

ЛЕКЦИЯ №14

По дисциплине:

«Электроника и электротехника»

Тема №:9

Полупроводниковые приборы

Занятие №:9

Полупроводниковые диоды

Учебные вопросы:

1. Электрические свойства полупроводников
2. р-п переход.
3. Полупроводниковые диоды: классификация, назначение, характеристики и параметры

Литература для самостоятельной работы обучающихся:

1. **Иванов, И. И.** Электротехника и основы электроники: учебник. – 9-е изд., стер/ И.И. Иванов, Г.И. Соловьев, В.Я Фролов. – СПб: Лань, 2017. – 736 с.

2. **Касаткин, А.С.** Электротехника: учебник/ А.С. Касаткин, М.В. Немцов. – 12-е изд. стер. – Москва.: Академия, 2008. – 544 с. – и предыдущие издания.

б) дополнительная литература:

3. **Немцов, М. В.** Электротехника и электроника: учебник/ М. В. Немцов. – Москва: КноРус, 2016. – 560 с. – и предыдущие издания.

1. Электрические свойства полупроводников

К полупроводникам относятся вещества, которые по своим электрическим свойствам занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Отличительным признаком полупроводников является сильная зависимость их электропроводности от температуры, концентрации примесей, воздействия светового и ионизирующего излучений.

В процессе образования кристаллической решетки между атомами возникает сильное взаимодействие, приводящее к расщеплению энергетических уровней, занимаемых электронами атомов. Совокупность этих уровней называют энергетической зоной. Разрешенные энергетические зоны отделены друг от друга запрещенной зоной. Верхняя разрешенная зона, в которой при абсолютном нуле температуры все энергетические уровни заняты, называется заполненной или валентной зоной. Разрешенная зона, в которой при $T = 0^\circ \text{ К}$ электроны отсутствуют, называется зоной проводимости.

В полупроводниковой электронике широкое применение получили германий ($\Delta W = 0,67 \text{ эВ}$) и кремний ($\Delta W = 1,12 \text{ эВ}$) - элементы 4-й группы периодической системы. Кристаллическую решетку этих элементов изображают так, как показано на рисунке 1, а. При температуре абсолютного нуля (0° К) все электроны находятся на орбитах, энергия электронов на которых не превышает энергетических уровней валентной зоны. Свободных электронов нет, и полупроводник ведет себя, как диэлектрик. При комнатной температуре часть электронов приобретает энергию, достаточную для разрыва ковалентной связи. При разрыве ковалентной связи в валентной зоне появляется свободный энергетический уровень (рис.1, б). Уход электрона из ковалентной связи сопровождается появлением в системе двух электрически связанных атомов единичного положительного заряда, получившего название дырки, и свободного электрона.

Заполнение дырки электроном из соседней ковалентной связи можно представить как перемещение дырки. Процесс образования пар электрон-дырка называют **генерацией** свободных носителей заряда. Одновременно с процессом генерации протекает процесс **рекомбинации** носителей, при котором электрон восстанавливает ковалентную связь.

