

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

**Кафедра микропроцессорной техники
и информационно-управляющих систем**

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

**Лабораторный практикум
по дисциплине «Электронные устройства на транспорте»**

Гомель 2007

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра микропроцессорной техники
и информационно-управляющих систем

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

Лабораторный практикум
по дисциплине «Электронные устройства на транспорте»

Одобрено методической комиссией электротехнического факультета

Гомель 2007

УДК 621.382.2
ББК 32.852
П53

А в т о р ы : В. Е. Минин, Г. С. Гаврилов, С. Ф. Ермаков, Е. А. Жидкова.

Р е ц е н з е н т – канд. техн. наук, доцент М. Л. Шишаков (УО «БелГУТ»).

Полупроводниковые диоды : лабораторный практикум по дисциплине
П53 “Электронные устройства на транспорте” / В. Е. Минин [и др.] ; М-во об-
разования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ,
2007. – 59 с.

ISBN 978-985-468-271-6

Приведены краткие теоретические сведения и порядок проведения лабораторных исследований полупроводниковых диодов и устройств на их основе.

Предназначен для студентов специальности “Автоматика, телемеханика и связь на транспорте”.

УДК 621.382.2
ББК 32.852

ISBN 978-985-468-271-6

© Оформление. УО «БелГУТ», 2007

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПОЛУПРОВОДНИКАХ

К *полупроводникам* относят вещества, которые по своим электрическим свойствам занимают промежуточное положение между диэлектриками и проводниками. Отличительной особенностью полупроводников является зависимость их электропроводности от температуры, концентрации примесей, воздействия светового и ионизирующего излучений.

При воздействии электрического поля в полупроводнике протекает электрический ток, который можно рассматривать как движение электронов в одном направлении или движение дырок в противоположном направлении. В случае абсолютно чистого (*собственного* или *i-типа*) полупроводника количество дырок и количество свободных электронов равны между собой.

Наиболее широко используются два полупроводниковых материала – германий и кремний, которые являются элементами IV группы периодической системы Менделеева, также все большее применение находят материалам на основе соединений галлия. Если полупроводник легирован каким-либо элементом V группы, например фосфором, то равенство числа свободных электронов и дырок будет нарушено: свободных электронов в таком полупроводнике больше, чем дырок. Электрический ток через такой материал в основном состоит из потока электронов одного направления и сравнительно небольшого количества дырок, движущихся в противоположном направлении. В этом случае электроны называют основными, а дырки – неосновными носителями. Полупроводниковые материалы, легированные элементами V группы, называют *полупроводниками электронной электропроводности* или *полупроводниками n-типа*.

Аналогичное положение имеет место, если полупроводник легирован элементом III группы, например индием. В этом случае количество дырок превышает количество свободных электронов, и дырки являются основными носителями. Поскольку основные носители имеют положительный заряд, такие полупроводники называют *полупроводниками p-типа*.

Если монокристалл полупроводникового материала с одного конца легировать примесями типа *p*, а с другого – примесями типа *n*, то между областями с

различным типом проводимости образуется p - n переход. Некоторые дырки из области p диффундируют в область n . В результате часть области p получает небольшой отрицательный заряд. Аналогичным образом электроны из области n диффундируют в область p , и часть области n оказывается заряженной положительно. В тонком слое между областями n и p электроны и дырки рекомбинируют, и так как этот слой в результате имеет очень мало свободных носителей заряда, его называют обедненным слоем. Этот слой действует как потенциальный барьер, препятствующий дальнейшей диффузии носителей зарядов, и переход находится в состоянии динамического равновесия (рисунок 1, a).

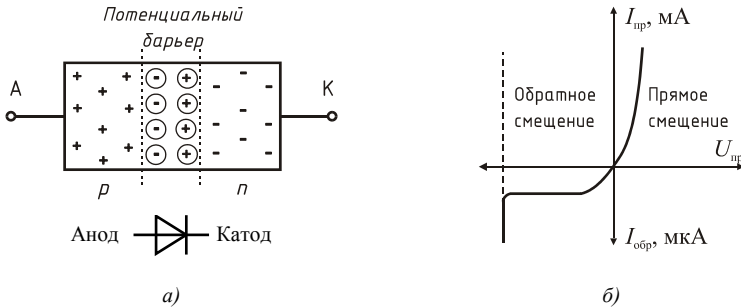


Рисунок 1 – p - n -переход и его вольт-амперная характеристика

Если внешнее напряжение приложено к зажимам таким образом, что точка А (анод) имеет положительный потенциал по отношению к точке К (катод), то будет наблюдаться уменьшение толщины обедненного слоя. Потенциальный барьер при этом снижается, что способствует протеканию тока через переход. С увеличением внешнего напряжения ток через переход возрастает по экспоненциальному закону до тех пор, пока внешнее напряжение не станет равным величине потенциального барьера, то есть результирующее напряжение на переходе станет равным нулю. Дальнейшее возрастание тока через переход ограничивается только сопротивлением полупроводникового материала. Если полярность внешнего напряжения изменить на обратную, то величина потенциального барьера возрастет и основные носители окажутся заблокированными. В этих условиях, однако, через переход будет протекать незначительный ток, называемый *обратным током* или *током утечки*. При возрастании внешнего обратного напряжения этот ток остается постоянным, пока напряжение не достигнет точки пробоя. В этой точке при постоянном напряжении ток быстро возрастает (рисунок 1, b). Ток утечки сильно зависит от температуры.

Таким образом, при смещении перехода в прямом направлении через него будет протекать достаточно большой ток, а при обратном смещении, меньшем пробивного, протекающий через переход ток имеет относительно малое значение.

Основные причины возникновения тока утечки следующие:

а) образование неосновных носителей при нагревании, воздействии радиации и нарушениях структуры кристаллической решетки. В этих случаях образуются электронно-дырочные пары и носители заряда, которые являются неосновными, свободно проходят через p - n переход, смещенный в обратном направлении для основных носителей. Образование электронно-дырочных пар при нагревании является наиболее существенной причиной возрастания тока утечки;

б) поверхностные токи утечки являются существенным фактором только для кремниевых приборов, в которых тепловой ток утечки весьма незначителен. Поверхностный ток утечки часто обусловлен загрязнением поверхности и в конечном итоге снижает обратное сопротивление перехода.

2 ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

2.1 Определение и условное графическое обозначение

Полупроводниковый диод – полупроводниковый прибор с одним выпрямляющим электрическим переходом и двумя выводами, в котором используется то или иное свойство выпрямляющего перехода.

В качестве выпрямляющего электрического перехода используется электронно-дырочный переход (p - n -переход), разделяющий p - и n -области кристалла полупроводника (также в качестве выпрямляющего электрического перехода может использоваться выпрямляющий переход металл-полупроводник). К p - и n -областям кристалла привариваются или припаиваются металлические выводы (называются *анодом* и *катодом* соответственно), и вся система заключается в металлический, металлокерамический, стеклянный или пластмассовый корпус.

В условном графическом обозначении (рисунок 2) полупроводникового диода треугольник является анодом, черточка – катодом. Прямой ток проходит тогда, когда анод имеет положительный потенциал относительно катода. Следовательно, треугольник можно рассматривать как острие стрелки, показывающей условное направление прямого тока. Именно в этом направлении при прямом токе движутся дырки, электроны же движутся в противоположном направлении.

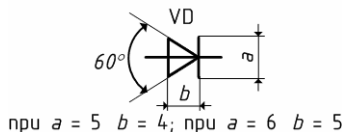


Рисунок 2 – Условное графическое обозначение диода (согласно ГОСТ 2.730-73)

2.2 Технология изготовления полупроводниковых диодов

Технологический процесс создания электронно-дырочного перехода может быть различным: сплавление (сплавные диоды), диффузия одного вещества в другое (диффузионные диоды), эпитаксия – ориентированный рост одного кристалла на поверхности другого (эпитаксиальные диоды) и др. По конструкции электронно-дырочные переходы могут быть симметричными и несимметричными, резкими и плавными, плоскостными и точечными и др. Однако для всех типов переходов основным свойством является несимметричная электропроводность, при которой в одном направлении кристалл пропускает ток, а в другом – не пропускает. На практике находят применение точечные, плоскостные и диффузные диоды.

В зависимости от соотношений линейных размеров выпрямляющего *p-n*-перехода и характеристической длины различают плоскостные и точечные диоды.

Точечный диод образуется в месте контакта небольшой пластины полупроводника и острого металлической проволоки. Линейные размеры перехода меньше его ширины. Благодаря малой площади диод обладает малой емкостью перехода (менее 1 пФ), относительно небольшим временем переключения (десятки наносекунд) и используется на любых частотах вплоть до СВЧ. Малая площадь перехода определяет также небольшой допустимый ток (до 20 мА). Точечные диоды обычно выполняются на основе германия.

Плоскостные сплавные диоды имеют плоский электрический переход, линейные размеры которого (определяющие его площадь) значительно больше ширины *p-n*-перехода. Это обуславливает большую емкость (десятки пикофард), чем у точечных, и ограничивает использование по частоте (не выше десятков килогерц). Допустимый ток в плоскостных диодах находится в пределах от десятков миллиампер до сотен ампер.

Диффузные диоды изготавливаются посредством диффузии в полупроводниковую пластину примеси, находящейся в газообразной, жидкой или твердой фазах. Имеют малую собственную емкость и малое значение постоянной времени (до наносекунд).

При интегральной технологии в качестве диодов, как правило, используют эмиттерный переход транзистора.

Кроме одиночных диодов, выпускаются диодные сборки, столбы, блоки, которые состоят из специально подобранных диодов, помещенных в один корпус.

2.3 Вольт-амперная характеристика

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) – это зависимость тока, протекающего через электронный прибор, от приложенного напряжения. Вольт-амперной характеристикой называют также и график этой зависимости.

Приборы, принцип действия которых подчиняется закону Ома, а ВАХ имеет вид прямой линии, проходящей через начало координат, называют *ли-*

нейными. Приборы, для которых ВАХ не является прямой линией, проходящей через начало координат, называются *нелинейными*. Диод представляет собой пассивный нелинейный электронный прибор.

Вольт-амперная характеристика диода описывается выражением

$$I = I_0 [\exp(U_d / \varphi_T) - 1], \quad (1)$$

где I_0 – тепловой ток (обратный ток, образованный за счет неосновных носителей); U_d – напряжение на p - n -переходе; φ_T – тепловой потенциал, равный контактной разности потенциалов на границе p - n -перехода при отсутствии внешнего напряжения (при $T = 300$ К, $\varphi_T = 0,025$ В).

По мере возрастания положительного напряжения на p - n -переходе прямой ток резко возрастает по экспоненте. При отрицательных значениях напряжения менее 0,1 В в выражении (1) пренебрегают единицей, и обратный ток диода определяется значением теплового тока и на несколько порядков меньше прямого тока. В этом проявляются вентильные свойства диода, которые выражены тем сильнее, чем меньше обратный ток при заданном обратном напряжении и чем меньше прямое напряжение при заданном прямом токе. Поэтому ВАХ имеет вид, приведенный на рисунке 3.

Рассмотренная характеристика является *теоретической ВАХ* диода. Она не учитывает рекомбинационно-генерационные процессы, происходящие в объеме и на поверхности p - n -перехода, считая его бесконечно тонким и длинным. ВАХ реального диода имеет вид, приведенный на рисунке 3 (сплошная линия).

Характеристика для прямого тока вначале имеет значительную нелинейность, так как при увеличении напряжения сопротивление запирающего слоя уменьшается, поэтому кривая идет вверх со все большей крутизной. Но при некотором значении напряжения запирающий слой практически исчезает и остается только сопротивление n - и p -областей, которое приближенно можно считать постоянным, поэтому далее характеристика становится почти линейной. Небольшая нелинейность здесь объясняется тем, что при увеличении тока n - и p -области нагреваются и от этого их сопротивление уменьшается.

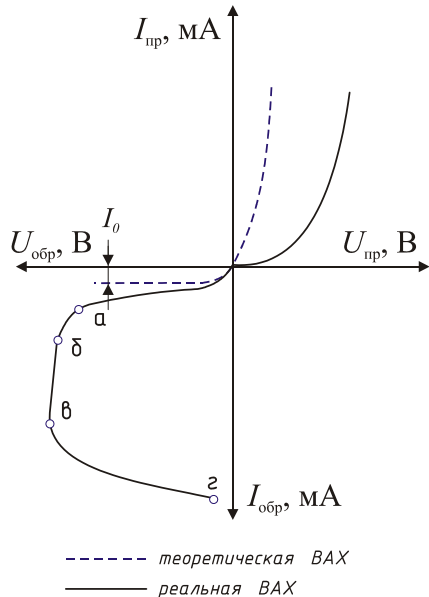


Рисунок 3 – Теоретическая и реальная ВАХ диода

Обратный ток при увеличении обратного напряжения сначала быстро возрастает. Это вызвано тем, что уже при небольшом обратном напряжении за счет повышения потенциального барьера в переходе резко снижается диффузионный ток, который направлен навстречу току проводимости. Следовательно, полный ток резко увеличивается. Однако при дальнейшем повышении обратного напряжения ток растёт незначительно. Рост тока происходит вследствие нагрева перехода за счет утечки по поверхности, а также за счет лавинного размножения носителей заряда, то есть увеличения числа носителей заряда в результате ударной ионизации.

При некотором значении обратного напряжения возникает *пробой p - n -перехода*, при котором обратный ток резко возрастает и сопротивление запирающего слоя резко уменьшается. Следует различать *электрический* и *тепловой пробой*. Электрический пробой (участок *авв*) является обратимым, то есть при этом пробое в переходе не происходит разрушение структуры полупроводника. При электрическом пробое обратный ток увеличивается при практически неизменном обратном напряжении и при уменьшении напряжения работоспособность диода восстанавливается. При тепловом пробое рост обратного тока сопровождается уменьшением напряжения.

Имеется два вида электрического пробоя: *лавинный* и *туннельный*.

Лавинный пробой объясняется лавинным размножением носителей за счет ударной ионизации и за счет вырывания электронов из атомов сильным электрическим полем. Этот вид пробоя характерен для *p - n -перехода* большой толщины. Пробивное напряжение составляет десятки или сотни вольт.

Туннельный пробой объясняется явлением туннельного эффекта, который состоит в том, что в *p - n -переходе* малой толщины при больших значениях напряженности электрического поля некоторые электроны проникают через переход без изменения своей энергии. Напряжение, соответствующее этому виду пробоя, обычно не превышает единиц вольт.

В режиме электрического пробоя работают специальные диоды – стабилитроны; для прочих видов диодов режим пробоя является аварийным. Если при пробое ток в цепи не ограничить, диод выходит из строя. В таких приборах при увеличении (по модулю) обратного напряжения практически сразу начинается тепловой пробой.

Области теплового пробоя соответствует участок *вг*. Тепловой пробой необратим, так как он сопровождается разрушением структуры вещества в месте *p - n -перехода*. Причиной теплового пробоя является нарушение устойчивости теплового режима *p - n -перехода*. Это означает, что количество теплоты, выделяющееся в переходе от нагрева его обратным током, превышает количество теплоты, отводимое от перехода. В результате температура перехода возрастает, сопротивление его уменьшается и ток увеличивается, что приводит к перегреву перехода и его тепловому разрушению.

На электропроводность полупроводников значительное влияние оказывает температура. При повышении температуры усиливается генерация пар носителей заряда, то есть увеличивается концентрация носителей и проводимость растет, поэтому свойства полупроводниковых диодов сильно зависят от температуры. Это показывают ВАХ, измеренные при различных температурах (рисунок 4). Прямой ток при нагреве диода растет не так быстро, как обратный. Это объясняется тем, что прямой ток возникает за счет примесной проводимости, а концентрация примесей не зависит от температуры.

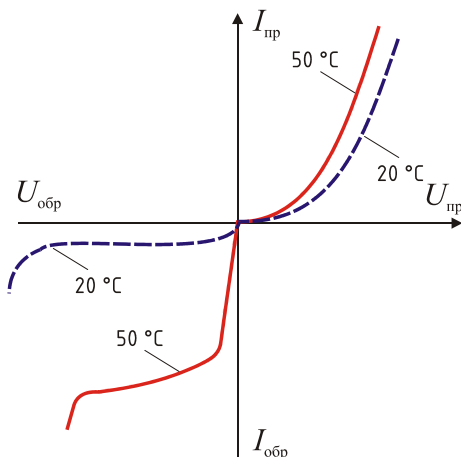


Рисунок 4 – Влияние температуры на ВАХ

2.4 Общие параметры диодов

Свойства полупроводниковых диодов оцениваются параметрами. Различают общие параметры, которые характеризуют любой полупроводниковый диод, и специальные параметры, присущие только отдельным видам диодов.

К общим параметрам диодов относят: допустимую температуру перехода; допустимую мощность, рассеиваемую диодом; допустимые прямой ток и обратное напряжение.

Для исключения теплового пробоя температура p - n -перехода должна быть меньше допустимой температуры перехода $T_{п. \max}$. При допустимой температуре перехода на диоде выделяется *допустимая рассеиваемая мощность* $P_{д. \max}$. Режим диода необходимо выбирать из условия $UI \leq P_{д. \max}$.

Температура диода зависит от прямого тока. Прямой ток, при котором температура p - n -перехода диода достигает значения $T_{п. \max}$, называют *допустимым прямым током* и обозначают $I_{пр. \max}$.

Важным параметром диодов является *максимальное допустимое обратное напряжение* $U_{обр. \max}$, при котором не происходит пробоя p - n -перехода. Обычно $U_{обр. \max} \leq 0,8 U_{обр}$.

Кроме вышеперечисленных, общими для всех диодов считаются параметры, определяемые по ВАХ (рисунок 5).

Прямое и обратное сопротивление диода постоянному току (*статическое сопротивление*) выражается следующими соотношениями:

$$r_{пр} = U_{пр0} / I_{пр0}; r_{обр} = U_{обр0} / I_{обр0}. \quad (2)$$

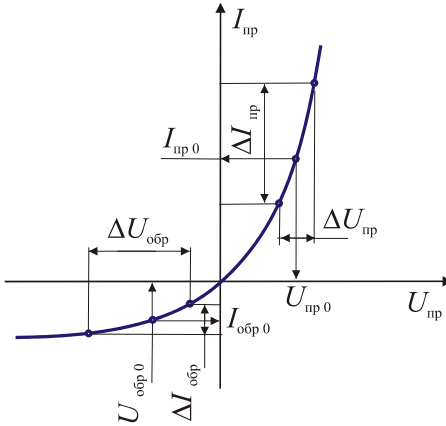


Рисунок 5 – Определение статического и динамического сопротивлений по ВАХ

Прямое и обратное *дифференциальные* сопротивления (сопротивление по переменному току):

$$r_{\text{диф. пр}} = \Delta U_{\text{пр}} / \Delta I_{\text{пр}};$$

$$r_{\text{диф. обр}} = \Delta U_{\text{обр}} / \Delta I_{\text{обр}}. \quad (3)$$

В зависимости от того, на каком участке ВАХ расположена заданная рабочая точка, значение статического сопротивления может быть меньше, равно или больше значения динамического сопротивления. Статическое сопротивление диода всегда положительно, в то время как динамическое может быть и отрицательным.

