U_{max} / \pi = 0,318 U_{max}.$$

Таким образом, U_{cp} составляет около 30% от максимального значения.

Временная диаграмма работы однополупериодного выпрямителя показана на рис. 2.8 а. Пунктирной линией показано напряжение на нагрузке при наличии фильтрующего конденсатора С.

Выпрямленное напряжение обычно используется в качестве напряжения питания электронных схем.

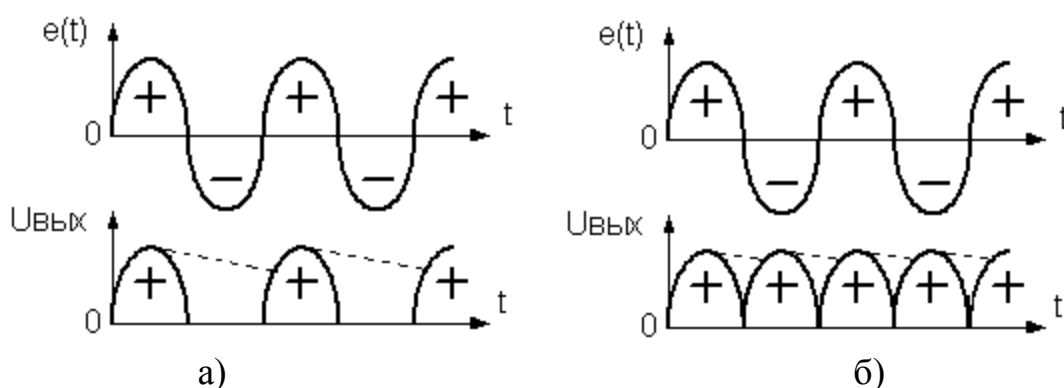


Рисунок 2.8 – Временные диаграммы функционирования однополупериодного (а) и двухполупериодного (б) выпрямителей

На рисунках 2.7 б и в изображены схемы двухполупериодных выпрямителей. Диаграммы процесса выпрямления этих схем показаны на рис. 2.8б.

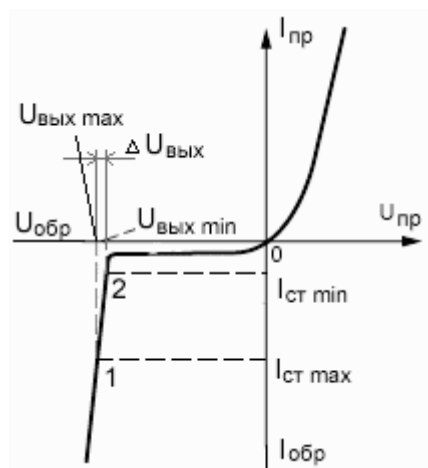
В выпрямителе (рис.2.8б) используются два диода D1и D2 и трансформатор Тр со средней точкой, в которого выходная обмотка трансформатора разделена две равные половины. Причем, количество витков каждой из полуобмоток должно равняться количеству витков выходного трансформатора однополупериодного выпрямителя. В нечетные полуволны открыт диод D1, а в четные - D2. Как видно из схемы, токи через нагрузочное сопротивление проходят в одном направлении.

В двухполупериодном выпрямителе (рис.2.7,в) используется более простой трансформатор Тр без средней точки, но зато требуется четыре диода, которые включены по так называемой мостовой схеме.

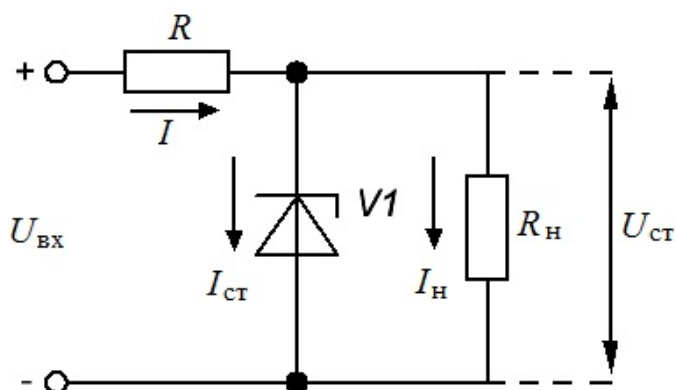
Для поддержания постоянства напряжения в цепях питания электронной аппаратуры широко используются стабилитроны. **Стабилитроны** (диоды Зенера) — это полупроводниковые диоды, предназначенные для стабилизации напряжений. Стабилитрон является разновидность полупроводникового диода, работающего при напряжении обратного смещении в режиме пробоя. До момента наступления электрического пробоя $p-n$ перехода через стабилитрон течет очень малый ток утечки, а его сопротивление достаточно высокое. В момент пробоя ток через него резко увеличивается, а дифференциальное сопротивление стабилитрона снижается до малых ве-

личин. За счет этого в режиме пробоя напряжение на стабилитроне поддерживается с удовлетворительной точностью в большом диапазоне обратных токов.

Вольт-амперная характеристика стабилитрона показанная на рис.2.9а, а схема стабилизатора напряжения на рис. 2.9б. Работа стабилизатора основана на том свойстве стабилитрона, что на рабочем участке вольт-амперной характеристики (от $I_{ст\ min}$ до $I_{ст\ max}$) напряжение на стабилитроне практически не изменяется (в действительности конечно изменяется от $U_{ст\ min}$ до $U_{ст\ max}$, но можно считать, что $U_{ст\ min} = U_{ст\ max} = U_{ст}$).



а)



б)

Рисунок 2.9 – Схема стабилизатора напряжения на стабилитроне

В приведенной схеме, при изменении входного напряжения или тока нагрузки напряжение на нагрузке R_H практически не меняется (оно остаётся таким же, как и на стабилитроне), вместо этого изменяется ток через стабилитрон (в случае изменения входного напряжения и ток через балластный резистор R тоже). То есть, излишки входного напряжения гасятся балластным резистором R , величина падения напряжения на этом резисторе зависит от тока через него, а ток через него зависит в том числе от тока через стабилитрон $I_{ст}$. Таким образом, получается, что изменение тока через стабилитрон регулирует величину падения напряжения на балластном резисторе. Для нормальной работы такого стабилизатора необходимо, чтобы ток $I_{ст}$, протекающий через стабилитрон, был не меньше, чем $I_{ст.min}$, и не больше, чем $I_{ст.max}$. При изменении тока, протекающего через стабилитрон в этих пределах, на нем и на подключенной параллельно ему нагрузке R_H напряжение, называемое напряжением стабилизации $U_{ст}$ стабилитрона, будет оставаться постоянным.

Одним из важнейших параметров стабилизатора является коэффициентом стабилизации ($K_{ст}$), количественно равный отношению относительного изменения напряжения на входе стабилизатора ($\Delta U_{вх}/U_{вх}$) к относительному изменению напряжения на его выходе ($\Delta U_{вых}/U_{вых}$):

$$K_{CT} = \frac{\Delta U_{BX}}{U_{BX}} : \frac{\Delta U_{BLX}}{U_{BLX}} = \frac{\Delta U_{BX} U_{BLX}}{\Delta U_{BLX} U_{BX}} = \frac{\Delta U_{BX} U_{CT}}{\Delta U_{BLX} U_{BX}}$$