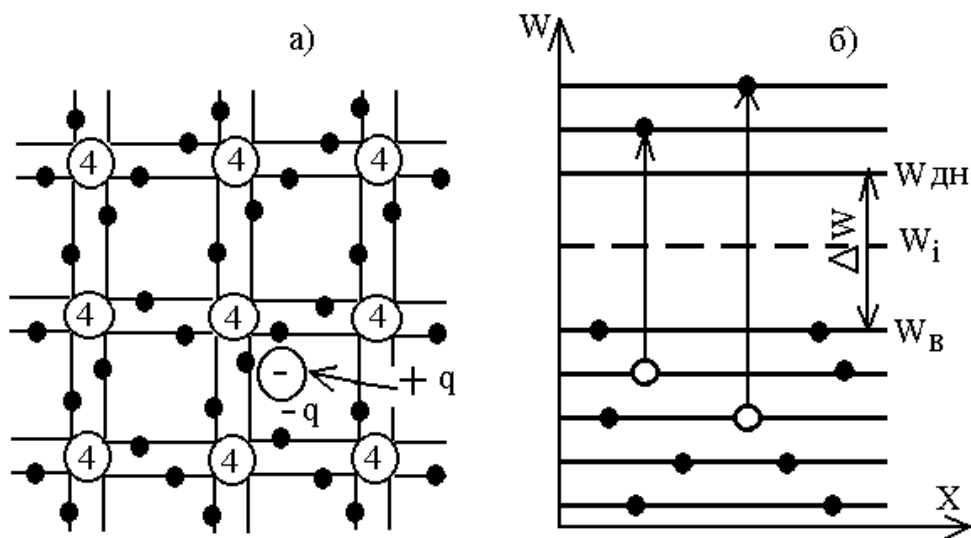


Рисунок 1- Условное обозначение кристаллической решетки (а) и энергетическая диаграмма (б) полупроводника с собственной электропроводностью.

Полупроводники с электронной электропроводностью

При введении в 4-валентный полупроводник примесных 5-валентных атомов (фосфора Р, сурьмы Sb) атомы примесей замещают основные атомы в узлах кристаллической решетки. Четыре электрона атома примеси вступают в связь с четырьмя валентными электронами соседних атомов основного полупроводника. Пятый валентный электрон слабо связан со своим атомом и при сообщении ему незначительной энергии, называемой энергией активации, отрывается от атома и становится свободным. Примеси, увеличивающие число свободных электронов, называют донорными или просто донорами.

Полупроводники, в которых концентрация свободных электронов в зоне проводимости превышает концентрацию дырок в валентной зоне, называются полупроводниками с **электронной** электропроводностью или полупроводниками n-типа.

Подвижные носители заряда, преобладающие в полупроводнике, называют основными. Соответственно те носители заряда, которые находятся в меньшем количестве, называются **неосновными** для данного типа полупроводника. В полупроводнике n-типа основными носителями заряда являются электроны, а неосновными - дырки.

Полупроводники с дырочной электропроводностью

Если в кристалле 4-валентного элемента часть атомов замещена атомами 3-валентного элемента (галлия, индия), то для образования четырех

ковалентных связей у примесного атома не хватает одного электрона. Этот электрон может быть получен от атома основного элемента полупроводника за счет разрыва ковалентной связи. Разрыв связи приводит к появлению дырки, так как сопровождается образованием свободного уровня в валентной зоне. Примеси, захватывающие электроны из валентной зоны, называют акцепторными или акцепторами. Энергетические уровни примесных атомов располагаются вблизи валентной зоны.

Уже при комнатной температуре электроны из валентной зоны переходят на уровни акцепторов. За счет ионизации атомов исходного материала из валентной зоны часть электронов попадает в зону проводимости. Однако электронов в зоне проводимости значительно меньше, чем дырок в валентной зоне. Поэтому дырки в таких полупроводниках являются основными, а электроны - неосновными

Такие полупроводники носят название полупроводников с **дырочной** электропроводностью или полупроводников р-типа.

2. р-п переход

Построение энергетической модели р-п – переходов для случая термодинамического равновесия состоит из следующих этапов.

1. проводим горизонтальную пунктирную линию – уровень Ферми.
2. Вертикальными линиями отделяем полупроводники различного типа проводимости.
3. В зоне р – полупроводника рисуем его зонную диаграмму, учитывая, что уровень Ферми проходит посередине между акцепторным уровнем и потолком валентной зоны.
4. Аналогично для n – полупроводника, уровень Ферми проходит посередине между донорным уровнем и дном зоны проводимости.
5. Соединяем дно зоны проводимости в р – полупроводнике с дном зоны проводимости в n – полупроводнике. То же самое проделываем для валентной зоны.

Электроны из n – полупроводника не могут переходить в р – полупроводник, так как на их пути расположен потенциальный барьер $E_{пт}$ и чтобы его преодолеть нужно совершить работу. Следовательно существует электрическое поле между р и n полупроводниками, направленное от n – полупроводника к р – полупроводнику.