2.5 Эквивалентные схемы полупроводниковых диодов

Полная эквивалентная схема полупроводникового диода показана на рисунке 6, а. Сопротивление R_0 представляет собой суммарное, сравнительно небольшое сопротивление n - и p -областей и контактов этих областей с выводами. Нелинейное сопротивление $R_{\text{нл}}$ при прямом напряжении сравнительно невелико и равно $R_{\text{пр}}$, а при обратном напряжении имеет достаточно большое значение и $R_{\text{нл}} = R_{\text{обр}}$. Диффузионная емкость $C_{\text{диф}}$ характеризует накопление подвижных носителей заряда в n - и p -областях при прямом напряжении на переходе. При обратном напряжении p - n -переход обладает барьерной емкостью $C_{\text{б}}$, появление которой обусловлено наличием по обе стороны запирающего слоя разноименных объемных зарядов. На высоких частотах существует емкость $C_{\text{в}}$ между выводами диода, которая заметно шунтирует диод. Кроме того, на СВЧ может также проявляться индук-

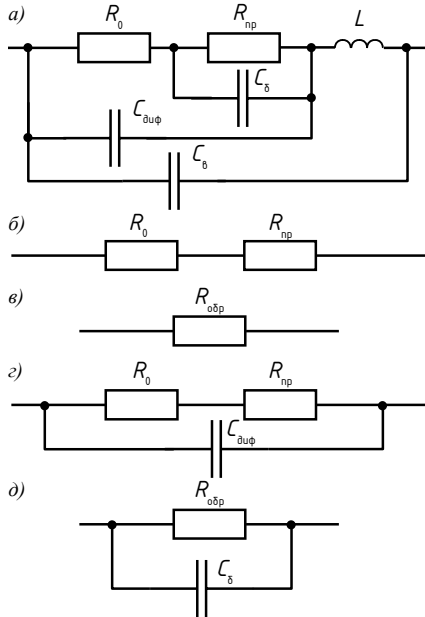


Рисунок 6 – Эквивалентные схемы полупроводникового диода

тивность выводов L . На рисунке б, з, д представлены упрощенные эквивалентные схемы на высоких частотах при прямом и обратном напряжении соответственно. На низких частотах значения емкостей можно не учитывать (рисунок б, б, в).

2.6 Классификация диодов

Современные полупроводниковые диоды классифицируют по назначению, физическим свойствам, основным электрическим параметрам, конструктивно-технологическим признакам, исходному полупроводниковому материалу (таблица 1).

Таблица 1 – Классификация диодов

Признак классификации	Наименование диода
Площадь перехода	Точечный Плоскостной
Полупроводниковый материал	Германиевый Кремниевый Арсенид галлия
Назначение	Выпрямительный Универсальный Импульсный Сверхвысокочастотный (СВЧ диод) Стабилитрон (стабистор) Варикап Обращенный
Принцип действия	Лавинно-пролетный Туннельный Диод Ганна Диод Шотки Излучающий Фотодиод Оптопара (оптрон)

Выпрямительными называют диоды, предназначенные для выпрямления переменного тока (условное графическое изображение представлено на рисунке 7, а).

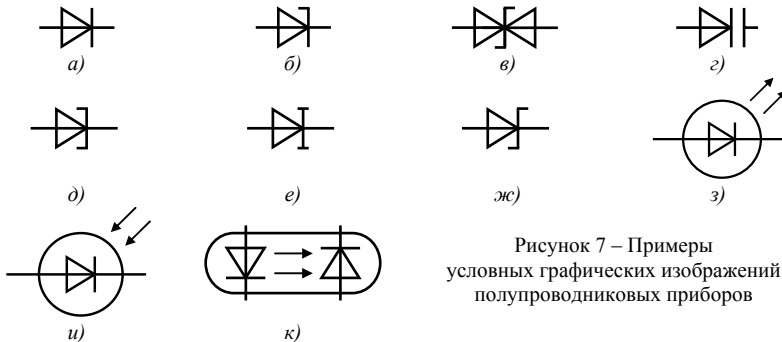


Рисунок 7 – Примеры условных графических изображений полупроводниковых приборов

Выпрямительные диоды классифицируют по мощности и частоте. По мощности различают *диоды малой мощности* ($I_{\text{пр. max}} \leq 0,3 \text{ A}$), *средней мощности* ($0,3 \text{ A} \leq I_{\text{пр. max}} \leq 10 \text{ A}$), *большой мощности* ($I_{\text{пр. max}} > 10 \text{ A}$). По частоте: *низкочастотные* ($f_{\text{max}} < 10^3 \text{ Гц}$) и *высокочастотные* ($f_{\text{max}} > 10^3 \text{ Гц}$).

Универсальными называют высокочастотные диоды, применяемые для выпрямления, модуляции, детектирования и других нелинейных преобразований электрических сигналов, частота которых не превышает 1000 МГц.

Импульсными называют полупроводниковые диоды, используемые в качестве ключевых элементов в схемах при воздействии импульсов малой длительности. На схемах универсальные и импульсные диоды изображаются так же, как и выпрямительные диоды.

В быстродействующих импульсных цепях широко используют диоды Шотки, в которых переход выполнен на основе контакта металл–полупроводник. У этих диодов не затрачивается время на накопление и рассасывание зарядов, их быстродействие зависит только от скорости процесса перезаряда барьерной емкости. Вольт-амперная характеристика диодов Шотки напоминает характеристику диодов на основе *p-n*-переходов, отличие состоит в то, что прямая ветвь представляет собой идеальную экспоненциальную кривую, а обратные токи достаточно малы (доли – десятки нА). Диоды Шотки применяют также в выпрямителях больших токов и в логарифмирующих устройствах. Условное обозначение диода Шотки приведено на рисунке 7, ж.

Сверхвысокочастотными (СВЧ) называются полупроводниковые диоды, используемые для преобразования и обработки (детектирования, усиления, умножения, генерирования и управления уровнем мощности) сверхвысокочастотного сигнала (до сотен гигагерц). СВЧ диоды в зависимости от исполняемой функции подразделяют на *смесительные, детекторные, параметрические, умножительные, регулирующие, генераторные* (диоды Ганна и лавинно-пролетные диоды). В схемах они изображаются так же, как и выпрямительные диоды.

Полупроводниковыми стабилитронами (рисунок 7, б) называются диоды, предназначенные для стабилизации напряжения. Для стабилизации высокого напряжения ($U > 3 \text{ В}$) используется обратная ветвь вольт-амперной характеристики. Для стабилизации небольших значений напряжения ($U \leq 1 \text{ В}$) используют прямую ветвь, а применяемые в этом случае диоды называют *стабилиторами*. В схемах двуполярной стабилизации напряжения применяется *симметричный стабилитрон* (рисунок 7, в).

Варикапами (рисунок 7, з) называются полупроводниковые диоды, в которых используется зависимость емкости *p-n*-перехода от обратного напряжения. Варикапы подразделяются на подстроечные и умножительные (или *варакторы*). Основной характеристикой варикапа служит вольт-фарадная характеристика (рисунок 8) – зависимость емкости варикапа от значения приложенного обратного напряжения.

К *туннельным* относят диоды, у которых за счет туннельного эффекта на прямой ветви ВАХ (рисунок 9, область 1) существует область с отрицательным дифференциальным сопротивлением (область 2). В области 3 ВАХ прибор полностью выходит из пробоя и ведет себя как обычный диод. Условное графическое обозначение представлено на рисунке 7, д. По своему назначению туннельные диоды подразделяют на *усилительные, генераторные, переключающие*.

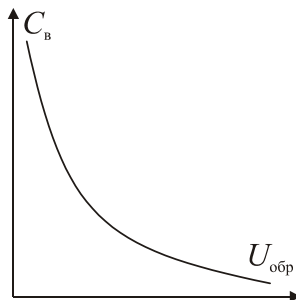


Рисунок 8 – Вольт-фарадная характеристика варикапа

Обращенными (рисунок 7, е) называют полупроводниковые диоды, в которых вследствие туннельного эффекта проводимость при обратном напряжении значительно больше, чем при прямом. ВАХ обращенного диода представлена на рисунке 10.

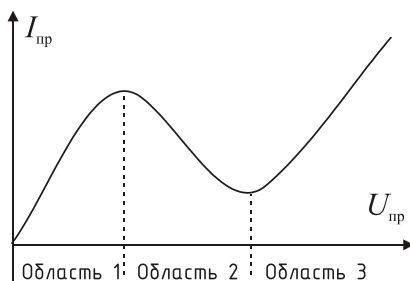


Рисунок 9 – ВАХ туннельного диода

Излучающие диоды (рисунок 7, з) – полупроводниковые диоды, излучающие из *p-n*-перехода кванты энергии. По характеристике излучения делятся на две группы: с излучением в видимой области спектра – *светодиоды*; диоды с излучением в инфракрасной области спектра, получившие название *ИК-диоды*.

Фотодиоды (рисунок 7, и) – полупроводниковые диоды, принцип действия которых основан на использовании внутреннего фотоэффекта – генерации в полупроводнике под действием квантов света свободных носителей заряда.

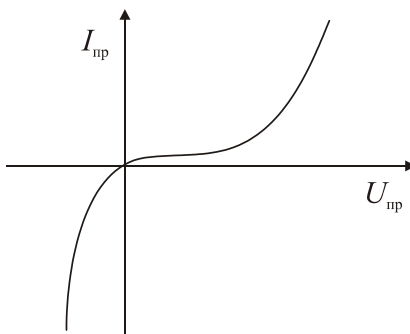


Рисунок 10 – ВАХ обращенного диода

Оптрон (оптопара) – полупроводниковый прибор, содержащий источник излучения и приемник излучения, объединенные в одном корпусе и связанные между собой оптически, электрически или

одновременно обоими связями (рисунок 7, к). Широкое распространение получили оптроны, у которых в качестве приемника излучения используется фоторезистор, фотодиод, фототранзистор и фототиристор. Оптроны применяют для гальванической развязки и оптической коммутации высоковольтных силовых цепей.

2.7 Система обозначений диодов

Система обозначений полупроводниковых диодов установлена отраслевым стандартом ОСТ 11336.919-81, а силовых полупроводниковых приборов – ГОСТ 20869.1-89. В основу системы обозначений положен буквенно-цифровой код, состоящий из пяти элементов (рисунок 11).

Первый элемент (цифра или буква) обозначает исходный полупроводниковый материал: 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 элемент (буква) обозначает подкласс приборов: Д – диоды выпрямительные, импульсные и универсальные; Ц – выпрямительные столбы и блоки; В – варикапы; И – туннельные диоды; А – сверхвысокочастотные; С – стабилитроны; Г – генераторы шума; Л – излучающие оптоэлектронные приборы; О – оптопары.

Третий элемент (цифра) – основные функциональные возможности прибора, то есть уточняет назначение прибора или подразделяет по дополнительным параметрам. Для выпрямительных диодов используются следующие цифры: 1 – диоды выпрямительные со средним значением прямого тока не более 0,3 А; 2 – со средним значением прямого тока более 0,3 А, но не свыше 10 А. Для стабилитронов мощностью не более 0,3 Вт: 1, 2, 3 – с напряжением стабилизации соответственно менее 10 В, от 10 до 100 В, более 100 В; мощностью от 0,3 В до 5 Вт: 4, 5, 6 – с напряжением стабилизации соответственно менее 10 В, от 10 до 100 В, более 100 В; мощностью более 5 Вт, но не более 10 Вт: 7, 8, 9 – с напряжением стабилизации соответственно менее 10 В, от 10 до 100 В, более 100 В.

Четвертый элемент – двухзначное число от 01 до 99, обозначающее порядковый номер разработки.

Пятый элемент – буква, условно определяющая классификацию (разбраковку по параметрам) приборов, изготовленных по единой технологии. В качестве квалификационной литеры используются буквы русского алфавита (за исключением букв З, О, Ш, Щ, Ч, Ъ, Ы, Ь, Э, Ю, Я).

До введения в 1982 г. отраслевого стандарта применялась иная система условных обозначений, состоящая из двух или трех элементов. Первым элементом является буква «Д», характеризующая весь класс полупроводниковых диодов. Второй элемент – число, определяющее область применения: 1–100 – для точечных германиевых диодов; 101–200 точечных кремниевых диодов; 201–300 – для плоскостных кремниевых диодов; 301–400 – для плоскостных германиевых диодов; 401–500 – для смесительных СВЧ детекторов; 501–600 – для умножительных диодов; 601–700 – для видеодетекторов; 701–749 – для параметрических германиевых диодов; 750–800 – для параметрических кремниевых диодов.

Третьим элементом является буква, характеризующая разновидность диода в данной группе.

Справочные данные по диодам и стабилитронам, используемым в лабораторных работах, приведены в приложении А.

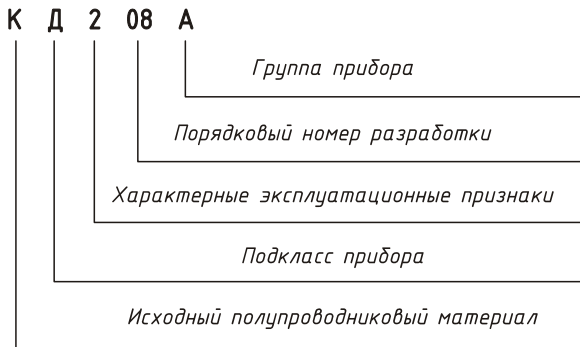


Рисунок 11 – Система обозначений диодов согласно ОСТ 11336.919-81

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1 Какие вещества относят к полупроводникам?
- 2 Отличительная особенность полупроводников.
- 3 Виды электропроводимости в полупроводниках.
- 4 Какие материалы используются в качестве полупроводников?
- 5 Какой полупроводник называется собственным?
- 6 Что такое примесный полупроводник?
- 7 Как изменяется удельное сопротивление полупроводника при внесении примеси?
- 8 Как образуется полупроводник n -типа?
- 9 Как образуется полупроводник p -типа?
- 10 Как образуется p - n -переход?
- 11 Почему p - n -переход при отсутствии воздействия на него внешнего напряжения находится в равновесном состоянии?
- 12 Какие физические процессы происходят при прямом включении токов p - n -перехода?
- 13 Основные причины возникновения токов утечки.
- 14 Что такое полупроводниковый диод?
- 15 Чем обусловлены выпрямляющие свойства диодов?
- 16 Технология изготовления полупроводниковых диодов.
- 18 В зависимости от каких свойств p - n -перехода различают плоскостные и точечные диоды? Как это отражается на электрических параметрах этих диодов?
- 19 Что такое вольт-амперная характеристика?
- 20 Какие электронные приборы называются линейными? Привести примеры.
- 21 Теоретическая ВАХ полупроводникового диода.
- 22 Реальная ВАХ диода.
- 23 Чем обусловлено наличие линейного участка в прямой ветви ВАХ диода?
- 24 Что такое пробой p - n -перехода?
- 25 Виды пробоя p - n -перехода.
- 26 Какие физические процессы происходят при лавинном пробое p - n -перехода?

- 27 Является ли допустимой работа полупроводникового диода при электрическом пробое?
- 28 Почему тепловой пробой является необратимым?
- 29 Влияние температуры на ВАХ диода.
- 30 Общие параметры диодов.
- 31 Почему необходимо ограничивать температуру $p-n$ -перехода?
- 32 Что произойдет с диодом при прямом токе, превышающем допустимое значение?
- 33 Почему необходимо ограничивать значение обратного напряжения?
- 34 Как образуется емкость $p-n$ -перехода?
- 35 Как определить статическое сопротивление диода?
- 36 Как определить динамическое сопротивление диода?
- 37 Полная эквивалентная схема полупроводникового диода.
- 38 Упрощенная эквивалентная схема диода на низких частотах (при прямом и обратном включении).
- 39 Упрощенная эквивалентная схема диода на высоких частотах (при прямом и обратном включении).
- 40 Классификация полупроводниковых диодов.
- 41 Система обозначения полупроводниковых диодов.
- 42 По каким параметрам классифицируются выпрямительные диоды?
- 43 Назначение и система обозначения выпрямительных диодов.
- 44 Назначение выпрямительных столбов.
- 45 Назначение и система обозначения импульсных диодов.
- 46 Назначение и система обозначения СВЧ-диодов.
- 47 Классификация СВЧ-диодов.
- 48 Какие свойства $p-n$ -перехода используются при работе диодов специализированного назначения (стабилитрон, варикап, туннельный диод и т.п.)?
- 49 Что такое стабилизация напряжения?
- 50 Какое свойство $p-n$ -перехода используется при работе стабилитрона?
- 51 ВАХ стабилитрона.
- 52 Назначение и система обозначения стабилитронов.
- 53 Какой полупроводниковый диод называется стабистор?
- 54 Какая емкость $p-n$ -перехода (барьерная или диффузионная) используется при работе варикапа? Почему?
- 55 Назначение и классификация варикапов.
- 56 Вольт-фарадная характеристика варикапа.
- 57 У каких типов диодов в прямой ветви ВАХ имеется участок с отрицательным сопротивлением? Как объяснить наличие такого участка?
- 58 Какое сопротивление диода (статическое или динамическое) может принимать отрицательное значение? Почему?
- 59 Назначение и классификация туннельных диодов.
- 60 ВАХ туннельного диода.
- 61 Назначение обращенных диодов.
- 62 ВАХ обращенного диода.
- 63 На основе какого физического явления работают излучающие диоды?
- 64 Назначение и система обозначения излучающих диодов.
- 65 Принцип работы и область применения оптронов.
- 66 Принцип работы и область применения диодов Шоттки.
- 67 В чем выражаются частотные свойства полупроводниковых диодов?
- 68 Импульсный режим работы диодов.
- 69 Какой из диодов может использоваться в качестве усилительного элемента?
- 70 Как включаются (в прямом или обратном направлениях) диоды различных типов (выпрямительный, стабилитрон, варикап, туннельный, излучающий)? Объясните почему.
- 71 Почему полупроводниковые диоды получили широкое распространение в РЭА?
- 72 Недостатки полупроводниковых диодов.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИОДА

Цель работы: экспериментальное исследование и анализ вольт-амперных характеристик, определение параметров диодов.

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

1 Выпрямительные диоды

Выпрямительный диод – полупроводниковый диод, в котором используется свойство *p-n*-перехода – односторонняя проводимость. Выпрямительные диоды предназначены для преобразования переменного тока в постоянный.

Выпрямительный диод представляет собой электронный ключ, управляемый приложенным к нему напряжением. При прямом напряжении ключ замкнут, при обратном – разомкнут. Однако в обоих случаях этот ключ не является идеальным.