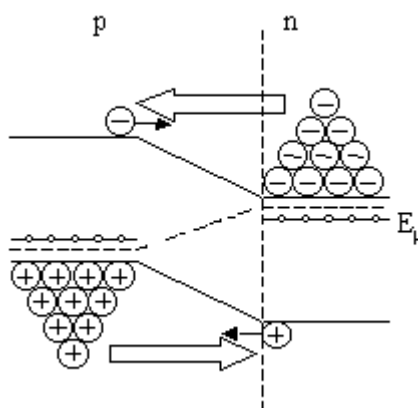
Построение энергетической модели р-п перехода, включенного в обратном направлении.

Уменьшение внутреннего поля можно интерпретировать как уменьшение высоты потенциального барьера. При увеличении же суммарного поля - как увеличение высоты барьера.

Свойства $p-n$ перехода включенного в обратном направлении: основные носители – дырки в p – полупроводнике, электроны в n – полупроводнике не могут преодолеть барьер и в токе участия не принимают. Не основные носители – электроны в p – полупроводнике, дырки в n – полупроводнике свободно преодолевают барьер.

Построение энергетической модели $p-n$ перехода ,включенного в прямом направлении.

Высота потенциального барьера понизится, он может так же и исчезнуть. Основные носители могут проходить над барьером и принимать участие в токе.



4 Построение энергетической модели $p-i-n$ перехода в случае термодинамического равновесия

I – собственный полупроводник. Построение проведем так же как в случае $p-n$ перехода(термодинамическое равновесие). Пусть структура будет выполнена таким образом, чтобы I – полупроводник мог свободно поглощать падающий на него свет. И этот свет подадим. В I – полупроводнике начнется генерация свободных носителей заряда: электронов и дырок: которые свободно перетекают в n и p полупроводники и накапливаются там. Между n и p областями появляется разность потенциалов и если такую структуру включить в электрическую цепь с нагрузкой, то появится электрический ток. Таким образом, рассмотренная структура реализует функцию фотоэлемента, элемента солнечной батареи.

5 Построение энергетической модели $p-i-n$ структуры в случае прямого включения

Рассмотрим $p-i-n$ структуру, I – полупроводник имеет определенную геометрию и выполнен таким образом, что из него можно быть осуществлен вывод световой энергии. Построим энергетическую модель для прямого

включения, полагая что потенциальный барьер исчез. Очевидно, что электроны – основные носители заряда из n -полупроводника и дырки из p -полупроводника одновременно начнут перемещаться друг другу на встречу, вступая в I -полупроводник. За счет резкого увеличения электронов и дырок в i области реализуются оптимальные условия для наблюдения эффекта рекомбинации, с выделением фотонов.

6 Построение энергетической модели p - n - p структуры

Построим энергетическую модель p – n – p структуры для случая термодинамического равновесия. Строим по правилам построения модели p – n перехода. Биполярный транзистор - трех электродный прибор (эмиттер, база, коллектор). У него два перехода: эмиттерный и коллекторный переход.

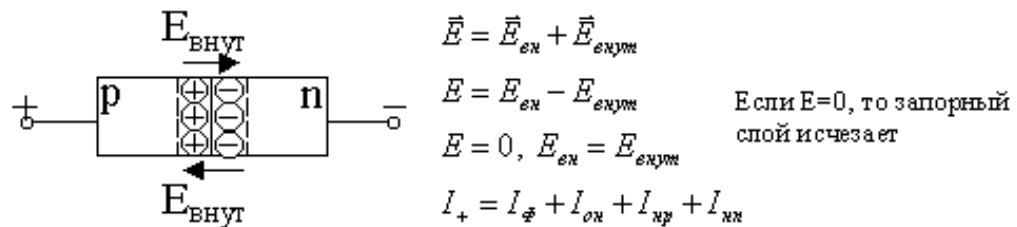
Эмиттерный переход всегда включается в прямом коллекторный в обратном направлении. Другое включение запрещено.

Построение энергетической модели p – n – p структуры, включенной в электрическую цепь проводится с учетом, что в эмиттерном переходе потенциальный барьер уменьшается и его высотой можно управлять входным сигналом. Коллекторный переход увеличивается и его высота не меняется.

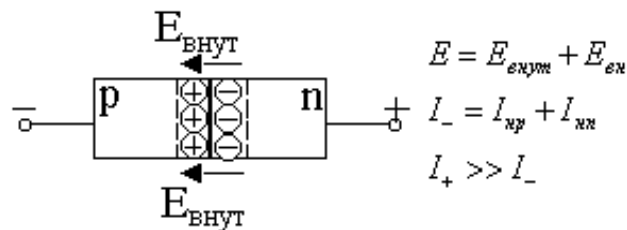
3. Полупроводниковые диоды: классификация, назначение, характеристики и параметры

Так как в p – n полупроводнике избыток дырок, а в n – полупроводнике избыток электронов, то за счет диффузии, дырки начнут перемещаться в n - полупроводник, а электроны в противоположном направлении. Дырка попадая в n - полупроводник рекомбинирует. Электроны и дырки диффузируют из пограничного слоя контакта, оставляя в p - n полупроводнике слой отрицательно заряженных ионов атомов примеси, а в n -полупроводнике слой положительно заряженных атомов примеси, возникает внутреннее эл. поле, препятствующее продолжению диффузии. Таким образом: на границе раздела двух сред p - n полупроводников возникает двойной электронный слой с внутренним электрическим полем, препятствующим переходу дырок и электронов; область двойного электронного слоя принято называть запиорным слоем или p - n переходом препятствующим переходу основных носителей заряда, его сопротивление стремится к бесконечности.

Прямое включение p - n перехода



Обратное включение p-n перехода



2.Понятие полупроводникового диода и технологии его изготовления

Полупроводниковым диодом называется электротехнический прибор с двумя выводами, содержащий один электронно-дырочный переход. Наибольшее применение получили германиевые и кремневые полупроводниковые диоды, а также диоды выполненные на основе арсенида галлия.

Технологии изготовления диода: сплавной контакт, диффузионный контакт, планарный переход, эпитаксиальный переход

3 Классификация полупроводниковых диодов.

1. По технологическому исполнению: плоскостные и точечные;
2. По конструктивному исполнению: одноэлементные; диодные;
3. По используемому материалу: германиевые, кремневые, арсенид галлия;
4. По мощности: маломощные, средней мощности, мощные, диодные столбы;
5. По назначению: а) точечные делятся на: диоды выпрямительные и СВЧ – диоды; б) плоскостные делятся на: -диоды выпрямительные; -стабилитроны или опорные диоды; -туннельные диоды;-обращённые диоды;-варикапы;-фотодиоды;-светодиоды;-фотоэлементы полупроводниковые.

4 Выпрямительные диоды.

Выпрямительные полупроводниковые диоды применяются для преобразования переменного тока в постоянный. Основной характеристикой выпрямительных диодов является вольтамперная (Рис.1)

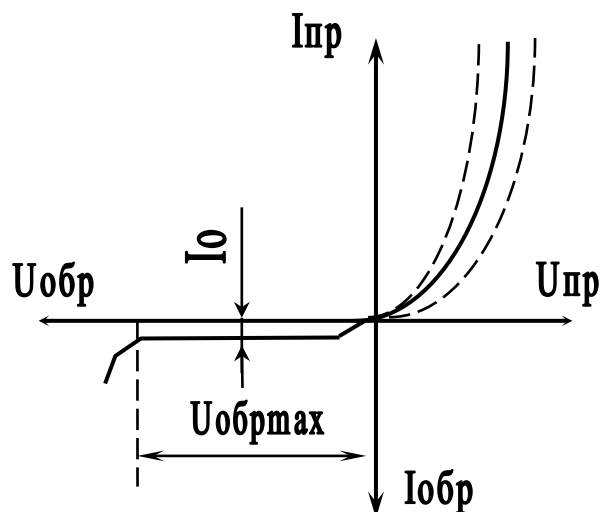
5 Эксплуатационные параметры диодов:

1. Предельная рабочая температура:

Германиевых диодов – 85°C ;

Кремниевых диодов – 150°C ;

2. $U_{пр.ср}$ – среднее прямое напряжение на открытом диоде при номинальном выпрямляемом токе.



3. Средний обратный ток $I_{обр\text{ ср}}$, ток утечки. Обратный ток через диод при максимальном $U_{обр}$.

4. Граничная частота $f_{гр}$ - частота без снижения режимов.