1.1 ВАХ выпрямительного диода

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) выпрямительного диода показана на рисунке 1. Обратный ток для выпрямительных диодов измеряется в микроамперах (обратите внимание на разный масштаб измерений по оси ординат для прямого (мА) и обратного тока (мкА)), и его, как правило, можно не принимать во внимание до тех пор, пока обратное напряжение на диоде не достигает значения напряжения пробоя. Прямое падение напряжения, обусловленное прямым током через диод, составляет от 0,2 до 0,8 В. Таким падением напряжения можно пренебречь, и тогда диод можно рассматривать как проводник, пропускающий ток только в одном направлении.

1.2 Параметры выпрямительного диода

Для характеристики выпрямительных диодов используются следующие параметры:

- максимально допустимое постоянное обратное напряжение $U_{обр. max}$ – напряжение, которое может быть приложено к диоду длительное время без опасности нарушения его работоспособности (от 10 до 1000 В; для некоторых диодов до 1500 В);
- максимально допустимый постоянный прямой ток $I_{пр. max}$ (для некоторых диодов может достигать до 1000 А);
- постоянное прямое напряжение $U_{пр}$ (доли вольта) при заданном прямом токе $I_{пр} = I_{пр. max}$;

– максимально допустимый постоянный обратный ток $I_{обр. max}$ – обратный ток утечки диода при приложении к нему напряжения $U_{обр. max}$ (от долей микроампер до нескольких миллиампер);

– максимально допустимая частота входного напряжения f_{max} , при которой обеспечиваются заданные токи и напряжения;

– общая емкость диода C_d .

Иногда в паспорте диода указывают средний выпрямленный ток $I_{пр. ср}$, средний обратный ток $I_{обр. ср}$, а также импульсный прямой ток $I_{пр. и}$ или его максимально допустимое значение.

В состав параметров диодов входят диапазон температуры окружающей среды и максимальная температура корпуса.

1.3 Исходный материал выпрямительных диодов

В качестве исходного материала при изготовлении выпрямительных диодов используют в основном германий и кремний.

Вольт-амперные характеристики германиевых и кремниевых диодов одинаковой конструкции различаются. На рисунке 1 показаны для сравнения характеристики германиевого (Ge) и кремниевых (Si) диодов.

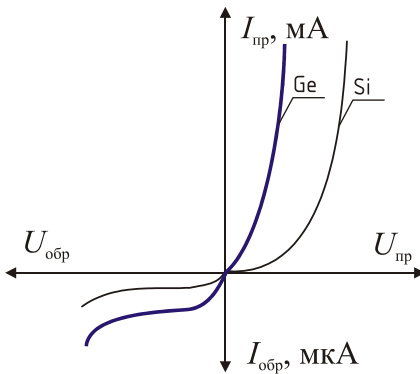


Рисунок 1 – ВАХ выпрямительных диодов

Поскольку ширина запрещенной зоны у кремния больше, чем у германия, обратный ток кремниевых диодов значительно меньше. Кроме того, обратная ветвь характеристики кремниевых диодов не имеет явно выраженного участка насыщения, что обусловлено генерацией носителей зарядов в $p-n$ -переходе и токами утечки по поверхности кристалла.

Вследствие большого обратного тока у германиевых диодов почти сразу наступает тепловой пробой, приводящий к разрушению кристалла. У кремниевых диодов из-за

малого обратного тока вероятность теплового пробоя мала, и у них возникает электрический пробой.

Прямой ток кремниевого диода, равный току германиевого диода, достигается при большем значении прямого напряжения. Поэтому мощность, рассеиваемая при одинаковых токах, в германиевых диодах меньше, чем в кремниевых. По этой причине крутизна ВАХ у германиевых диодов больше, чем у кремниевых.

На характеристики диодов существенное влияние оказывает температура окружающей среды. С ростом температуры становится интенсивнее генерация носителей зарядов и увеличиваются обратный и прямой токи диода.

Для приближенной оценки можно считать, что с увеличением температуры на 10 градусов обратный ток германиевых диодов возрастает в 2, а кремниевых – в 2,5 раза. Однако вследствие того, что при комнатной температуре обратный ток у германиевого диода значительно больше, чем у кремниевого, абсолютное значение приращения обратного тока у германиевого диода с ростом температуры оказывается в несколько раз больше, чем у кремниевого. Это приводит к увеличению потребляемой диодом мощности, его разогреву и уменьшению напряжения теплового пробоя. У кремниевых диодов из-за малого обратного тока вероятность теплового пробоя мала, и у них вначале возникает электрический пробой.

Пробой кремниевых диодов определяется процессами лавинного умножения носителей зарядов при ионизации атомов кристаллической решетки. С повышением температуры увеличивается тепловое рассеивание подвижных носителей зарядов и уменьшается длина их свободного пробега. Для того чтобы электрон на меньшем пути приобрел энергию, достаточную для ионизации, необходимо увеличение ускоряющего поля, что достигается при большем обратном напряжении. Это объясняет увеличение пробивного напряжения кремниевых диодов с ростом температуры.

2 Рабочий режим диодов

В практических схемах в цепь диода включается какая-либо нагрузка, например резистор (рисунок 2, а). Режим диода с нагрузкой называют *рабочим режимом*. Если бы диод обладал линейным сопротивлением, то расчет тока в подобной схеме не представлял бы затруднений, так как общее сопротивление цепи равно сумме сопротивления диода постоянному току R_0 и сопротивления нагрузочного резистора R_n . Но диод обладает нелинейным сопротивлением, и значение R_0 у него изменяется при изменении тока, поэтому расчет тока делают графически. Задача состоит в следующем: известны значения E , R_n и характеристика диода, требуется определить ток в цепи и напряжение на диоде.

Характеристику диода следует рассматривать как график некоторого уравнения, связывающего величины i и u , а для сопротивления R_n подобным уравнением является закон Ома:

$$i = u_R / R_n; \quad (1)$$

$$i = (E - u) / R_n. \quad (2)$$

Для решения такой системы уравнений надо построить график второго уравнения и найти координаты точки пересечения двух графиков. Графиком второго уравнения является прямая линия, называемая *линией нагрузки*. Проще всего она строится по двум точкам на осях координат. Если $i = 0$ из уравнения (2) получаем: $u = E$, что соответствует точке А на рисунке 2, б. При $u = 0$ $i = E / R_n$ (точка Б). Через точки А и Б проводим прямую, которая является линией нагрузки. Координаты точки Т дают решение поставленной задачи. Следует отметить, что все

остальные точки прямой АБ не соответствуют каким-либо рабочим режимам диода. Можно строить линию нагрузки по углу ее наклона α , поскольку $R_H = k \operatorname{ctg} \alpha$. Но это менее удобно, так как надо определять коэффициент k с учетом масштабов и находить угол по его котангенсу.

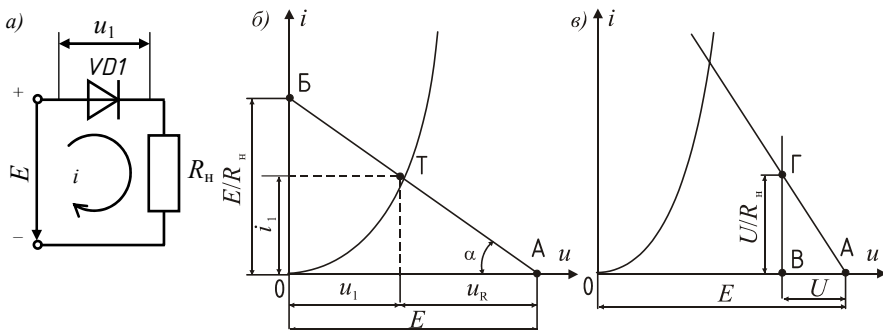


Рисунок 2 – Расчет рабочего режима диода

При построении линии нагрузки для сравнительно малых R_H точка Б окажется за пределами чертежа. В этом случае следует отложить от точки А влево произвольное напряжение U (рисунок 2, в) и от полученной точки В отложить ток, равный U / R_H (отрезок ВГ). Прямая, проведенная через точки А и Г, будет линией нагрузки.

3 Последовательное и параллельное соединения

При выпрямлении более высокого, чем предельное для одиночного диода, напряжения можно соединить диоды последовательно, чтобы обратное напряжение на каждом диоде не превышало предельного. Но вследствие разброса обратных сопротивлений у различных экземпляров диодов одного и того же типа на отдельных диодах обратное напряжение может оказаться выше предельного, что повлечет пробой диодов.

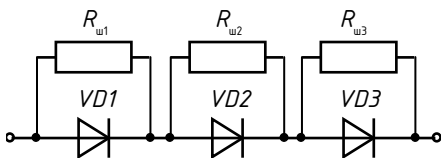


Рисунок 3 – Последовательное соединение диодов

Для того чтобы обратное напряжение распределялось равномерно между диодами независимо от их обратных сопротивлений, применяют шунтирование диодов резисторами (рисунок 3). Сопротивления $R_{ш}$ резисторов должны быть одинаковы и значительно меньше наименьшего из обратных сопротивлений диодов. Однако $R_{ш}$ не должно быть слишком малым, чтобы чрезмерно не возрос ток при обратном напряжении, то есть чтобы не ухудшилось выпрямление.

Параллельное соединение диодов (рисунок 4) применяют в том случае, когда нужно получить прямой ток, больший предельного тока одного диода. Но если диоды одного типа просто соединить параллельно, то вследствие неодинаковости вольт-амперных характеристик они окажутся различно нагруженными и в некоторых ток будет больше предельного. Различие в прямом токе у однотипных диодов может составлять десятки процентов.

Практически редко включают параллельно больше трех диодов. Уравнивающие резисторы с сопротивлением в десятые доли или единицы ом обычно подбирают экспериментально до получения в рабочем режиме одинаковых токов в диодах. Иногда включают уравнивающие резисторы с сопротивлением, в несколько раз большим, чем прямое сопротивление диодов, чтобы ток в каждом диоде определялся главным образом сопротивлением R_y . Но в этом случае происходит дополнительное падение напряжения на R_y , превышающее в несколько раз прямое напряжение диодов, и КПД, конечно, снижается. Если нежелательно включать уравнивающие резисторы, то надо подобрать диоды с примерно одинаковыми характеристиками. Однако рекомендуется по возможности не прибегать к параллельному соединению диодов.

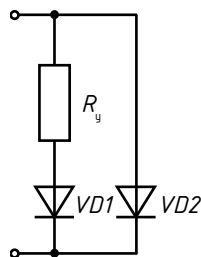


Рисунок 4 – Параллельное соединение диодов

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1 Изучить теоретические сведения.

2 Ознакомиться с принципиальными электрическими схемами, приведенными на лицевой панели лабораторной установки. При исследовании прямой ветви диода необходимо руководствоваться схемой, приведенной на рисунке 5. При исследовании обратной ветви диода необходимо руководствоваться схемой, приведенной на рисунке 6. Собрать схему исследования следует с помощью короткозамкнутых перемычек (КЗП).

3 Измерительные приборы подготовить к работе в соответствии с инструкциями по эксплуатации, после чего подключить их к макету в согласно схеме исследования. При исследовании прямой ветви ВАХ диода в качестве $PA1$ рекомендуется использовать миллиамперметр (до 100 мА), $PV1$ – вольтметр (до 2 В). При исследовании обратной ветви в качестве $PA1$ использовать миллиамперметр (до 50 мА) при исследовании германиевого диода ($VD1$ лабораторной установки) и наноамперметр (до 50 нА) при исследовании кремниевого диода ($VD2$ лабораторной установки), $PV1$ – вольтметр (20 В).

4 Исследовать прямую ветвь ВАХ германиевого диода ($VD1$).

4.1 Собрать схему исследования согласно рисунку 5 и пп. 2 и 3.

4.2 Вывести потенциометр $R1$ ($PR1$ лабораторной установки) в крайнее левое положение и подать питание на макет.

4.3 Задавая ручкой потенциометра фиксированные значения прямого тока $I_{пр}$ (0, 5, ..., 60 мА), измерить прямое напряжения $U_{пр}$. Полученные данные занести в таблицу 1.

4.4 По окончании измерений установить ручку потенциометра в исходное положение и выключить лабораторную установку.

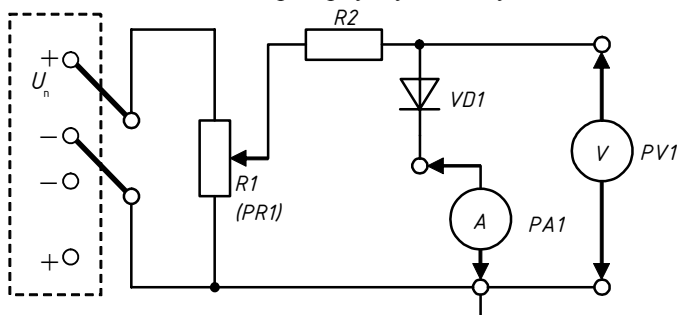


Рисунок 5 – Схема исследования прямой ветви ВАХ диода

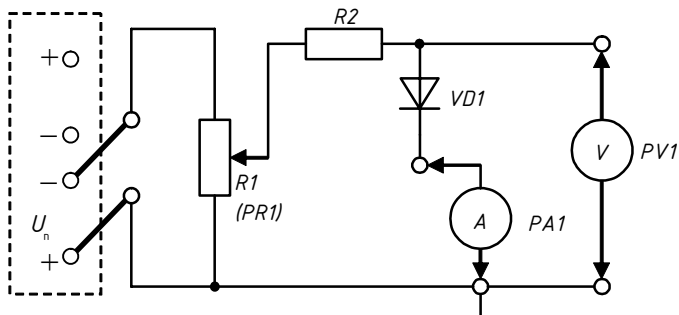


Рисунок 6 – Схема исследования обратной ветви ВАХ диода

5 Исследовать обратную ветвь ВАХ германиевого диода.

5.1. Собрать схему исследования согласно рисунку 6 и пп. 2 и 3.

5.2 Вывести потенциометр $R1$ ($PR1$ лабораторной установки) в крайнее левое положение и подать питание на макет.

5.3 Задавая ручкой потенциометра фиксированные значения обратного напряжения $U_{обр}$ (0, 1, ..., 12 В), измерить значения обратного тока $I_{обр}$. Полученные данные занести в таблицу 1.

5.4 По окончании измерений установить ручку потенциометра в исходное положение и выключить лабораторную установку.

6 Построить ВАХ германиевого диода. Значения и размерность по осям выбрать согласно рисунку 7.

7 Сравнить экспериментальную ВАХ германиевого диода со справочными данными (приложение А, диод Д9Б). Сделать выводы.

8 Исследовать прямую ветвь ВАХ кремниевого диода ($VD2$).

8.1 Собрать схему исследования согласно рисунку 5 и пп. 2 и 3.

8.2 Вывести потенциометр RI ($PR1$ лабораторной установки) в крайнее левое положение и подать питание на макет.

8.3 Задавая ручкой потенциометра фиксированные значения прямого тока $I_{пр}$ (0, 5, ..., 60 мА), измерить прямое напряжения $U_{пр}$. Полученные данные занести в таблицу 1.

8.4 По окончании измерений установить ручку потенциометра в исходное положение и выключить лабораторную установку.

9 Исследовать обратную ветвь ВАХ кремниевого диода.

9.1. Собрать схему исследования согласно рисунку 6 и пп. 2 и 3.

9.2 Вывести потенциометр RI ($PR1$ лабораторной установки) в крайнее левое положение и подать питание на макет.

9.3 Задавая ручкой потенциометра RI ($PR1$) фиксированные значения обратного напряжения $U_{обр}$ (0, 1, ..., 12 В), измерить значения обратного тока $I_{обр}$. Полученные данные занести в таблицу 1.

9.4 По окончании измерений установить ручку потенциометра в исходное положение и выключить лабораторную установку, разобрать схему исследования.

10 Построить ВАХ кремниевого диода. Значения и размерность по осям выбрать согласно рисунку 8.

11 Сравнить экспериментальную ВАХ кремниевого диода со справочными данными (см. приложение А, диоды Д226, Д237Б). Сделать выводы.

12 Используя экспериментальные ВАХ и таблицу 1, рассчитать статическое и дифференциальное сопротивления исследуемых диодов в точках, заданных преподавателем. Расчет и полученные значения привести в отчете.

13 Сравнить результаты исследований и расчетов по всем пунктам работы и сделать соответствующие выводы.

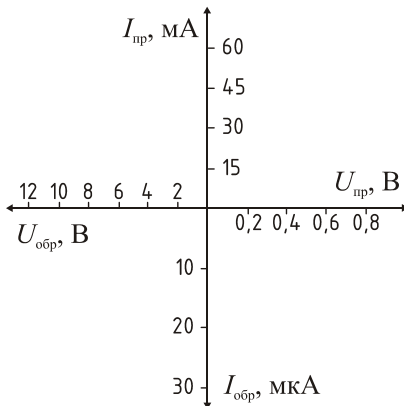


Рисунок 7 – Оси ВАХ германиевого диода

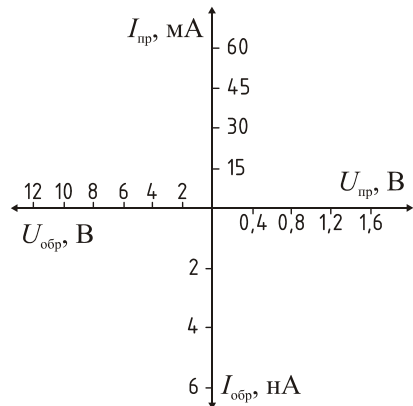


Рисунок 8 – Оси ВАХ кремниевого диода

Таблица 1 – Результаты измерений ВАХ диодов

Результаты измерений для VD1				Результаты измерений для VD2			
Прямая ветвь		Обратная ветвь		Прямая ветвь		Обратная ветвь	
$I_{пр}, \text{мА}$	$U_{пр}, \text{В}$	$U_{обр}, \text{В}$	$I_{обр}, \text{мкА}$	$I_{пр}, \text{мА}$	$U_{пр}, \text{В}$	$U_{обр}, \text{В}$	$I_{обр}, \text{нА}$

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 1 Название лабораторной работы.
- 2 Цель лабораторной работы.
- 3 Принципиальные схемы исследования прямой и обратной ветвей ВАХ диода, выполненные согласно требованиям ЕСКД.
- 4 Результаты измерения ВАХ диодов, сведенные в таблицу 1.
- 5 Экспериментальная ВАХ германиевого диода (согласно рисунку 7).
- 6 Экспериментальная ВАХ кремниевого диода (согласно рисунку 8).
- 7 Расчет дифференциального и статического сопротивлений диодов в заданных точках.
- 8 Классификация и система обозначений выпрямительных диодов.
- 9 Ответы на контрольные вопросы (по заданию преподавателя).
- 10 Аргументированные выводы по выполненной работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1 Назначение и система обозначения выпрямительных диодов.
- 2 Классификация выпрямительных диодов по мощности.
- 3 Классификация выпрямительных диодов по частоте.
- 4 Принцип действия выпрямительного диода.
- 5 ВАХ выпрямительного диода.
- 6 Основные параметры выпрямительных диодов.
- 7 Что произойдет с диодом при прямом токе, превышающем допустимое значение?
- 8 Почему необходимо ограничивать значение обратного напряжения?
- 9 Почему среди параметров указывается максимально допустимая частота входного напряжения?
- 10 Почему в справочных данных выпрямительных диодов вместо допустимого тока может быть приведено значение среднего выпрямленного тока?
- 11 Почему принцип действия выпрямительного диода эквивалентен электронному ключу?
- 12 Сравнение ВАХ германиевых и кремниевых диодов.
- 13 Для какого вида выпрямительных диодов (кремниевых или германиевых) большая вероятность наступления теплового пробоя?
- 14 Сравнение рабочих напряжений и токов германиевых и кремниевых диодов.
- 15 Сравнение рабочих температур германиевых и кремниевых диодов.
- 16 Последовательное соединение диодов. Назначение и недостатки.
- 17 ВАХ последовательно-соединенных диодов.
- 18 Назначение шунтирующих сопротивлений.
- 19 Параллельное соединение диодов. Назначение и недостатки.
- 20 ВАХ параллельно-соединенных диодов.
- 21 Назначение уравнивающего сопротивления.
- 22 Рабочий режим диодов.
- 23 Преимущества диодов Шоттки над выпрямительными диодами.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАБИЛИТРОНА

Цель работы: экспериментальное исследование и анализ вольт-амперных характеристик стабилитрона и последовательно подключенных стабилитронов, определение параметров.