6 Предельные параметры диода

1. $U_{обр.max}$ – наибольшая амплитуда обратного напряжения

2. $I_{пр.max}$ – допустимое значение выпрямленного тока до 1000А.

3. $P_{рас.max}$ – максимальная рассеиваемая мощность (достигает сотни кВт).

7 Обозначение диодов

(Б1/Ц1) Д (Ц2 Ц3 Ц4) [Б2]

Б1 Ц1 – материал: Г,1 – германий; К,2 – кремний; А,3 – арсенид галлия;

Д - диод

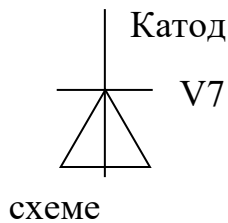
Ц2 – кодирует назначение и класс диода: 1 – маломощные; 2 – средней мощности;

3 – импульсные.

Ц3 Ц4 – порядковый номер разработки;

Б2 – буква уточняющая параметры диода данного типа.

Обозначение на схемах:



V или VD - обозначение диода

VS – обозначение диодной сборки

Цифра после V, показывает номер диода в

Анод

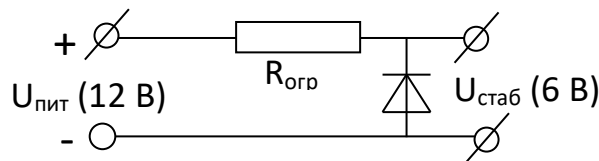
Анод– это полупроводник p-типа, катод –n-типа

Стабилитроны.

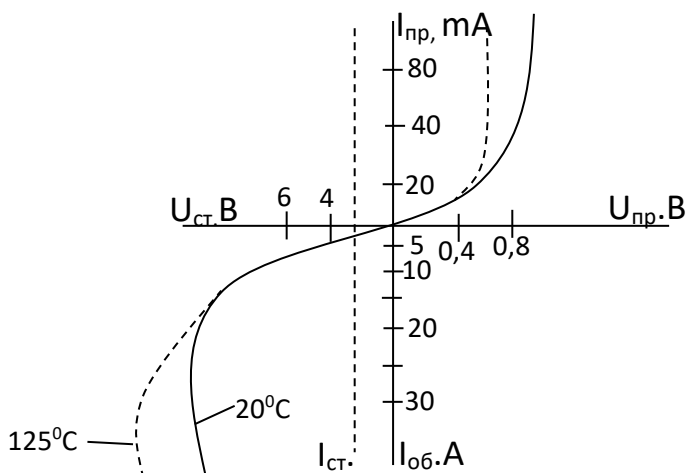
Полупроводниковый стабилитрон - это п.п. диод, напряжение на котором в области лавинного электрического пробоя слабо зависит от тока и который предназначен для стабилизации напряжения.

Условное обозначение стабилитрона

Обычно стабилитрон включают по схеме



ВАХ стабилитрона имеет вид:



Основные параметры стабилитронов :

- напряжение на участке стабилизации $U_{\text{стаб}}$;
- динамическое сопротивление на участке стабилизации $R_{\text{д}} = \frac{\alpha U_{\text{см}}}{\alpha I_{\text{см}}}$;
- минимальный ток стабилизации $I_{\text{ст. мин}}$;
- максимальный ток стабилизации $I_{\text{ст. макс.}}$;
- температурный коэффициент напряжения на участке стабилизации $K_{\text{тем}} = \frac{\alpha U_{\text{см}}}{\alpha I} * 100$.

Стабисторы.

Стабилизацию требуемого напряжения можно получить с помощью диода, включенного в прямом направлении. Кремневые диоды, предназначены для этой цели, называют **стабисторами**. Для изготовления стабисторов применяют кремний с большой концентрацией примесей, что необходимо для получения более резкого возрастания (перелома) прямой ветви ВАХ. Кроме того, увеличение примесей в кремнии уменьшает зависимость ВАХ от температуры и ,соответственно, снижает температурный коэффициент стабилизации $K_{\text{тем.}}$ стабистора. Отличной особенностью стабисторов по сравнению со стабилитронами является меньшее напряжение стабилизации ($\sim 0,7\text{В}$).

Стабилитроны и стабисторы можно включать последовательно. При этом общее напряжение стабилизации суммируется $U_{\text{ст общ}} = U_{\text{ст1}} + U_{\text{ст2}} + U_{\text{ст3}} + \dots$

А вот параллельное включение стабилитронов недопустимо т.к. из всех параллельно соединенных стабилитронов ток будет только в одном стабилитроне, имеющий наименьшее напряжение стабилизации.

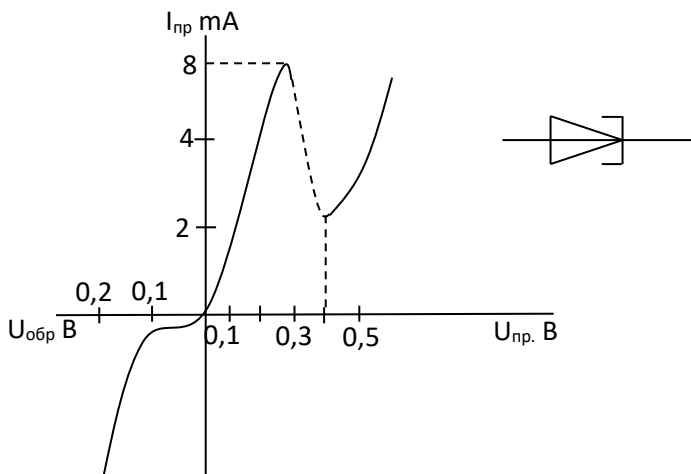
В конструктивном исполнении стабилитроны аналогичны выпрямительным диодам.

Другие виды диодов.

Кроме выпрямительных диодов и стабилитронов, которые широко применяются в технике и с которыми, вероятнее всего, вам придется иметь дело, существует еще очень много видов диодов менее распространенных, но тем не менее упомянуть о которых необходимо.

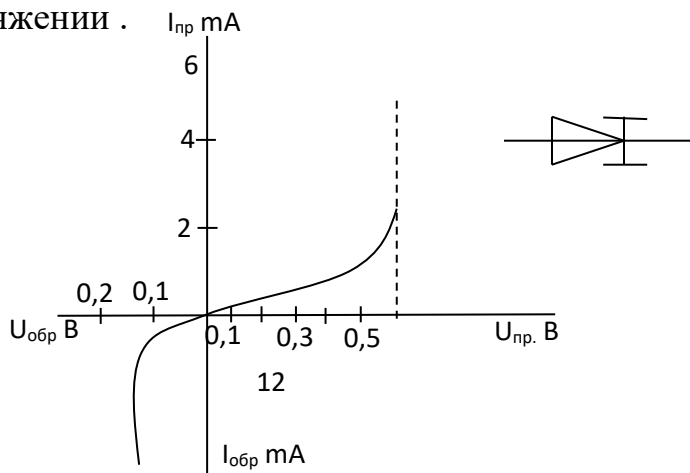
Туннельные диоды.

Особенность такого диода заключается в наличии в так называемого туннельного эффекта, когда на ВАХ для прямого тока имеется участок с отрицательной дифференциальной электрической проводимостью. Туннельные диоды являются быстродействующими приборами и применяются в генераторах ВЧ и импульсивных устройствах.



Обращенный диод.

Это диод, в р - n переходе которого электрическая проводимость при обратном напряжении вследствие туннельного эффекта значительно выше, чем при прямом напряжении.

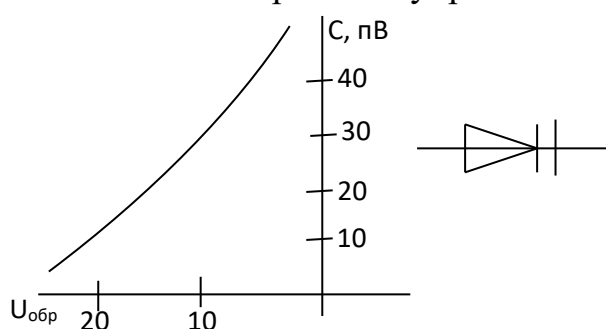


Если к обращенному диоду приложить прямое напряжение $U_{пр} \leq 0,2$, то $I_{пр} \approx 0$. А вот при малом обратном напряжении, $I_{обр}$ достигает несколько мА.