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

1 Полупроводниковые стабилитроны

Полупроводниковыми стабилитронами называют диоды, предназначенные для стабилизации уровня напряжения в схеме. У стабилитронов напряжение в области электрического пробоя при обратном включении слабо зависит от тока в заданном диапазоне.

1.1 ВАХ стабилитрона

Стабилитроны работают в режиме электрического пробоя. Под действием сильного поля в области *p-n*-перехода обратный ток резко возрастает при малых изменениях приложенного напряжения. Эту особенность ВАХ в области пробоя используют для стабилизации напряжения, а также фиксации уровней напряжений и токов в схемах, отсюда другое название кремниевых стабилитронов – *опорные диоды*.

На рисунке 1 представлена типичная ВАХ стабилитрона. Характеристика для прямого тока стабилитрона такая же, как у обычных диодов.

На обратной ветви ВАХ стабилитрона точками А и Б отмечены границы рабочего участка. Положение точки А соответствует напряжению пробоя *p-n*-перехода (является также напряжением стабилизации), которое зависит от исходного материала, определяемого концентрацией примесей. Напряжение пробоя может изменяться в широких пределах – от 3,5 до 400 В и выше. В стабилитронах может иметь место и туннельный, и лавинный, и смешанный пробой в зависимости от удельного сопротивления базы. В стабилитронах с низкоомной базой (низковольтных, до шести вольт) имеет место туннельный пробой, а в стабилитронах с высокоомной базой (высоковольтных, свыше восьми вольт) – лавинный пробой.

Точка Б соответствует предельному режиму, в котором на стабилитроне рассеивается максимально допустимая мощность. При выходе ВАХ за пределы точки Б наступает тепловой пробой.

На рисунке 2 приведена рабочая область ВАХ стабилитрона.

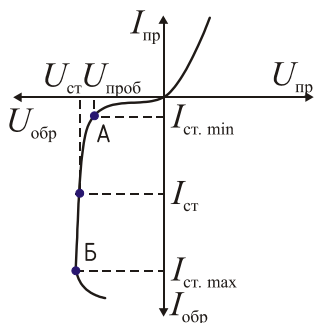
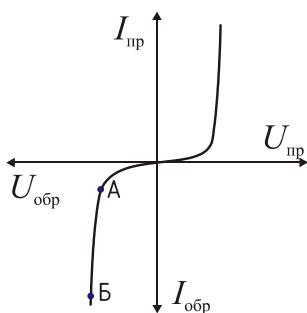


Рисунок 1 – Общий вид ВАХ стабилизатора Рисунок 2 – Рабочая область ВАХ стабилизатора

1.2 Параметры стабилизаторов

Стабилизаторы характеризуются следующими параметрами: *напряжение стабилизации* $U_{ст}$ – напряжение на стабилизаторе при заданном токе (от нескольких вольт до десятков вольт); *минимально допустимый ток стабилизации* $I_{ст. min}$ – ток, при котором пробой становится устойчивым и обеспечивается заданная надежность работы (от долей миллиампер до десятков миллиампер); *максимально допустимый ток стабилизации* $I_{ст. max}$ – ток, при котором достигается *максимально допустимая рассеиваемая мощность* P_{max} (от нескольких миллиампер до нескольких ампер); *статическое сопротивление* $r = U_{ст} / I_{ст}$; *дифференциальное сопротивление* $r_{ст} = dU_{ст} / dI_{ст}$ – отношение изменения напряжения стабилизации к вызвавшему его изменению тока (дифференциальное сопротивление характеризует качество стабилизации: чем меньше значение $r_{ст}$, тем лучше стабилизация напряжения; значения лежат в пределах от долей ом до тысячи ом); *температурный коэффициент стабилизации напряжения* (ТКН), определяемый отношением относительного изменения напряжения стабилизации ($\Delta U_{ст} / U_{ст}$) к абсолютному изменению температуры окружающей среды ($\Delta T_{окр}$) при постоянном токе стабилизации:

$$\alpha_{U_{ст}} = \frac{\Delta U_{ст}}{U_{ст} \Delta T_{окр}} 100 \% . \quad (1)$$

У стабилизаторов с лавинным пробоем ТКН положительный, а с туннельным – отрицательный. Для выпускаемых промышленностью стабилизаторов значение ТКН колеблется от 0,001 до 0,2 % K^{-1} .

Так как реальная ВАХ в области пробоя имеет некоторый наклон, то напряжение стабилизации зависит от тока стабилизации $I_{ст}$. Максимальный ток стабилизации $I_{ст. max}$ ограничен допустимой мощностью рассеяния и

возможностью перехода электрического пробоя в тепловой, который является необратимым. Минимальный ток стабилизации $I_{ст. \min}$ соответствует началу устойчивого электрического пробоя. Не рекомендуется использовать стабилитрон при обратном токе, меньшем по модулю, чем $I_{ст. \min}$, так как стабилизация напряжения при этом будет неудовлетворительной (дифференциальное сопротивление будет чрезмерно большим).

1.3 Исходный материал для стабилитронов

В качестве стабилитрона используются приборы, у которых на ВАХ имеется участок со слабой зависимостью напряжения от проходящего тока. Такой участок наблюдается на обратной ветви ВАХ кремниевого диода в режиме лавинного или туннельного пробоя, поэтому в качестве полупроводниковых стабилитронов используются исключительно кремниевые диоды.

Как было показано, ВАХ полупроводниковых диодов в области электрического пробоя имеет участок, который может быть использован для стабилизации напряжения. Такой участок у кремниевых плоскостных диодов соответствует изменениям обратного тока в широких пределах. При этом до наступления пробоя обратный ток очень мал, а в режиме пробоя, то есть в режиме стабилизации, он становится такого же порядка, как и прямой ток. При этом является маловероятным наступление теплового пробоя.

Кроме того, кремниевые стабилитроны могут быть изготовлены на малые напряжения (единицы вольт), а именно такие нужны для питания многих транзисторных устройств.

2 Стабисторы

Разновидностью стабилитронов являются *стабисторы*. В этих диодах для стабилизации низких напряжений (до 1 В) используется прямая ветвь ВАХ. Особенность стабисторов – отрицательный ТКН, то есть напряжение стабилизации с повышением температуры уменьшается, поэтому стабисторы применяются также в качестве термокомпенсирующих элементов, соединяя их последовательно с обычными стабилитронами, имеющими положительный ТКН.

Для изготовления стабисторов используется сильнолегированный кремний. Лучшими параметрами обладают стабисторы изготовленные из селена.

3 Схемы включения стабилитрона

Простейшая схема применения стабилитрона представлена на рисунке 3. Нагрузка включена параллельно стабилитрону, поэтому в режиме стабилизации, когда напряжение на стабилитроне почти постоянно, такое же напряжение будет и на нагрузке. Все изменения напряжения источника при его нестабильности почти полностью поглощаются ограничительным резистором $R_{огр}$.

Иногда необходимо получить стабильное напряжение более низкое, чем дает стабилитрон, тогда последовательно с нагрузкой включают добавочный резистор $R_{доб}$ (рисунок 4).

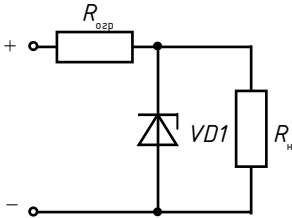


Рисунок 3 – Простейшая схема включения стабилитрона

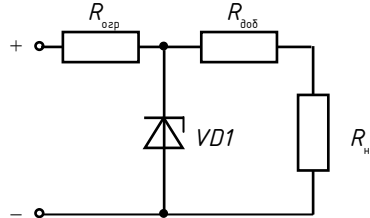


Рисунок 4 – Схема понижения стабильного напряжения на нагрузке

Для уменьшения температурного коэффициента последовательно со стабилитроном включают дополнительный диод (рисунок 5, а). При необходимости обеспечить стабилизацию двухполярных напряжений стабилитроны включают последовательно (рисунок 5, б), а прецизионные (с дополнительными компенсирующими диодами) – параллельно (рисунок 5, в). Кроме того, промышленность выпускает так называемые *симметричные* (двуханодные) стабилитроны, которые обеспечивают стабилизацию и ограничение двухполярных напряжений (рисунок 5, г).

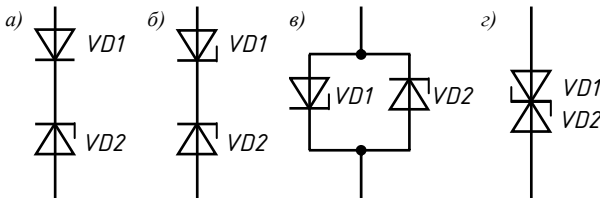


Рисунок 5 – Схемы включения стабилитронов

4 Последовательное и параллельное соединение

Для получения более высоких стабильных напряжений применяется последовательное соединение стабилитронов, рассчитанных на одинаковые токи (рисунок 6). Вследствие разброса характеристик и параметров у отдельных экземпляров стабилитронов данного типа их параллельное соединение с целью получения больших токов не рекомендуется. Оно допускается только при условии, что суммарная мощность, рассеиваемая на всех стабилитронах, не превышает предельной мощности одного стабилитрона.

Для повышения стабильности напряжения может применяться схема каскадного соединения стабилитронов (рисунок 7), в которой стабилитрон $VD1$ должен иметь более высокое напряжение $U_{ст}$, нежели стабилитрон $VD2$.

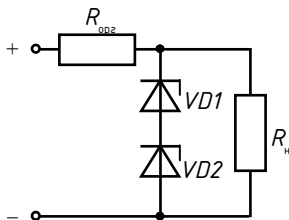


Рисунок 6 – Последовательное соединение стабилитронов

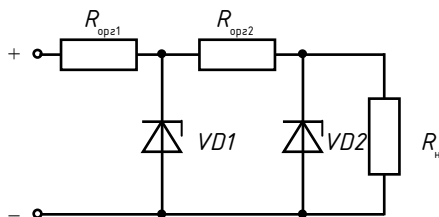


Рисунок 7 – Схема понижения стабильного напряжения на нагрузке

Недостаток рассматриваемых схем стабилизации состоит в том, что потери мощности в самом стабилитроне и на $R_{\text{опр}}$ велики, особенно в схеме каскадного соединения.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1 Изучить теоретические сведения.

2 Ознакомиться с принципиальными электрическими схемами, приведенными на лицевой панели лабораторной установки. При исследовании прямой ветви диода необходимо руководствоваться схемой, приведенной на рисунке 8. При исследовании обратной ветви диода необходимо руководствоваться схемой, приведенной на рисунке 9. Собрать схему исследования следует с помощью короткозамкнутых перемычек (КЗП).

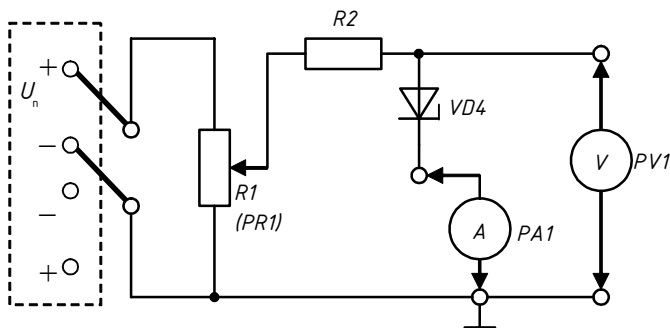


Рисунок 8 – Схема исследования прямой ветви ВАХ стабилитрона

3 Измерительные приборы подготовить к работе в соответствии с инструкциями по эксплуатации, после чего подключить их к макету в соответствии со схемой исследования. При исследовании прямой ветви ВАХ стабилитрона в качестве $PA1$ рекомендуется использовать миллиамперметр (до 100 мА), $PV1$ – вольтметр (до 2 В). При исследовании обратной ветви в качестве $PA1$ использовать миллиамперметр (в начале ветви 10 мкА, в конце – 60 мА), $PV1$ – вольтметр (10 В).

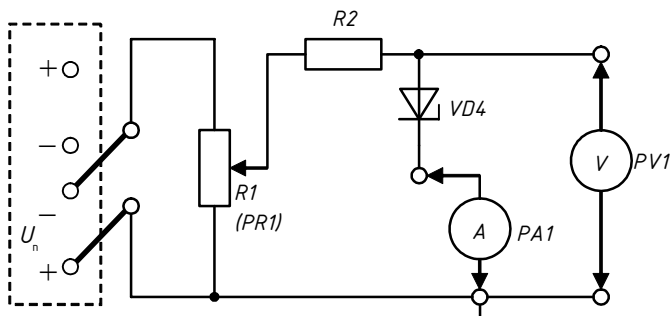


Рисунок 9 – Схема обратной ветви ВАХ стабилитрона

4 Исследовать прямую ветвь ВАХ одиночного стабилитрона ($VD4$).

4.1 Собрать схему исследования согласно рисунку 8 и пп. 2 и 3.

4.2 Вывести потенциометр $R1$ ($PR1$ лабораторной установки) в крайнее левое положение и подать питание на макет.

4.3 Задавая ручкой потенциометра фиксированные значения прямого тока $I_{пр}$ (0, 5, ..., 60 мА), измерить прямое напряжения $U_{пр}$. Полученные данные занести в таблицу 1.

4.4 По окончании измерений установить ручку потенциометра в исходное положение и выключить лабораторную установку.

5 Исследовать обратную ветвь ВАХ стабилитрона.

5.1. Собрать схему исследования согласно рисунку 9 и пп. 2 и 3.

5.2 Вывести потенциометр $R1$ ($PR1$ лабораторной установки) в крайнее левое положение и подать питание на макет.

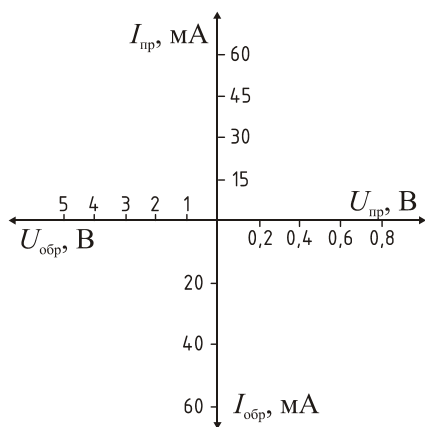


Рисунок 10 – Оси ВАХ стабилитрона

5.3 Задавая ручкой потенциометра фиксированные значения обратного напряжения $U_{обр}$ (0, 0,5, ..., 6 В), измерить значения обратного тока $I_{обр}$. Полученные данные занести в таблицу 1.

5.4 По окончании измерений установить ручку потенциометра в исходное положение и выключить лабораторную установку.

6 Построить ВАХ стабилитрона. Значения и размерность по осям выбрать согласно рисунку 10. На ВАХ отметить основные параметры стабилитрона ($U_{ст}$, $I_{ст}$, $I_{ст. min}$, $I_{ст. max}$).

7 Сравнить экспериментальную ВАХ стабилитрона со справочными

данными (см. приложение А, стабилитрон КС133А).

8 Исследовать прямую ветвь ВАХ двух последовательно соединенных стабилитронов ($VD3$ и $VD4$).

8.1 Собрать схему исследования согласно рисунку 11 и пп. 2 и 3.

8.2 Вывести потенциометр $R1$ ($PR1$ лабораторной установки) в крайнее левое положение и подать питание на макет.

8.3 Задавая ручкой потенциометра фиксированные значения прямого тока $I_{пр}$ (0, 5, ..., 60 мА), измерить прямое напряжения $U_{пр}$. Полученные данные занести в таблицу 1.

8.4 По окончании измерений установить ручку потенциометра в исходное положение и выключить лабораторную установку.

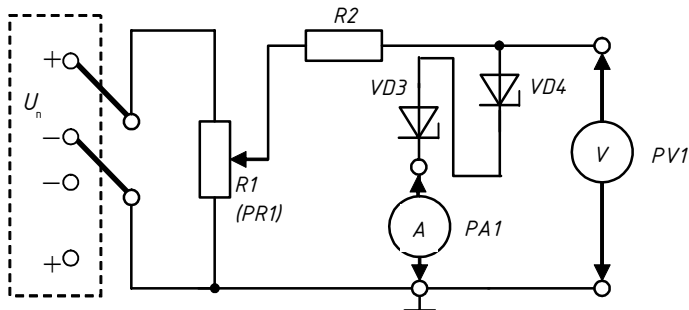


Рисунок 11 – Схема исследования прямой ветви ВАХ последовательно соединенных стабилитронов

9 Исследовать обратную ветвь ВАХ двух последовательно соединенных стабилитронов ($VD3$ и $VD4$).

9.1. Собрать схему исследования согласно рисунку 12 и пп. 2 и 3.

9.2 Вывести потенциометр $R1$ ($PR1$ лабораторной установки) в крайнее левое положение и подать питание на макет.