Поэтому обращенные диоды вентильными свойствами при малых напряжениях и только в той области, где другие диоды такими свойствами не обладают.

Варикап.

Этот диод, в котором используется зависимость емкости р - n перехода от обратного напряжения и который предназначен для применения в качестве электрически управляемой емкости



Варикапы применяются в системах, где необходимо менять частоту, например, в радиотехнике, дистанционном управлении, усилителях и т.п.

Фотодиоды.

Это п.п. диоды обладающие свойством односторонней, фотопроводимости, возникающей при воздействии на них оптического излучения.

Фотодиоды применяются в устройствах оптоэлектроники, автоматики, вычислительной и измерительной технике и в качестве солнечных батарей.

Светодиоды.

Это п.п. диод, генерирующие при прохождении через них электрического тока оптического излучения, которое в видимом диапазоне воспринимается как одноцветное.

Применяются для индикации, сигнализации и т.п. ,а в последние годы и для освещения.

Магнитодиоды.

Это п.п. диоды , ВАХ которых изменяется под действием магнитного поля.

Тензодиоды.

Это п.п. диоды , ВАХ которых изменяется под воздействием механических воздействий (усилий вызывающие деформацию диода или его р - n перехода).

ОДНО- И ДВУХПОЛУПЕРИОДНАЯ СХЕМЫ ВЫПРЯМЛЕНИЯ

1. Характеристики стабилитрона

Стабилитрон – это полупроводниковый диод, работающий в области управляемого лавинного пробоя обратным напряжением и служит для стабилизации напряжения.

Как видно из ВАХ в области пробоя напряжение на стабилитроне $U_{ст}$ лишь незначительно изменяется, при больших изменениях тока стабилизации $I_{ст}$.

2 Основные параметры стабилитрона.

1. $U_{ст\text{ ном}}$ – номинальное напряжение
2. $\Delta U_{ст} = (U_{ст.\text{max}} - U_{ст.\text{min}})$ - рабочее напряжение стабилизации.
3. ТКИ – температурный коэффициент напряжения;
4. $I_{ст.\text{min}}$ - ток соответствующий началу участка лавинного пробоя.
5. $I_{ст.\text{max}}$ – ток ограничивающий предельно-допустимое значение пробоя.
6. $R_{дин} = dU_{ст}/dI_{ст} = \Delta U_{ст}/(I_{ст.\text{max}} - I_{ст.\text{min}})$ - динамическое сопротивление стабилитрона.

7. T_{\max} – максимальная рабочая температура.

8. $P_{\text{рас}}$ – максимальная рассеиваемая мощность. $P_{\text{рас.мах}} = U_{\text{ст}} \cdot I_{\text{ст.мах}}$;

3 Обозначение: КС (Ц1 Ц2 Ц3) Б2



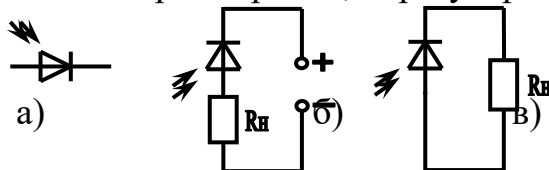
Ц1 – мощность и порядок стабилизации;

Ц2 Ц3 – $U_{\text{ст}}$;

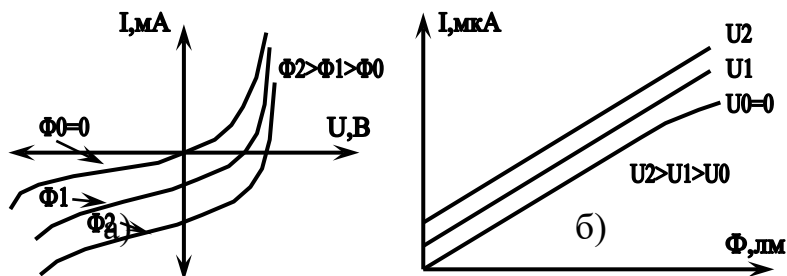
Б – буква, уточняющая прочие параметры

4 Фотодиоды

Фотодиод – полупроводниковый прибор р – n типа, принцип действия которого основан на внутреннем фотоэффекте. При освещении в р – n переходе возникает фотоэлектрический эффект и в результате неравновесной концентрации носителей зарядов в р– и n–областях появляются электроны и дырки. Электроны и дырки пары движутся к р – n переходу, где разделяются и под действием контактной разности потенциалов не основные носители зарядов проходят через переход, образуя фототок.