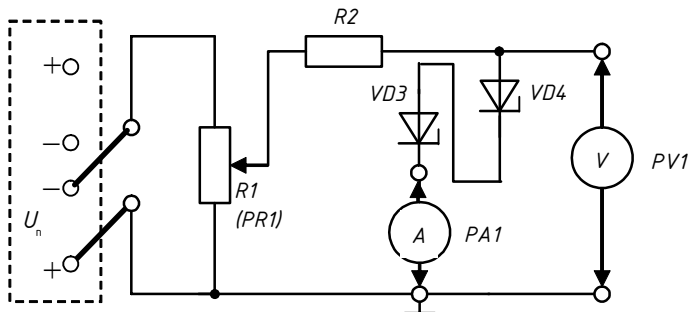


Рисунок 12 – Схема обратной ветви ВАХ последовательно соединенных стабилитронов

9.3 Задавая ручкой потенциометра фиксированные значения обратного напряжения $U_{обр}$ (0, 0,5, ..., 6 В), измерить значения обратного тока $I_{обр}$. Полученные данные занести в таблицу 1.

9.4 По окончании измерений установить ручку потенциометра в исходное положение и выключить лабораторную установку, разобрать схему исследования.

10 Построить ВАХ двух последовательно соединенных стабилитронов ($VD3$ и $VD4$). Построения произвести на одном рисунке с ВАХ стабилитрона $VD4$. На ВАХ отметить основные параметры стабилитрона ($U_{ст}$, $I_{ст}$, $I_{ст. min}$, $I_{ст. max}$).

11 Рассчитать дифференциальные сопротивления исследуемых стабилитронов в обратной ветви (несколько значений), используя ВАХ и таблицу 1. Полученные значения занести в таблицу 2.

12 Построить зависимости дифференциального сопротивления от обратного тока стабилитрона. Сравнить со справочными данными (приложение А, стабилитрон КС133А).

13 Сравнить результаты исследований и расчетов по всем пунктам работы и сделать соответствующие выводы.

Т а б л и ц а 1 – Результаты измерений ВАХ стабилитронов

Результаты измерений для $VD4$				Результаты измерений для $VD3 + VD4$			
Прямая ветвь		Обратная ветвь		Прямая ветвь		Обратная ветвь	
$I_{пр}$, мА	$U_{пр}$, В	$U_{обр}$, В	$I_{обр}$, мкА	$I_{пр}$, мА	$U_{пр}$, В	$U_{обр}$, В	$I_{обр}$, мкА

Т а б л и ц а 2 – Зависимость дифференциального сопротивления от обратного тока

Результаты расчета для $VD4$		Результаты расчета для $VD3 + VD4$	
$I_{обр}$, мкА	$R_{диф\ обр}$, Ом	$I_{обр}$, мкА	$R_{диф\ обр}$, Ом

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 1 Название лабораторной работы.
- 2 Цель лабораторной работы.
- 3 Принципиальная схема исследования прямой и обратной ветвей ВАХ стабилитрона, выполненная согласно требованиям ЕСКД.
- 4 Результаты измерения ВАХ стабилитронов, сведенные в таблицу 1.
- 5 Экспериментальные ВАХ стабилитрона и последовательного соединения стабилитронов, выполненные на одном рисунке (согласно рисунку 10).
- 6 Основные параметры стабилитронов ($U_{ст}$, $I_{ст}$, $I_{ст. min}$, $I_{ст. max}$), согласно ВАХ.
- 7 Результаты расчетов дифференциального сопротивления, сведенные в таблицу 2.
- 8 График зависимости дифференциального сопротивления от обратного тока.
- 9 Классификация и система обозначений полупроводниковых стабилитронов.
- 10 Ответы на контрольные вопросы (по заданию преподавателя).
- 11 Аргументированные выводы по выполненной работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1 Назначение стабилизатора.
- 2 Классификация стабилизаторов.
- 3 Что такое стабилизация напряжения?
- 4 Принцип действия стабилизатора.
- 5 ВАХ стабилизатора.
- 6 Что такое пробой $p-n$ -перехода?
- 7 Что представляет собой электрический пробой?
- 8 Виды электрического пробоя.
- 9 При каких значениях обратного напряжения происходят туннельный и лавинный пробой?
- 10 Почему германиевые диоды не используются в качестве стабилизаторов?
- 11 Основные параметры стабилизаторов.
- 12 Почему среди параметров стабилизаторов обязательно указываются $I_{ст\ min}$, $I_{ст\ max}$?
- 13 Что произойдет со стабилизатором, если обратный ток превысит $I_{ст\ max}$?
- 14 Почему не рекомендуется использовать стабилизатор при токе меньше $I_{ст\ min}$?
- 15 Что показывает дифференциальное сопротивление стабилизатора?
- 16 Влияние температуры на стабилизацию напряжения.
- 17 Назначение и особенности стабилитрона.
- 18 Область применения симметричного стабилизатора.
- 19 Простейшая схема включения стабилизатора.
- 20 Почему в простейшей схеме включения стабилизатора напряжение на нагрузке определяется напряжением на стабилизаторе?
- 21 В каком направлении (прямом или обратном) включают стабилизатор? Почему?
- 22 Как получить стабилизацию для более низкого напряжения, чем напряжение стабилизации стабилизатора?
- 22 Последовательное соединение стабилизаторов. Назначение и недостатки.
- 23 Каскадное соединение стабилизаторов. Назначение и недостатки.
- 24 Что показывает ТХН стабилизатора (объяснить на примере КС133А)?
- 25 ВАХ последовательно соединенных стабилизаторов.
- 26 Возможно ли использовать выпрямительный диод в качестве стабилизатора напряжения?
- 27 Возможно ли использовать стабилизатор для выпрямления напряжения?

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОПОЛУПЕРИОДНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Цель работы: экспериментальное исследование и анализ схемы однополупериодного выпрямителя.

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

Питание электронной аппаратуры осуществляется в основном от источников постоянного тока, которые подключены к электрическим сетям переменного тока. Преобразование электрической энергии осуществляется *электронпреобразовательными устройствами*, которые традиционно принято считать источниками вторичного питания. *Источники вторичного питания (ИВП)* – устройства, предназначенные для преобразования энергии первичного источника электропитания в электрическую

энергию, значения частоты, уровня и стабильности которой согласованы с требованиями, предъявляемыми к этим параметрам конкретными электронными устройствами и системами. В общем случае ИВП состоит из нескольких функционально законченных блоков, все схемотехническое многообразие которых может быть разбито на три основные группы: *устройства согласования частоты*, *устройства согласования уровней напряжения*, *устройства согласования стабильности напряжения*. В свою очередь, устройства согласования частоты в зависимости от вида преобразуемой энергии подразделяются на два основных класса: *выпрямители* – преобразователи напряжения переменного тока в напряжение, содержащее постоянную составляющую (пульсирующее напряжение), и *инверторы* – преобразователи постоянно напряжения в переменное с заданной формой и частотой. Устройства согласования стабильности могут быть разбиты на два основных класса: *сглаживающие фильтры* – устройства, предназначенные для стабилизации мгновенного значения пульсирующего напряжения (тока), и *стабилизаторы* – устройства, стабилизирующие среднее значение выходного напряжения, тока или мощности.

1 Выпрямители

В зависимости от количества фаз питающего переменного напряжения выпрямители бывают *однофазные* и *трехфазные*; по выходной мощности – *маломощные* (единицы киловатт), *средней мощности* (десятки киловатт) и *большой мощности* (свыше ста киловатт).

Выпрямители могут быть построены на управляемых вентилях (тиристоры) и неуправляемых (диодах) и подразделяются на *управляемые (регулируемые)* и *неуправляемые* соответственно.

По форме выпрямленного напряжения выпрямители делятся на *однополупериодные (однотактные)* и *двухполупериодные (двухтактные)*.

1.1 Параметры выпрямителей

Основными параметрами выпрямителей являются:

– среднее значение выходного напряжения $u_{\text{вых}}$

$$U_{\text{cp}} = \frac{1}{T} \int_0^T u_{\text{вых}} dt, \quad (1)$$

где T – период напряжения сети;

– среднее значение выходного тока $i_{\text{вых}}$

$$I_{\text{cp}} = \frac{1}{T} \int_0^T i_{\text{вых}} dt; \quad (2)$$

– коэффициент пульсаций выходного напряжения

$$\varepsilon = \frac{U_{\text{1m}}}{U_{\text{cp}}}, \quad (3)$$

где U_{1m} – амплитуда низшей (основной) гармоники выходного напряжения.

Указанные параметры являются наиболее важными при использовании выпрямителя. При проектировании выпрямителей широко применяются также следующие параметры, характеризующие его внутренние особенности:

- действующее значение $U_{вх}$ входного напряжения выпрямителя;
- максимальное обратное напряжение $U_{обр. max}$ на отдельном диоде. Это напряжение принято выражать через напряжение $U_{ср}$;
- среднее значение $I_{д. ср}$ тока отдельного диода;
- максимальное (амплитудное) значение $I_{д. max}$ тока отдельного вентиля.

Токи $I_{д. ср}$ и $I_{д. max}$ принято выражать через $I_{ср}$. Значение $U_{обр. max}$ используется для выбора вентиля по напряжению. Значения $I_{д. ср}$ и $I_{д. max}$ используются для выбора вентиля по току. Здесь следует иметь в виду, что вследствие малой тепловой инерционности полупроводникового вентиля он может выйти из строя даже в том случае, когда его средний ток $I_{д. ср}$ мал, но велик максимальный ток $I_{д. max}$.

2 Однополупериодный выпрямитель

2.1 Работа схемы однополупериодного выпрямителя

Выпрямитель – это устройство, преобразующее переменное разнополярное напряжение в пульсирующее однополярное. Такое преобразование можно осуществить с помощью одного или нескольких вентилях – приборов с односторонней проводимостью, включенных по определенной схеме.

Поскольку полупроводниковые диоды хорошо проводят ток в прямом направлении и плохо в обратном, то большинство полупроводниковых диодов применяется для выпрямления переменного тока.

Простейшим выпрямителем является схема однофазного однополупериодного выпрямителя (рисунок 1).

Рассмотрим ее работу в предположении, что входное напряжение изменяется по закону $u_{вх} = U_m \sin \omega t$ (графики на рисунке 2 наглядно иллюстрируют процессы в выпрямителе). При положительной полуволне (на интервале $0 < t < T/2$) полупроводниковый диод VD1 смещен в прямом направлении и напряжение, а следовательно, и ток в нагрузочном сопротивлении повторяют форму входного сигнала. При отрицательной полуволне (на интервале $T/2 < t < T$) диод VD1 смещен в обратном направлении и напряжение (ток) в нагрузке равно нулю. Таким образом, через нагрузку проходит пульсирующий ток в виде импульсов, длящихся полпериода и разделенных паузами также в полпериода (см. рисунок 2, б). Этот ток называется *выпрямленным*. Он создает на R_n выпрям-

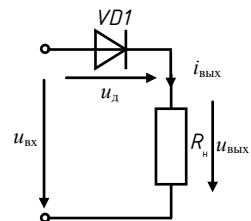


Рисунок 1 – Схема простейшего выпрямителя

ленное напряжение $u_{\text{вх}}$ (см. рисунок 2, а). Как правило, сопротивление нагрузки во много раз больше сопротивления диода, и тогда нелинейностью ВАХ диода можно пренебречь. В этом случае выпрямленный ток $i_{\text{вх}}$ имеет форму импульсов, близкую к полусинусоиде с максимальным значением I_m .

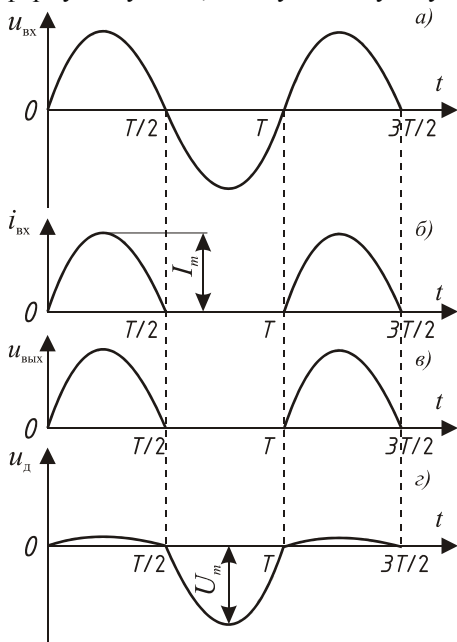


Рисунок 2 – Временные диаграммы работы выпрямителя

График на рисунке 2, а изображает напряжение на диоде. Это напряжение имеет несинусоидальную форму (амплитуды положительных и отрицательных полуволн неодинаковы). Малое значение падения напряжения на диоде при прямом включении объясняется тем, что при прохождении прямого тока большая часть входного напряжения падает на нагрузочном сопротивлении (так как сопротивление нагрузки значительно превышает сопротивление диода). При отрицательной полуволне все входное напряжение приложено к диоду (так как ток в нагрузке равен нулю) и является для него обратным напряжением.

Полезной частью выходного напряжения является его *постоянная составляющая*, или среднее значение $U_{\text{ср}}$. При заданном входном напряжении $u_{\text{вх}} = U_m \sin \omega t$ имеем

$$U_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T u_{\text{вх}} dt = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} U_m \sin \omega t dt = -\frac{U_m}{T} \cos \omega t \Big|_0^{T/2} = \frac{U_m}{\pi}, \quad (4)$$

где U_m – амплитуда входного напряжения. Используя соотношение, связывающее амплитудное U_m и действующее U значения напряжения переменного синусоидального тока $U = U_m / \sqrt{2}$,

$$U_{\text{д.ср}} = \frac{\sqrt{2}U}{\pi} \approx 0,45U. \quad (5)$$

По аналогии, предполагая, что амплитуда выпрямленного тока $I_m = U_m / R_n$, для среднего тока в нагрузочном сопротивлении можно записать

$$I_{\text{ср}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_m \sin \omega t dt = \frac{I_m}{\pi} \approx 0,318I_m. \quad (6)$$

Среднее значение тока отдельного диода $I_{д. ср} = I_{ср}$. Максимальное (амплитудное) значение тока отдельного вентиля $I_{д. max} = \pi I_{ср}$. Максимальное обратное напряжение на диоде $U_{д. обр} = \pi U_{ср}$.

Спектральный состав выпрямленного напряжения, полученный в результате разложения однополупериодных импульсов выпрямленного напряжения (рисунок 2, в) в ряд Фурье, имеет вид

$$u_{\text{вых}} = u_0 + u_1 + u_2 + \dots = \frac{1}{\pi} U_m + \frac{1}{2} U_m \sin \omega t - \frac{2}{3\pi} U_m \sin 2\omega t - \dots, \quad (7)$$

где u_0 – постоянная составляющая выходного (выпрямленного) напряжения; u_1 – первая (основная) гармоника выходного напряжения; u_2 – вторая гармоника выходного напряжения и т. д.

Коэффициент пульсации (3) для рассматриваемой схемы $\varepsilon = U_{1m}/U_{ср} = 1,57$.

Как видно из вышеприведенных расчетов, однополупериодное выпрямление имеет низкую эффективность из-за высокой пульсации выпрямленного напряжения и большое значение обратного напряжения на диоде, а потому находит ограниченное применение (при малых токах).

3 Сглаживающие фильтры

Наличие переменной составляющей в выпрямленном напряжении всегда нежелательно. Для ее уменьшения, то есть для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения, применяют специальные *сглаживающие фильтры*, которые включают между выпрямителем и активной нагрузкой. В основу сглаживающих фильтров заложены реактивные элементы – конденсаторы и дроссели, представляющие соответственно малое и большое сопротивление для переменного тока и, наоборот, большое и малое сопротивление для постоянного тока. При этом конденсаторы включаются в источниках питания параллельно нагрузке R_n , а дроссели – последовательно с ней. В источниках питания применяют четыре основных вида сглаживающих фильтров: емкостной, индуктивный, Г-образный и П-образный, LC-фильтры.

Эффективность действия сглаживающего фильтра оценивают *коэффициентом сглаживания*, равным отношению коэффициентов пульсаций на входе и выходе:

$$q = \varepsilon_{вх}/\varepsilon_{вых}. \quad (8)$$

Следовательно, чем больше коэффициент сглаживания, тем выше качество выпрямления напряжения (оно имеет меньше пульсаций) и тем эффективнее работает фильтр.

Простейшим фильтром является емкостной фильтр (С-фильтр). Он состоит из конденсатора C_f , включаемого параллельно сопротивлению нагрузки (рисунок 3). Работа фильтра основана на способности конденсатора быстро запасать электрическую энергию, а затем относительно медленно отдавать ее в нагрузку.

Включение конденсатора существенно изменяет условия работы диода. Конденсатор хорошо сглаживает пульсации, если его емкость такова, что выполняется условие

$$1/(\omega C_{\phi}) \ll R_n. \quad (9)$$

Значение емкости конденсатора C_{ϕ} для сети с частотой 50 Гц находится в диапазоне от 100 до 30000 мкФ и зависит от тока нагрузки и требуемой степени сглаживания.

В течение некоторой части положительного полупериода, когда напряжение на диоде прямое, через диод проходит ток, заряжающий конденсатор до напряжения, близкого к U_m . В то время, когда ток через диод не проходит, конденсатор разряжается через нагрузку R_n и создает на ней напряжение, которое постепенно снижается. В каждый следующий положительный полупериод конденсатор подзаряжается и его напряжение снова возрастает.

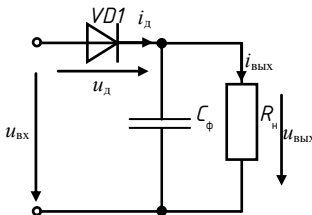


Рисунок 3 – Схема включения емкостного сглаживающего фильтра

Заряд конденсатора через сравнительно малое сопротивление диода происходит быстро. Разряд на большое сопротивление нагрузки совершается гораздо медленнее. Вследствие этого напряжение на конденсаторе и включенной параллельно ему нагрузке пульсует незначительно. Кроме того, конденсатор резко повышает постоянную составляющую выпрямленного напряжения. При отсутствии конденсатора $U_{cp} = 0,318 U_m$, а при наличии конденсатора достаточно большой емкости U_{cp} приближается к U_m и может быть равным $(0,80 - 0,95)U_m$ и даже выше. Таким образом, в однофазном однополупериодном выпрямителе конденсатор повышает выпрямленное напряжение примерно в 3 раза. Чем больше C_{ϕ} и R_n , тем медленнее разряжается конденсатор, тем меньше пульсации и тем ближе U_{cp} к U_m . Если нагрузку вообще отключить (режим холостого хода, то есть $R_n = \infty$), то на конденсаторе получается постоянное напряжение без всяких пульсаций, равное U_m .