Обозначения фотодиода (а), фотодиодный (б) и вентильный (в) режимы работы.



Характеристики фотодиодов: а – вольтамперная, б – световая; Φ_0 Φ_1 Φ_2 и U_0 U_1 U_2 световые потоки и напряжения на светодиоде.

5 Светодиоды

Светодиоды — полупроводниковые приборы, преобразующие электрические сигналы в световые. Основными характеристиками светодиодов являются его яркостная характеристика, прямой ток, прямое и обратное напряжение.

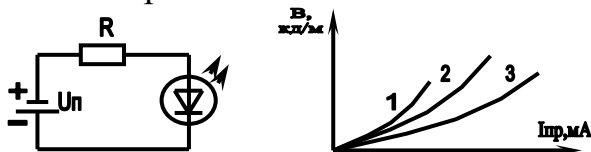
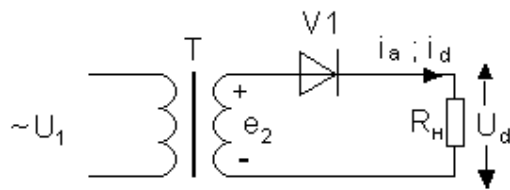


Рис.1 Схема включения светодиода и яркостная характеристика.

6 Однофазные схемы выпрямления

Различают два способа (схемы) выпрямления:

1. Однополупериодное – ток в нагрузке протекает только при положительной полуволне питающего напряжения.

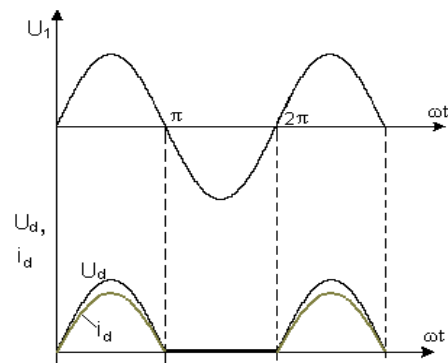


Достоинство
однополупериодной схемы
выпрямления: простота и
дешевизна.

Недостатки: токи и
напряжения прерывисты, низкое
среднее значение токов и напряжений. В схеме велик уровень напряжения
пульсаций.

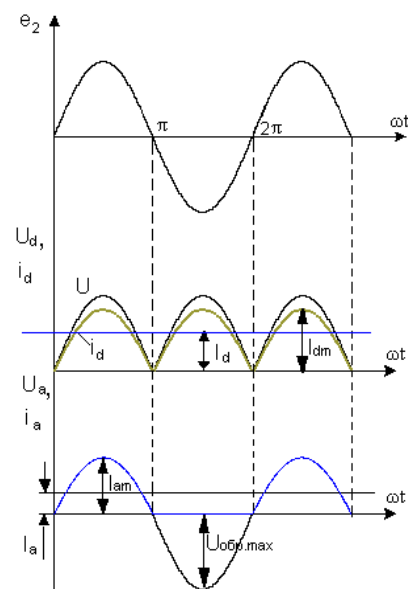
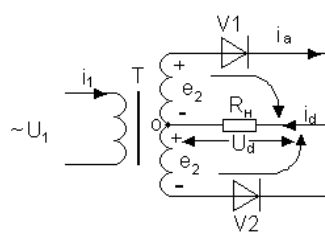
На участке $0 < \omega t < \pi$ $U_d = e_2$

На участке $\pi < \omega t < 2\pi$ $U_d = 0$



2.

- Двухполупериодное – ток в нагрузках протекает при обеих полуволнах.
Однофазная двухполупериодная схема выпрямления с нулевой точкой



Токи и напряжения имеют одинаковую полярность, но в каждый момент
времени изменяют свою величину. Напряжение включает в себя как
постоянную, так и переменную составляющую.