Работу выпрямителя со сглаживающим конденсатором иллюстрирует рисунок 4, где приведены графики входного и выходного напряжений (на нагрузке) и тока через диод i_d . Напряжение на конденсаторе приложено плюсом к катоду, минусом к аноду диода. Напряжение на диоде определяется разностью входного напряжения и напряжения конденсатора, так как значение напряжения на конденсаторе близко U_m , напряжение на диоде становится прямым в некоторой части положительного полупериода ($t_1 - t_2$). На этом отрезке времени диод открыт и конденсатор заряжается ($U_c = U_m(1 - \exp(-t/\tau_{зар}))$, где $\tau_{зар} = R_{пр}C_{\phi}$ – постоянная времени заряда, $R_{пр}$ – сопротивление открытого диода). В течение остальной части положительного полупериода и во время отрицательного полупериода напряжение на диоде обратное (отрезок $t_2 \dots t_3$), диод закрыт, источник входного со-

противления отключен от конденсатора и нагрузки, и конденсатор разряжается на нагрузку R_n . Разряд конденсатора характеризуется экспонентой с постоянной времени $\tau_{\text{раз}} = R_n C_{\text{ф}}$: $U_c = U_m \exp(-t/\tau_{\text{раз}})$. Ток через диод протекает только часть полупериода ($t_1 \dots t_2$). Чем короче отрезок $t_1 \dots t_2$, тем больше амплитуда тока диода при заданном среднем токе нагрузки. Если емкость $C_{\text{ф}}$ достаточно велика, то отрезок $t_1 \dots t_2$ оказывается очень малым, амплитуда тока диода очень большой, и диод может выйти из строя, поэтому применение такой схемы возможно только в маломощных выпрямителях.

Максимальное обратное напряжение на диоде получается при отрицательной амплитуде входного напряжения, то есть при $-U_m$. Так как напряжение конденсатора также близко к U_m , то наибольшее значение обратного напряжения на диоде близко к значению $2U_m$. При холостом ходе максимальное обратное напряжение точно равно $2U_m$. Таким образом, наличие конденсатора удваивает обратное напряжение, поэтому диод подбирается так, чтобы он выдерживал это обратное напряжение.

Необходимо отметить, что является опасным короткое замыкание нагрузки (например, при пробое конденсатора сглаживающего фильтра). Все входное напряжение будет приложено к диоду и ток станет недопустимо большим. Произойдет тепловое разрушение диода.

Повышение температуры, несмотря на уменьшения сопротивления диода, не сказывается на работе выпрямителя. Дело в том, что прямой ток определяется сопротивлением нагрузки (во много раз большим, чем сопротивление диода при прямом включении). Сопротивление при обратном включении диода остается достаточно большим по сравнению с сопротивлением нагрузки, поэтому обратный ток остается незначительным по сравнению с прямым.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

- 1 Изучить теоретические сведения.
- 2 Ознакомиться с принципиальной электрической схемой, приведенной на лицевой панели лабораторной установки. Собрать схему исследования (рисунок 5) с помощью КЗП. С разрешения преподавателя включить установку тумблером «СЕТЬ».

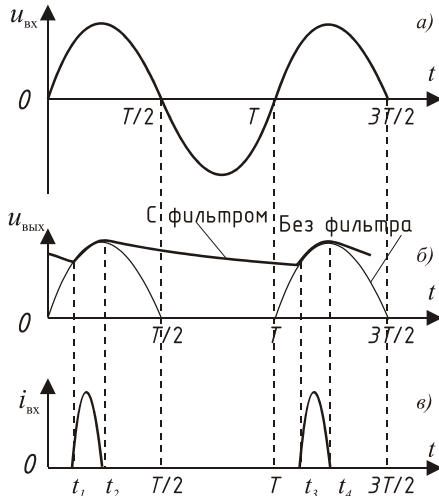


Рисунок 4 – Временные диаграммы работы выпрямителя со сглаживающим фильтром

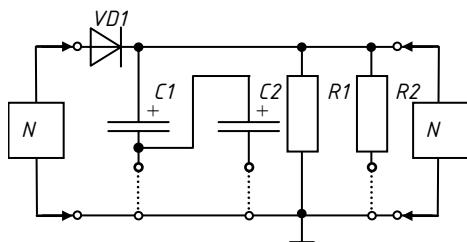


Рисунок 5 – Схема исследования однополупериодного выпрямителя

3 Исследовать однополупериодный выпрямитель без сглаживающего фильтра.

3.1 Подключить осциллограф на вход схемы исследования для наблюдения формы входного напряжения $U_{вх}$ (при снятии осциллограмм следует получить устойчивое изображение двух периодов входного напряжения, максимально используя площадь экрана

осциллографа). Зарисовать осциллограмму входного напряжения. Указать амплитуду и период входного напряжения на графике (рисунок 6).

3.2 Подключить осциллограф на выход схемы исследования для наблюдения формы выходного напряжения $U_{вых. R1}$. Зарисовать осциллограмму выходного напряжения. Измерить амплитуду и период выходного напряжения и указать полученные значения и значение сопротивления нагрузки на графике.

3.3 Рассчитать значение $U_{ср}$ по формуле (1) и отметить на графике.

3.4 Рассчитать коэффициент пульсаций ϵ выходного напряжения по формуле (3).

4 Исследовать однополупериодный выпрямитель с емкостным сглаживающим фильтром.

4.1 С помощью КЗП подключить конденсатор $C1$. Зарисовать осциллограмму выходного напряжения $U_{вых. C1+R1}$. Определить амплитуду выходного напряжения, время заряда $t_{зар}$ и разряда $t_{раз}$ и номинал конденсатора $C1$. Указать полученные значения на графике.

4.2 Определить значение $U_{ср}$ и отметить на графике.

4.3 Рассчитать коэффициент пульсаций ϵ выходного напряжения при подключении конденсатора $C1$.

4.4 Сравнить полученное значение с рассчитанным в подп. 3.4. Сделать вывод о влиянии емкости фильтра на работу выпрямителя.

4.5 Рассчитать коэффициент сглаживания емкостного фильтра q по формуле (8). Значение $\epsilon_{вх}$ взять из подп. 3.4.

4.6 Проверить выполнение условия качественного сглаживания емкостного фильтра согласно формуле (9).

4.7 Изменить величины нагрузки. Для этого при включенном конденсаторе $C1$ параллельно резистору $R1$ с помощью КЗП подключить $R2$.

4.8 Зарисовать осциллограмму выходного напряжения $U_{вых. C1+R1+R2}$. Определить амплитуду выходного напряжения, время заряда $t_{зар}$ и разряда $t_{раз}$ и значение сопротивления нагрузки $1/R_n = 1/R1+1/R2$. Указать полученные значения на графике (см. рисунок 6).

4.9 Определить значение $U_{ср}$ и отметить на графике.

4.10 Рассчитать коэффициент пульсаций ϵ выходного напряжения. Сравнить полученное значение с рассчитанным в подп. 4.3. Сделать вывод о влиянии изменения сопротивления нагрузки на работу выпрямителя.

4.11 Рассчитать коэффициент сглаживания емкостного фильтра q . Сравнить полученное значение с рассчитанным в подп. 4.4. Отключить сопротивление R_2 .

4.12 Изменить величину емкости сглаживающего фильтра. Для этого последовательно с конденсатором C_1 подключить конденсатор C_2 с помощью КЗП.

4.13 Зарисовать осциллограмму выходного напряжения $U_{\text{вых. } CI+C_2+RI}$. Определить амплитуду выходного напряжения, время заряда $t_{\text{зар}}$ и заряда $t_{\text{раз}}$ и значение емкости $1/C = 1/CI + 1/C_2$. Указать полученные значения на графике.

4.14 Определить значение $U_{\text{ср}}$ и отметить на графике.

4.15 Рассчитать коэффициент пульсаций ϵ выходного напряжения при подключении конденсатора C_2 . Сравнить полученное значение с рассчитанным в подп. 4.3 и 4.10. Сделать вывод о влиянии емкости фильтра на работу выпрямителя.

4.16 Рассчитать коэффициент сглаживания емкостного фильтра q . Сравнить полученное значение с рассчитанным в подп. 4.4 и 4.11. Сделать вывод.

4.17 Проверить выполнение условия качественного сглаживания емкостного фильтра согласно формуле (9).

5 Выключить питание макета и разобрать схему исследования.

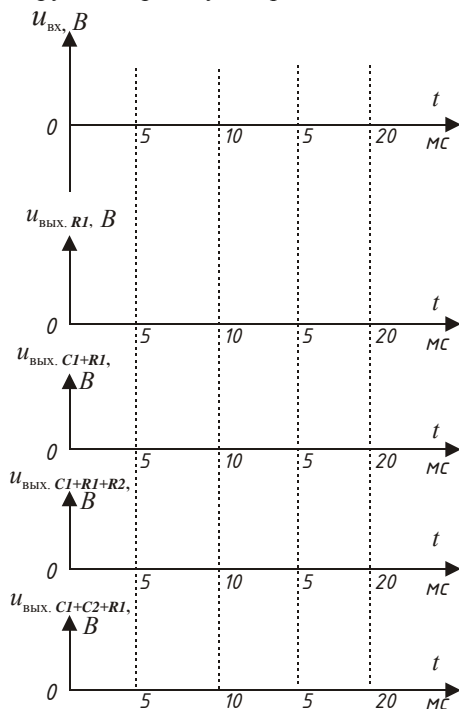


Рисунок 6 – Оси для осциллограмм исследований

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 1 Название лабораторной работы.
- 2 Цель лабораторной работы.
- 3 Принципиальная схема однополупериодного однофазного выпрямителя со сглаживающим фильтром и нагрузочным резистором, выполненная согласно требованиям ЕСКД.

4 Осциллограммы исследований (согласно рисунку 6) с приведенными значениями измеренных величин и номиналами элементов.

5 Описание принципа работы однополупериодного выпрямителя без и с емкостным фильтром.

6 Основные параметры выпрямителя (U_{cp} , U_{1m} , $U_{обр. max}$, ε , q) для каждого варианта исследования.

7 Расчет выполнения условия качественного сглаживания емкостного фильтра согласно формуле (9).

8 Ответы на контрольные вопросы (по заданию преподавателя).

9 Аргументированные выводы по выполненной работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1 Назначение выпрямителя.
- 2 Классификация выпрямителей.
- 3 Чем обусловлено использование диодов в качестве элементов выпрямителя?
- 4 Основные параметры выпрямителей.
- 5 Дополнительные параметры выпрямителей.
- 6 Простейшая схема выпрямителя. Принцип работы.
- 7 Недостатки однополупериодного выпрямителя.
- 8 Выходное напряжение выпрямителя. Состав, полезная составляющая, пульсации.
- 9 Что определяет коэффициент пульсаций?
- 10 На какое значение обратного напряжения должен быть рассчитан диод для однополупериодного выпрямителя? Почему?
- 11 Назначение сглаживающих фильтров.
- 12 Основные виды сглаживающих фильтров.
- 13 Принцип включения сглаживающих фильтров.
- 14 Как оценивают эффективность действия сглаживающего фильтра?
- 15 Работа однополупериодного выпрямителя с емкостным фильтром.
- 16 Как влияет изменение емкости фильтра на работу однополупериодного выпрямителя?
- 17 Как влияет изменение сопротивления нагрузки на работу однополупериодного выпрямителя?
- 18 На какое значение обратного напряжения должен быть рассчитан диод для однополупериодного выпрямителя с емкостным фильтром? Почему?
- 19 Может ли стабилитрон применяться для выпрямления переменного напряжения?
- 20 Возможно ли использовать диод Шоттки для выпрямления напряжения?
- 21 Влияние частоты входного сигнала на работу выпрямителя.
- 22 Почему возможно применение конденсатора в качестве сглаживающего фильтра?

Лабораторная работа № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХПОЛУПЕРИОДНОГО (МОСТОВОГО) ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Цель работы: экспериментальное исследование и анализ схемы однофазного двухполупериодного выпрямителя.

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

Однофазный мостовой выпрямитель (рисунок 1) содержит четыре диода $VD1$ – $VD4$, соединенных по схеме моста. В одну диагональ моста включено сетевое напряжение, а в другую – нагрузка R_n . Положительным полюсом нагрузки является общая точка соединения катодов диода, отрицательным – точка соединения анодов. Принцип действия выпрямителя, работающего на активную нагрузку, поясняют временные диаграммы (рисунок 2).

Диоды в схеме проводят ток парами поочередно. В положительном полупериоде синусоидального входного напряжения, когда в точке 1 положительный, а в точке 2 отрицательный потенциал, ток протекает через диод $VD1$, сопротивление нагрузки R_n и диод $VD3$. Диоды $VD2$ и $VD4$ в этот момент ток не пропускают и находятся под обратным напряжением. Во второй полупериод, когда точка 1 находится под отрицательным потенциалом, а точка 2 под положительным, ток протекает через диод $VD2$, сопротивление нагрузки R_n и диод $VD4$. Диоды $VD2$ и $VD4$ в этот момент ток не пропускают. Таким образом, токи, текущие через нагрузку R_n в разные полупериоды входного напряжения, совпадают по направлению.

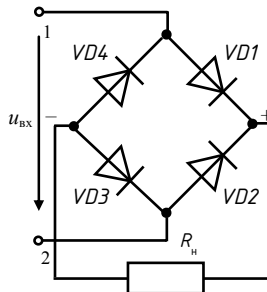


Рисунок 1 – Мостовой выпрямитель

Основные параметры выпрямителя следующие:

– среднее значение выходного напряжения $u_{\text{вых}}$

$$U_{\text{cp}} = \frac{1}{T} \int_0^T u_{\text{вых}} dt = \frac{1}{T} \int_0^T U_m \sin \omega t dt = -\frac{U_m}{\omega T} \cos \omega t \Big|_0^T = \frac{2U_m}{\pi} \approx 0,9U; \quad (1)$$

– среднее значение выходного тока $i_{\text{вых}}$

$$I_{\text{cp}} = \frac{2I_m}{\pi} \approx 0,9I. \quad (2)$$

Среднее значение тока отдельного диода $I_{\text{д. ср}} = I_{\text{cp}}/2$. Максимальное (амплитудное) значение тока отдельного вентиля $I_{\text{д. max}} = \pi I_{\text{cp}}/2$. Максимальное обратное напряжение на диоде $U_{\text{д. обр}} = \pi U_{\text{cp}}/2$.

Спектральный состав выпрямленного напряжения, полученный в результате разложения двухполупериодных импульсов выпрямленного напряжения в ряд Фурье,

$$u_{\text{вых}} = u_0 + u_1 + u_2 + \dots = \frac{2}{\pi} U_m - 0,425U_m \sin \omega t - 0,085U_m \sin 2\omega t - \dots, \quad (3)$$

где u_0 – постоянная составляющая выходного (выпрямленного) напряжения, u_1 – первая (основная) гармоника выходного напряжения; u_2 – вторая гармоника выходного напряжения и т. д.

Коэффициент пульсаций выходного напряжения (без фильтра)

$$\varepsilon = \frac{U_{1m}}{U_{cp}} = \frac{2}{n^2 - 1} = 0,67, \quad (4)$$

где n – число последовательно включенных работающих диодов ($n = 2$ для мостовой схемы).

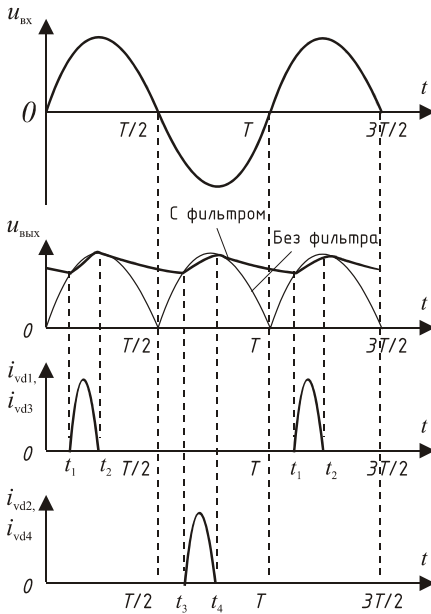


Рисунок 2 – Временные диаграммы работы выпрямителя со сглаживающим фильтром

В двухполупериодной схеме выпрямления по сравнению с однополупериодной лучше используются возможности трансформации и меньше коэффициент пульсаций.

Следует отметить, что однофазная мостовая схема может быть непосредственно (то есть без применения трансформатора) включена в цепь переменного тока, если напряжение сети обеспечивает требуемое значение выпрямленного напряжения, что является достоинством этой схемы. Мостовая схема имеет низкое выходное сопротивление. Еще одним достоинством этой схемы является то, что диоды могут быть рассчитаны на вдвое меньшее обратное напряжение.

Недостаток мостовой схемы – необходимо большее количество диодов (четыре), а также повышенное (вдвое по сравнению с однополупериодной схемой) падение напряжения на диодах.

С мостовыми выпрямителями применяют также и сглаживающие фильтры (см. лабораторную работу № 3). Основное отличие от однополупериодного выпрямителя состоит в том, что работа сглаживающего конденсатора (заряд–разряд) происходит в течение одного полупериода.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

- 1 Изучить теоретические сведения.
- 2 Ознакомиться с принципиальной электрической схемой, приведенной на лицевой панели лабораторной установки. Собрать схему исследования (рисунок 3) с помощью КЗП. С разрешения преподавателя включить установку тумблером «СЕТЬ».
- 3 Исследовать однополупериодный выпрямитель без сглаживающего фильтра.

3.1 Подключить осциллограф на вход схемы исследования для наблюдения формы входного напряжения $U_{вх}$ (при снятии осциллограмм следует получить устойчивое изображение двух периодов входного напряжения, максимально используя площадь экрана осциллографа). Зарисовать осциллограмму входного напряжения. Измерить амплитуду и период входного напряжения и указать полученные значения на графике (рисунок 4).

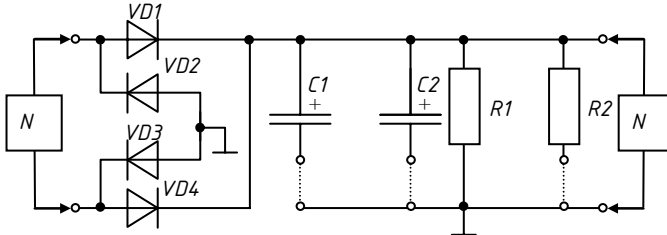


Рисунок 3 – Схема исследования мостового выпрямителя

3.2 Подключить осциллограф на выход схемы исследования для наблюдения формы выходного напряжения $U_{вых. R1}$. Зарисовать осциллограмму выходного напряжения. Измерить амплитуду и период выходного напряжения и указать полученные значения и значение сопротивления нагрузки на графике.

3.3 Рассчитать значение $U_{ср}$ и отметить на графике.

3.4 Рассчитать коэффициент пульсаций ϵ выходного напряжения.

4 Исследовать однополупериодный выпрямитель с емкостным сглаживающим фильтром.

4.1 С помощью КЗП подключить конденсатор $C1$. Зарисовать осциллограмму выходного напряжения $U_{вых. C1+R1}$. Определить амплитуду выходного напряжения, время заряда $t_{зар}$ и разряда $t_{раз}$ и номинал конденсатора $C1$. Указать полученные значения на графике.

4.2 Рассчитать значение $U_{ср}$ и отметить на графике.

4.3 Рассчитать коэффициент пульсаций ϵ выходного напряжения при подключении конденсатора $C1$.

4.4 Сравнить полученное значение с рассчитанным в подп. 3.4. Сделать вывод о влиянии емкости фильтра на работу выпрямителя.

4.5 Рассчитать коэффициент сглаживания емкостного фильтра q .

4.6 Проверить выполнение условия качественного сглаживания емкостного фильтра по формуле (9), приведенной в лабораторной работе № 3.

4.8 Изменить величины нагрузки. Для этого при включенном конденсаторе $C1$ параллельно сопротивлению $R1$ с помощью КЗП подключить $R2$.

4.9 Зарисовать осциллограмму выходного напряжения $U_{вых. C1+R1+R2}$. Определить амплитуду выходного напряжения, время заряда $t_{зар}$ и разряда $t_{раз}$ и номинал сопротивления нагрузки $1/R_n = 1/R1 + 1/R2$. Указать полученные значения на графике.

4.10 Определить значение $U_{\text{ср}}$ и отметить на графике.

4.11 Рассчитать коэффициент пульсаций ϵ выходного напряжения. Сравнить полученное значение с рассчитанным в подп. 4.4. Сделать вывод о влиянии изменения сопротивления нагрузки на работу выпрямителя.

4.12 Рассчитать коэффициент сглаживания емкостного фильтра q . Сравнить полученное значение с рассчитанным в подп. 4.5. Сделать вывод.

4.13 Отключить сопротивление R_2 .

4.14 Изменить величину емкости сглаживающего фильтра. Для этого параллельно конденсатору C_1 подключить конденсатор C_2 с помощью КЗП.

4.15 Зарисовать осциллограмму выходного напряжения $U_{\text{вых. } C_1+C_2+R_1}$. Определить амплитуду выходного напряжения, время заряда $t_{\text{зар}}$ и разряда $t_{\text{раз}}$ и значение емкости $C' = C_1 + C_2$. Указать полученные значения на графике.

4.16 Определить значение $U_{\text{ср}}$ и отметить на графике.

4.17 Рассчитать коэффициент пульсаций ϵ выходного напряжения при подключении конденсатора C_2 . Сравнить полученное значение с рассчитанным в подп. 4.4. Сделать вывод.

4.18 Рассчитать коэффициент сглаживания емкостного фильтра q . Сравнить полученное значение с рассчитанным в подп. 4.5. Сделать вывод.

4.19 Проверить выполнение условия качественного сглаживания емкостного фильтра (формула (9) лабораторной работы № 3).

5 Выключить питание макета и разобрать схему исследования.

6 Сравнить результаты исследований мостового выпрямителя с результатами исследования однополупериодного выпрямителя. Сделать выводы по соответствующим пунктам исследований.

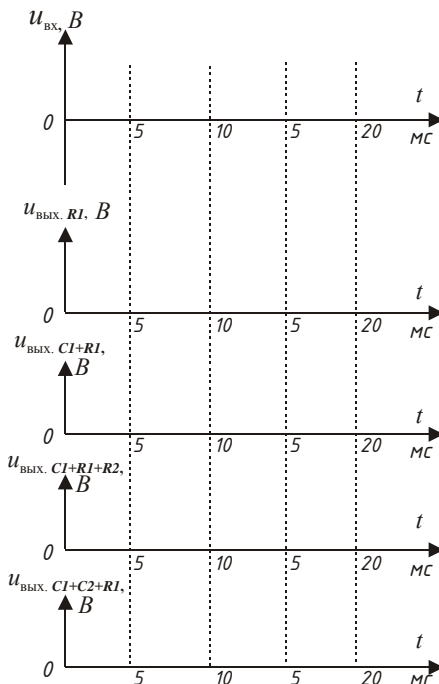


Рисунок 4 – Оси для осциллограмм исследований

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1 Название лабораторной работы.

2 Цель лабораторной работы.

3 Принципиальная схема мостового выпрямителя со сглаживающим фильтром и нагрузочным сопротивлением, выполненная согласно требованиям ЕСКД.

4 Осциллограммы исследований (согласно рисунку 4) с приведенными значениями измеренных величин и номиналами элементов.

5 Описание принципа работы мостового выпрямителя без и с емкостным фильтром.

6 Основные параметры выпрямителя (U_{cp} , U_{1m} , $U_{обр. max}$, ε , q) для каждого варианта исследования.

7 Расчет условия качественного сглаживания емкостного фильтра.

8 Ответы на контрольные вопросы (по заданию преподавателя)

9 Аргументированные выводы по выполненной работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1 Назначение мостового выпрямителя.
- 2 Принцип работы мостового выпрямителя.
- 3 Основные и дополнительные параметры мостового выпрямителя.
- 4 Достоинства и недостатки мостового выпрямителя.
- 5 Чем обусловлено использование диодов в качестве элементов выпрямителя?
- 6 На какое значение обратного напряжения должен быть рассчитан каждый диод мостового выпрямителя без емкостного фильтра? Почему?
- 7 На какое значение обратного напряжения должен быть рассчитан каждый диод мостового выпрямителя с емкостного фильтра? Почему?
- 8 Что произойдет с работой мостового выпрямителя, если один из диодов будет пробит?
- 9 Что произойдет с работой мостового выпрямителя, если один из диодов отключить?
- 10 Что произойдет с работой мостового выпрямителя, если закоротить емкостный фильтр?
- 11 Как влияет изменение емкости фильтра на работу мостового выпрямителя?
- 12 Как влияет изменение сопротивления нагрузки на работу мостового выпрямителя?
- 13 Возможно ли использовать в качестве выпрямляющего элемента стабилитрон?
- 14 Влияние частоты входного сигнала на работу выпрямителя без сглаживающего фильтра.
- 15 Как повлияет увеличение частоты входного сопротивления на работу емкостного сглаживающего фильтра?
- 16 Как изменится коэффициент пульсаций в схеме с емкостным фильтром, если сопротивление нагрузки уменьшится?
- 17 Достоинства и недостатки емкостных сглаживающих фильтров.
- 18 Отличия в подключении емкостных и индуктивных сглаживающих фильтров.
- 19 Какой из выпрямителей (мостовой или простейший однополупериодный) предпочтительно использовать?
- 20 Почему мостовой выпрямитель называется двухполупериодным?
- 21 Как отражается на работе выпрямителя тот факт, что диоды не идеальны?
- 22 Что называется коэффициентом пульсаций и коэффициентом сглаживания фильтра?
- 23 Почему при подключении конденсатора $C2$ происходит уменьшение пульсаций?
- 24 Почему при подключении резистора $R2$ происходит увеличение пульсаций?
- 25 При каких значениях емкости сглаживающего фильтра и сопротивления нагрузки пульсации на выходе мостового выпрямителя будут отсутствовать?

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СТАБИЛИЗАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

Цель работы: экспериментальное исследование и анализ схемы параметрического стабилизатора напряжения, выполненного на стабилитроне.

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

1 Общие сведения

Качество работы электронной схемы в значительной степени определяется стабильностью источников питания. Напряжение питания должно оставаться постоянным при колебаниях напряжения и частоты сети, изменениях нагрузки, а также при колебаниях температуры, влажности и давления окружающей среды и т. д. Для обеспечения постоянства напряжения на сопротивлении нагрузки применяют стабилизаторы напряжения. Для этого между выпрямителем и сопротивлением нагрузки (при стабилизации постоянного напряжения) включают стабилизатор напряжения. При стабилизации переменного напряжения стабилизатор включают между источником переменного тока и выпрямителем.

Существующие стабилизаторы могут быть разделены на два класса: параметрические и компенсационные. В *параметрических стабилизаторах* стабилизация напряжения основана на нелинейной зависимости между током и напряжением, благодаря чему напряжение остается постоянным при изменении тока в некотором диапазоне его значений. Примером такого стабилизатора является устройство, выполненное на основе стабилитрона.

В *компенсационных стабилизаторах* автоматическая стабилизация напряжения достигается с помощью устройства, контролирующего уровень выходного напряжения. При изменении выходного напряжения вступает в действие регулирующий элемент, восстанавливающий заданное значение напряжения на выходе.

В зависимости от стабилизируемой электрической величины различают *стабилизаторы напряжения, тока или мощности*.

Основными показателями работы стабилизаторов являются:

1 *Коэффициент стабилизации* – отношение относительного изменения напряжения на входе к соответствующему относительному изменению напряжения на выходе стабилизатора. Чем больше коэффициент стабилизации, тем меньше изменяется выходное напряжение при изменении входного. У простейших стабилизаторов величина $K_{U_{ст}}$ составляет единицы, у более сложных – сотни и тысячи.

$$K_{U_{\text{ст}}} = \frac{\Delta U_{\text{вх}} / U_{\text{вх}}}{\Delta U_{\text{вых}} / U_{\text{вых}}} . \quad (1)$$

2 *Выходное сопротивление* стабилизатора, характеризующее изменение выходного напряжения $\Delta U_{\text{вых}}$ при изменении тока нагрузки $\Delta I_{\text{вых}}$,

$$R_{\text{вых}} = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta I_{\text{вых}}} . \quad (2)$$

Выходное сопротивление стабилизатора является величиной, аналогичной выходному сопротивлению выпрямителя с фильтром. Чем меньше выходное сопротивление, тем меньше изменяется выходное напряжение при изменении тока нагрузки. У простейших стабилизаторов величина $R_{\text{вых}}$ составляет единицы ом, а у более совершенных – сотые и тысячи доли ом. Необходимо отметить, что стабилизатор напряжения обычно резко уменьшает пульсации напряжения.

3 *Коэффициент полезного действия* (КПД) $\eta_{\text{ст}}$ – отношение мощности, отдаваемой в нагрузку $P_{\text{н}}$, к мощности, потребляемой от входного источника напряжения $P_{\text{вх}}$,

$$\eta_{\text{ст}} = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{вх}}} . \quad (3)$$

4 *Дрейф* (допустимая нестабильность) выходного постоянного напряжения.

2 Параметрический стабилизатор напряжения

Наибольшее распространение получили стабилизаторы постоянного напряжения. Основные их преимущества – простота конструкций, небольшое количество элементов и высокая надежность, а недостатки – низкие коэффициенты стабилизации (менее 25) и КПД, малые токи стабилизации, а также узкий и нерегулируемый диапазон стабилизируемого напряжения.

Простейшая схема параметрического стабилизатора напряжения, выполненного на стабилитроне, приведена на рисунке 1. Схема содержит балластное (ограничительное) сопротивление $R_{\text{б}}$ (это сопротивление является функционально необходимым элементом), сопротивление нагрузки $R_{\text{н}}$ и полупроводниковый стабилитрон VDI . Нагрузка подключена параллельно стабилитрону, поэтому в режиме стабилизации, когда напряжение на стабилитроне почти постоянное, такое же напряжение будет и на нагрузке. Все

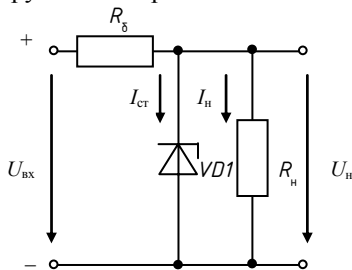


Рисунок 1 – Простейшая схема включения стабилитрона

изменения напряжения источника при его нестабильности почти полностью поглощаются балластным сопротивлением.

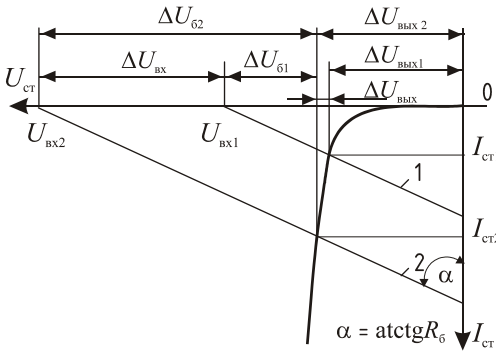


Рисунок 2 – Пояснение работы стабилизатора напряжения

описывающее положение балластного сопротивления $R_б$ (линия 1), запишется следующим образом: $U_{вх1} = U_{вых1} + I_{ст1} R_б$. Если входное напряжение увеличится на величину $\Delta U_{вх}$ и станет равным $U_{вх2}$, то характеристика балластного сопротивления займет положение линии 2, что соответствует выходному напряжению $U_{вых2}$ и току стабилизации $I_{ст2}$. Как видно из рисунка 2, выходное напряжение останется почти неизменным, а приращение входного $\Delta U_{вх}$ выделится на балластном сопротивлении $R_б$. Аналогичная картина будет иметь место при уменьшении входного напряжения (при условии, что это уменьшение не вышло из пределов стабилизации): в этом случае снизится падение напряжения на балластном сопротивлении.

Наиболее часто стабилизатор работает в режиме, когда напряжение источника нестабильно, а сопротивление нагрузки постоянно. Для установления и поддержания правильного режима стабилизации в этом случае сопротивление $R_б$ должно иметь определенное значение. Обычно $R_б$ рассчитывается для средней точки обратной ВАХ стабилизатора. Если напряжение источника $U_{вх}$ изменяется от $U_{вх. \min}$ до $U_{вх. \max}$, то балластное сопротивление можно найти по формуле

$$R_б = (U_{вх. \text{cp}} - U_{ст}) / (I_{ст} + I_н), \quad (4)$$

где $U_{вх. \text{cp}} = 0,5 (U_{вх. \min} + U_{вх. \max})$ – среднее напряжение источника; $I_{ст} = 0,5 (I_{\min} + I_{\max})$ – средний ток стабилизатора; $I_н = U_{ст} / R_н$ – ток нагрузки.

Если напряжение $U_{вх}$ будет изменяться в ту или другую сторону, то будет изменяться ток стабилизатора, но напряжение на нем, а следовательно, и на нагрузке будет почти постоянным. Поскольку все изменения напряжения источника должны поглощаться балластным сопротивлением, то наибольшее изменение этого напряжения, равное $U_{вх. \max} - U_{вх. \min}$, должно соответ-

Принцип действия параметрического стабилизатора постоянного напряжения поясняется путем совместного анализа ВАХ стабилизатора и балластного сопротивления, представленных на рисунке 2. Входное постоянное напряжение схемы равно $U_{вх1}$, а ток стабилизатора составляет $I_{ст1}$. Для упрощения предположим, что нагрузка отключена ($R_н = \infty$). Тогда выражение, аналитически

ствовать наибольшему возможному изменению тока, то есть $I_{\max} - I_{\min}$. Отсюда следует, если значение $U_{\text{вх}}$ изменяется на $\Delta U_{\text{вх}}$, то стабилизация будет осуществляться только при соблюдении условия

$$\Delta U_{\text{вх}} \leq (I_{\max} - I_{\min}) R_6. \quad (5)$$

Стабилизация в более широком диапазоне изменения входного напряжения возможна при увеличении R_6 . Однако из (4) следует, что большее значение балластного сопротивления получается при меньшем значении тока нагрузки $I_{\text{н}}$, т. е. при большем $R_{\text{н}}$. Повышение $E_{\text{ср}}$ также дает увеличение R_6 .

Второй возможный режим стабилизации применяется в том случае, когда $E = \text{const}$, а $R_{\text{н}}$ изменяется в пределах от $R_{\text{н. min}}$ до $R_{\text{н. max}}$. Для такого режима R_6 можно определить по средним значениям токов по формуле

$$R_6 = (E - U_{\text{ср}})/(I_{\text{ср}} + I_{\text{н. ср}}), \quad (6)$$

где $I_{\text{н. ср}} = 0,5 (I_{\text{н. min}} + I_{\text{н. max}})$, причем $I_{\text{н. min}} = U_{\text{ср}}/R_{\text{н. min}}$ и $I_{\text{н. max}} = U_{\text{ср}}/R_{\text{н. max}}$.

Работу схемы в данном режиме можно объяснить следующим образом. Поскольку R_6 постоянно и падение напряжения на нем, равное $E - U_{\text{ср}}$, также постоянно, то и ток в балластном сопротивлении, равный $I_{\text{ср}} + I_{\text{н. ср}}$, должен быть постоянным. Но это является возможным при условии, если ток стабилитрона и ток в нагрузке изменяются в одинаковой степени, но в противоположные стороны. Например, если ток нагрузки увеличивается, то ток стабилитрона на столько же уменьшается, а их сумма остается неизменной.

Таким образом, изменение сопротивления нагрузки при неизменном напряжении источника вызывает изменение тока, проходящего через стабилитрон.

Одной из основных характеристик параметрического стабилизатора напряжения на полупроводниковом стабилитроне является *передаточная характеристика* $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$, представленная на рисунке 3. Рабочим участком этой характеристики является участок от $U_{\text{вх. min}}$ до $U_{\text{вх. max}}$, на котором $U_{\text{н}} = U_{\text{ср}}$.

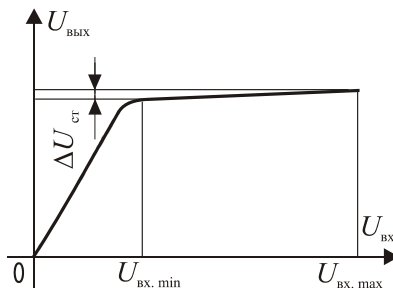


Рисунок 3 – Передаточная характеристика параметрического стабилизатора напряжения

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

- 1 Изучить теоретические сведения.
- 2 Собрать схему параметрического стабилизатора напряжения (рисунок 4).
- 3 Подготовить следующие контрольно-измерительные приборы для измерений: *PV1* – входного напряжения, предел до 20 В; *PV2* – напряжения на сопротивлении нагрузки *R3* (*R2* лабораторной установки),

предел до 20 В; $PA1$ – общего тока, предел до 60 мА; $PA2$ – тока стабилитрона, предел до 200 мА; $PA3$ – тока нагрузки, предел до 1 мА (при использовании в работе одного комбинированного прибора, для обеспечения работы схемы необходимо вместо соответствующих миллиамперметров использовать короткозамкнутые перемычки).

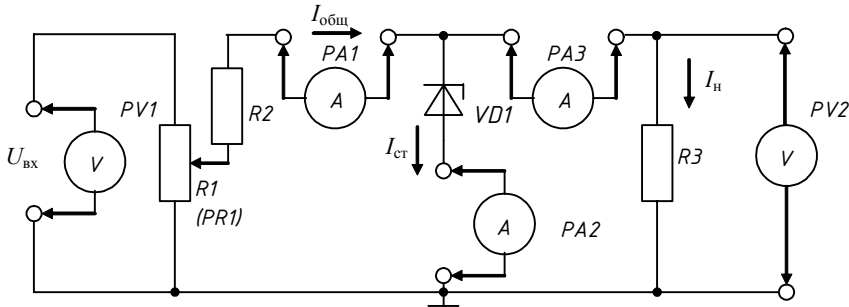


Рисунок 4 – Схема исследования параметрического стабилизатора напряжения

4 Для фиксированных значений входного напряжения $U_{вх}$ (0, 2, ..., 12 В), задаваемых потенциометром $R1$ ($PR1$ лабораторной установки), измерить значения общего тока $I_{общ}$, токов нагрузки $I_н$ и стабилитрона $I_{ст}$, напряжения на нагрузке $U_н$. Результаты измерений занести в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты измерений и расчетов параметрического стабилизатора

$U_{вх}$	$U_н(U_{R3})$	U_{R2}	$I_{общ}$	$I_{ст}$	$I_н$	$P_{ст}$
В			мА			мВт

5 По окончании измерений установить ручку потенциометра в исходное положение и выключить лабораторную установку, и разобрать схему исследования.

6 Рассчитать падение напряжения на балластном сопротивлении $R2$:

$$U_{R2} = U_{вх} - U_н. \quad (7)$$

7 Рассчитать значение мощности, рассеиваемой на стабилитроне:

$$P_{ст} = U_н I_{ст}. \quad (8)$$

8 Полученные значения U_{R2} и $P_{ст}$ занести в таблицу 1.

9 Построить график передаточной характеристики $U_н = f(U_{вх})$, согласно рисунку 5. На графике отметить значения $U_{вх, \min}$, $U_{вх, \max}$ и $\Delta U_{ст}$.

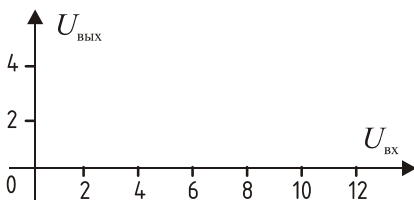


Рисунок 5 – Оси для передаточной характеристики $U_н = f(U_{вх})$

10 Сделать аргументированные выводы о проделанной работе.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 1 Название лабораторной работы.
- 2 Цель лабораторной работы.
- 3 Принципиальная схема параметрического стабилизатора напряжения, выполненная согласно требованиям ЕСКД.
- 4 Результаты измерений и расчетов, сведенные в таблицу 1.
- 5 График передаточной характеристики $U_n = f(U_{вх})$, согласно рисунку 5.
- 6 Ответы на контрольные вопросы (по заданию преподавателя).
- 7 Аргументированные выводы по выполненной работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1 Назначения стабилизатор напряжения.
- 2 Что такое стабилизация напряжения?
- 3 Принцип работы параметрического стабилизатора?
- 4 Принцип работы компенсационного стабилизатора напряжения.
- 5 Основные параметры параметрического стабилизатора напряжения.
- 6 Почему в качестве основного элемента в схеме параметрического стабилизатора напряжения используется стабилитрон?
- 7 Возможно ли использование выпрямительного диода в качестве стабилизирующего элемента? Почему?
- 8 Достоинства и недостатки параметрических стабилизаторов напряжения.
- 9 Простейшая схема параметрического стабилизатора напряжения. Принцип работы при изменении входного напряжения.
- 10 Назначение балластного сопротивления.
- 11 Как получить стабилизацию для более низкого напряжения, чем напряжение стабилизации стабилитрона?
- 12 Как получить стабилизацию для большего напряжения, чем напряжение стабилизации стабилитрона?
- 13 Что показывает коэффициент стабилизации?
- 14 Как повысить коэффициент стабилизации?
- 15 Влияние выходного сопротивления стабилизатора на пульсацию напряжения.
- 16 КПД параметрического стабилизатора напряжения.
- 17 Что выражает передаточная характеристика стабилизатора напряжения?
- 18 Принцип работы стабилизатора напряжения при изменении сопротивления нагрузки.
- 19 Какие элементы с нелинейными ВАХ могут быть использованы в стабилизаторах напряжения?
- 20 Каковы особенности ВАХ, применяемых в стабилизаторах нелинейных элементов?
- 21 Что произойдет с работой стабилизатора напряжения, если балластное сопротивление будет равно нулю, а ток стабилитрона превысит максимальный ток стабилизации?
- 22 Как изменится работа стабилизатора напряжения, если последовательно с существующим стабилитроном включить стабилитрон с такими же параметрами?
- 23 Как осуществляется температурная стабилизация параметрических стабилизаторов напряжения?

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(обязательное)

СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ ПО ДИОДАМ И СТАБИЛИТРОНАМ,
ИСПОЛЗУЕМЫМ В ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТАХ

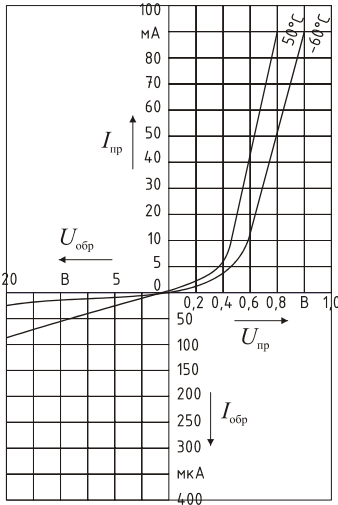


Рисунок А.1 – ВАХ диода Д9Б

Д9Б

Диод германиевый точечный.

Предназначен для работы в качестве детекторов в цепях автоматической регулировки усиления приемников, в качестве видеодетекторов в телевизорах, в качестве модуляторов и преобразователей частоты в счетных схемах, а также в схемах мало-мощных выпрямителей.

Выпускается в стеклянном корпусе и имеет гибкие выводы. Маркируется красным кольцом на части корпуса возле анода. Полярность диодов обозначается красной точкой со стороны плюсового вывода. Масса диода не более 0,3 г.

Электрические параметры

Постоянное прямое напряжение не более 1 В при $I_{пр}=90$ мА.

Постоянный обратный ток при предельном значении обратного напряжения не более 250 мкА.

Вольт-амперная характеристика диода Д9Б приведена на рисунке А.1.

Предельные эксплуатационные данные

Выпрямленный ток (амплитудное значение):

- при температуре от минус 55 и до плюс 25 °С – 125 мА;
- температуре 60 °С – 105 мА.

Средний выпрямленный ток:

- при температуре от минус 55 и до плюс 25 °С – 40 мА;

Обратное напряжение (амплитудное значение):

- при температуре от минус 55 и до плюс 25 °С – 10 В;
- температуре 60 °С – 10 В.

Диапазон рабочих температур окружающей среды:

- при температуре от минус 55 и до плюс 60 °С.

Гарантийная наработка – не менее 8000 ч.

Д226

Диоды кремниевые, диффузионные.

Выпускаются в металлоглазном корпусе с гибкими выводами. Тип диода и схема соединения электродов с выводами приводятся на корпусе.

Масса диода не более 2 г.

Электрические параметры

Среднее прямое напряжение:

при $I_{пр. ср} = 300$ мА и $U_{обр. и} = U_{обр. и. max}$ – не более 1 В.

Средний обратный ток при $U_{обр. и} = U_{обр. и. max}$ и

$I_{пр. ср} = I_{пр. ср. max}$:

при 213 и 298 К – 50 мкА;

398 К – 100 мкА.

ВАХ диода Д226 приведена на рисунке А.2.

Предельные эксплуатационные данные

Импульсное обратное напряжение при температуре до 323 К – 400 В

при 353 К – 300 В.

Амплитудное значение выпрямленного тока перегрузки в течение не менее четырех периодов – 2,5 А.

Частота без снижения режимов – 1 кГц.

Температура окружающей среды – от 213 до 353 К.

Температура корпуса – 358 К.

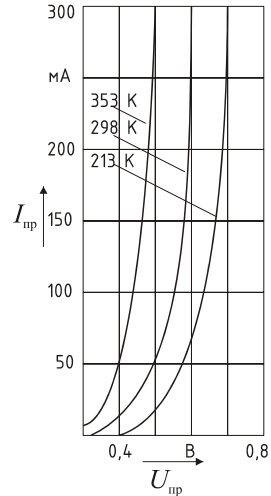


Рисунок А.2 – ВАХ диода Д226 (прямая ветвь)

Д237Б

Диоды кремниевые диффузные.

Выпускаются в металлоглазном корпусе с гибкими выводами. Тип диода и схема соединения электродов с выводами приводятся на корпусе.

Масса диода не более 2 г.

Электрические параметры

Среднее прямое напряжение:

при $I_{пр. ср} = 300$ мА и $U_{обр. и} = U_{обр. и. max}$ – не более 1 В.

Средний обратный ток при $U_{обр. и} = U_{обр. и. max}$ и $I_{пр. ср} = I_{пр. ср. max}$:

при 213 и 298 К – 50 мкА;

398 К – 100 мкА.

ВАХ диода Д237Б приведена на рисунке А.3, зависимость среднего прямого тока диода от частоты – на рисунке А.4.

Предельные эксплуатационные данные

Импульсное обратное напряжение – 400 В

Средний прямой ток при температуре

от 213 и до 323 К– 300 мА;

от 324 и до 358 К– 200 мА;

от 359 и до 398 К– 100 мА.

Импульсный прямой ток при температуре от 213 до 358 К:

одиночные импульсы длительностью не более 10 мс – 10 А;

периодические импульсы длительностью не более 30 мс – 5 А
(время между импульсами не менее 15 мин).

Частота без снижения режимов – 1 кГц.

Температура окружающей среды – от 213 до 398 К.

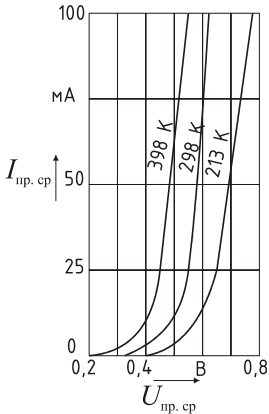


Рисунок А.3 – ВАХ диода Д237Б (прямая ветвь)

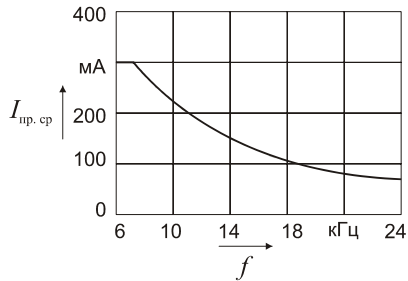


Рисунок А.4 – Зависимость среднего прямого тока диода Д237Б от частоты (прямая ветвь)

КС133А

Стабилитроны кремниевые.

Предназначены для применения в схемах стабилизаторов напряжения и тока, в схемах ограничения импульсов и в качестве источников опорного напряжения.

Стабилитроны выпускаются в металлическом герметичном корпусе со стеклянным изолятором и имеют гибкие выводы. Масса диода не более 1 г.

Электрические параметры

Напряжение стабилизации при $I_{ст ном} = 10$ мА – 3–3,7 В.

Разброс напряжения стабилизации – не более ± 10 %.

Прямое напряжение при $I_{пр} = 50$ мА – не более 1В.

Дифференциальное сопротивление при $I_{ст. ном} = 10 \text{ мА}$ – не более 65 Ом.
 Вольт-амперная характеристика стабилитрона КС133А приведена на рисунке А.5.

Предельные эксплуатационные данные

Максимальный ток стабилизации:

при температуре от минус 55 до плюс 50 – 81 мА;
 температуре до 100 °С – 27 мА.

Минимальный ток стабилизации:

при температуре от минус 55 до плюс 100 °С – 3 мА.

Максимальная рассеиваемая мощность:

при температуре от минус 55 до плюс 50 °С – 300 мВт;
 температуре до 100 °С – 100 мВт.

Диапазон рабочих температур окружающей среды от минус 55 до плюс 100 °С.

Зависимости дифференциального сопротивления от обратного тока и ТКС от напряжения стабилизации приведены на рисунках А.6 и А.7.

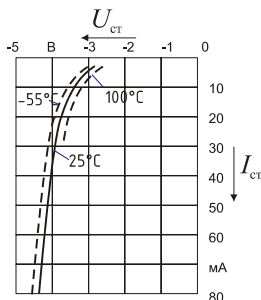


Рисунок А.5 – ВАХ КС133А (обратная ветвь)

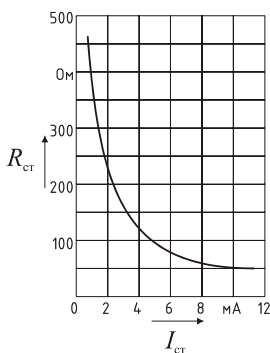


Рисунок А.6 – Зависимость дифференциального сопротивления от тока

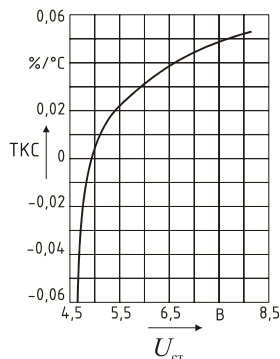


Рисунок А.7 – Зависимость ТКС от напряжения

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 **Прохорский, А. А.** Основы автоматики и телемеханики: учеб. для техникумов железнодорожного транспорта/ А. А. Прохорский. – М.: Высш. шк., 1988. – 250 с.
- 2 **Виноградов, Ю. В.** Основы электронной и полупроводниковой техники: учеб. для студентов высш. техн. учеб. заведений/ Ю. В. Виноградов. – М.: Энергия, 1972. – 200 с.
- 3 **Нефедов, В. И.** Основы радиоэлектроники: учеб. для вузов/ В. И. Нефедов. – М.: Высш. шк., 2000. – 399 с.
- 4 **Лачин, В. И.** Электроника: учеб. пособие/ В. И. Лачин, Н. С. Савелов. – Ростов н/Д: Изд-во «Феникс», 2004. – 576 с.
- 5 **Бульчев, А. Л.** Электронные приборы: учеб./ А. Л. Бульчев, П. М. Лямин, Е. С. Тулинов. – Мн.: Высш. шк., 1999. – 415 с.
- 6 **Жеребцов, И. П.** Основы электроники/ И.П. Жеребцов. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
- 7 **Степаненко, И. П.** Основы микроэлектроники: учеб. пособие для вузов/ И. П. Степаненко. – М.: Советское радио, 1980. – 363 с.
- 8 **Полупроводниковые приборы: учеб. для вузов/ Н. М. Тугов [и др.].** – М.: Энергоатомиздат, 1990 – 264 с.
- 9 **Бриндли, К.** Карманный справочник инженера электронной техники / Бриндли К., Карр Дж.; пер. с англ. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2002. – 400 с.
- 10 **Фишер, Дж.** Электроника – от теории к практике / Фишер Дж.; пер. с англ. – М.: Энергия, 1980. – 400 с.
- 11 **Тули, М.** Карманный справочник по электронике / Тули М.; пер с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 176 с.
- 12 **Аналоговая и цифровая электроника (полный курс): учеб. для вузов/ Ю. Ф. Опадчий [и др.].** – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 276 с.
- 13 **Дунаев, С. Д.** Электроника, микроэлектроника и автоматика: учебник для техникумов и колледжей железнодорожного транспорта/ С. Д. Дунаев. – М.: Маршрут, 2003. – 336 с.
- 14 **Акимова, Г. Н.** Электронная техника: учеб. для техникумов и колледжей железнодорожного транспорта/ Г. Н. Акимова. – М.: Маршрут, 2003. – 290 с.
- 15 **Ефимчик, М. К.** Технические средства электронных систем. Вводный курс: учеб. пособие/ М. К. Ефимчик. – Мн.: Тесей, 2000. – 276 с.
- 16 **Прянишников, В. А.** Электроника: полный курс/ В. А. Прянишников. – СПб.: КОРОНА принт, 2004. – 416 с.
- 17 **Электроника/ Ю. В. Гусев [и др.].** – М.: Высш. шк., 1991. – 622 с.
- 18 **Данилов, И. А.** Общая электротехника с основами электроники/ И. А. Данилов, П. М. Иванов. – М.: Высш. шк., 2000. – 752 с.
- 19 **Электроника и микроэлектроника. Ч. 1. Электронные устройства информационной информатики/ Скаржепа В. А. [и др.].** – Киев: Вища школа, 1989. – 431 с.
- 20 **Андреев, Ф. Ф.** Электронные устройства автоматики и их расчет/ Ф. Ф. Андреев. – М.: Машиностроение, 1971 – 289 с.
- 21 **Кострома, В. С.** Лабораторные работы по дисциплине «Электронные устройства в железнодорожной автоматике, телемеханике и связи». Ч. 1. Полупроводниковые диоды/ В. С. Кострома. – Гомель: БелИИЖТ, 1986. – 35 с.
- 22 **Диоды: справочник/ О. П. Григорьев [и др.].** – М.: Радио и связь, 1990. – 336 с.
- 23 **Нестеренко, И. И.** Цветная и кодовая маркировка радиоэлектронных компонентов отечественных и зарубежных/ И. И. Нестеренко. – М.: СОЛОН-Пресс, 2003. – 128 с.
- 24 **Автоматика, телемеханика и связь на транспорте: пособие по оформлению дипломных проектов/ К. А. Бочков [и др.].** – Гомель. БелГУТ, 1999. – 74 с.
- 25 **Выполнение электрических схем по ЕСКД: справочник/ С. Т. Усаченко [и др.].** – М.: Изд. стандартов, 1989. – 325 с.
- 26 **Митин, Г. П.** Условные обозначения в отечественных и зарубежных электрических схемах/ Г. П. Митин. – М.: Изумруд, 2003. – 224 с.

СОДЕРЖАНИЕ

1 Общие сведения о полупроводниках	3
2 Полупроводниковые диоды.....	5
2.1 Определение и условное графическое обозначение	5
2.2 Технология изготовления полупроводниковых диодов.....	6
2.3 Вольт-амперная характеристика	6
2.4 Общие параметры диодов	9
2.5 Эквивалентные схемы полупроводниковых диодов.....	10
2.6 Классификация диодов.....	11
2.7 Система обозначений диодов	14
<i>Лабораторная работа № 1</i> Исследование вольт-амперной характеристики диода	17
<i>Лабораторная работа № 2</i> Исследование вольт-амперной характеристики стабилитрона ...	25
<i>Лабораторная работа № 3</i> Исследование однополупериодного выпрямителя	33
<i>Лабораторная работа № 4</i> Исследование двухполупериодного (мостового) выпрямителя ...	42
<i>Лабораторная работа № 5</i> Исследование параметрического стабилизатора напряжения	48
Приложение А Справочные данные по диодам и стабилитронам, используемым в лабораторных работах	54
Список рекомендуемой литературы.....	58

Учебное издание

Минин Владимир Евгеньевич
Гаврилов Геннадий Серафимович
Ермаков Сергей Федорович и др.

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

Лабораторный практикум
по дисциплине «Электронные устройства на транспорте»

Редактор Т. М. Р и з е в с к а я
Технический редактор В. Н. К у ч е р о в а
Корректор М. П. Д е ж к о

Подписано в печать 16.10.2007 г. Формат 60 x 84 1/16.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать на ризографе.
Усл. печ. л. 3,49. Уч-изд. л. 3,48. Тираж 300 экз.
Зак. № 2432. Изд. № 4224.

Издатель и полиграфическое исполнение
Белорусский государственный университет транспорта:
ЛИ № 02330/0133394 от 19.07.2004 г.
ЛП № 02330/0148780 от 30.04.2004 г.
246653, г. Гомель, ул. Кирова, 34.