

Л.4 Разновидности полупроводниковых диодов: выпрямительные, импульсные, варикапы, стабилитроны, обращённые, туннельные, СВЧ и т.д. Многообразное применение полупроводниковых диодов.

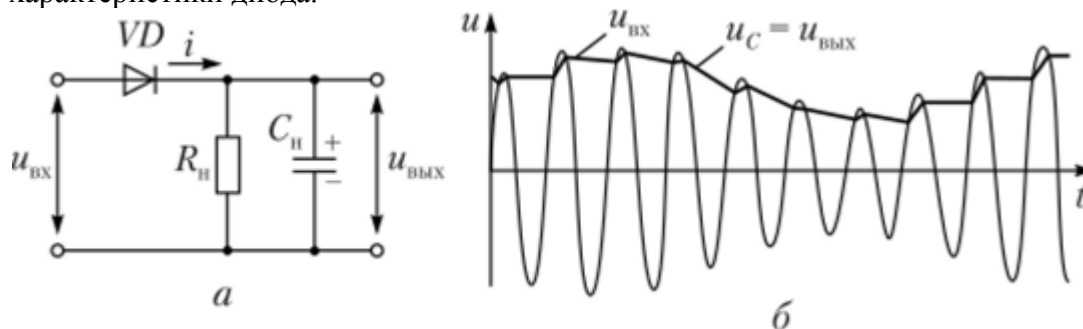
Все полупроводниковые диоды можно разделить на две группы: **выпрямительные и специальные**. Выпрямительные диоды предназначены для выпрямления переменного тока. В зависимости от частоты и формы переменного напряжения они делятся на высокочастотные, низкочастотные и импульсные. Специальные типы полупроводниковых диодов используют различные свойства *p-n*-переходов: явление пробоя, барьерную емкость, наличие участков с отрицательным сопротивлением и др.

1. исторически первые полупроводниковые диоды - т.н. **кристаллический детектор** - поликристалл PbS (природный минерал галенит, далее такие образцы PbS научились делать искусственно) - с помощью перемещаемого контакта (иглы) выбирали микрокристалл, образующий с основной массой *p-n*-переход; эти диоды были относительно высокочастотными, но работали с малыми мощностями

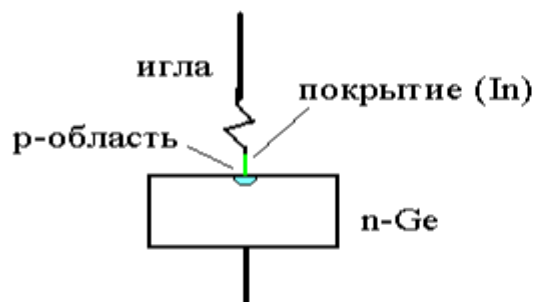
Детекторные диоды. Детектор — в общем случае аппаратное или программное средство, выдающее определённый сигнал при наступлении заданного события. В радиоприемнике это узел, отделяющий полезный сигнал модуляции от несущей составляющей. На вход диодного детектора подаётся тональный АМ сигнал $u_{вх}(t) = U_{вх}(t) \sin \omega_0 t$. При малом входном сигнале (десятки милливольт) работа детектора происходит в пределах нижнего сгиба вольт-амперной характеристики нелинейного элемента (рис. а), которая с достаточной для практики точностью

аппроксимируется полиномом второй степени $i = a_0 + a_1 u + a_2 u^2$

Высокочастотные составляющие с частотой ω не проходят через низкочастотный фильтр на выходе детектора. Полезная информация содержится в низкочастотной составляющей. Пропорциональность данной составляющей квадрату огибающей амплитудно-модулированного сигнала определило название детектора в этом режиме – **квадратичный детектор**. Для работы детектора в **линейном режиме** входное напряжение должна быть порядка 1...1,5 В, чтобы рабочий участок располагался на линейном участке характеристики диода.



точечные диоды - малые емкости, высокие рабочие частоты, малые мощности



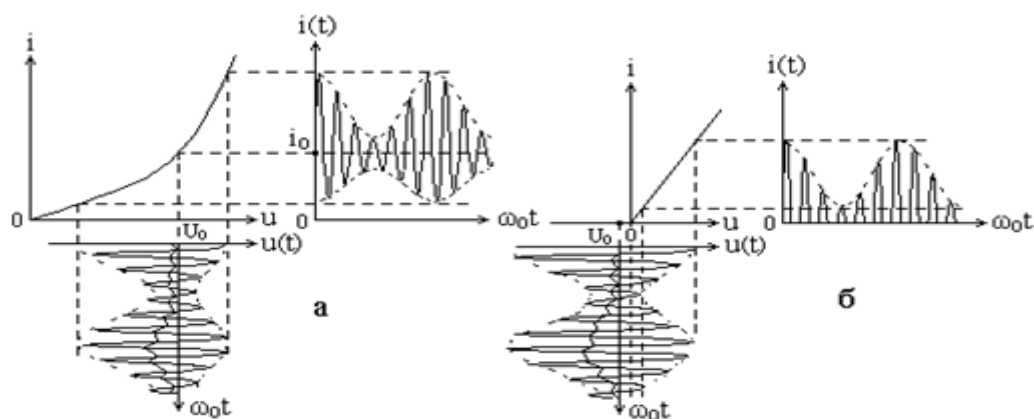
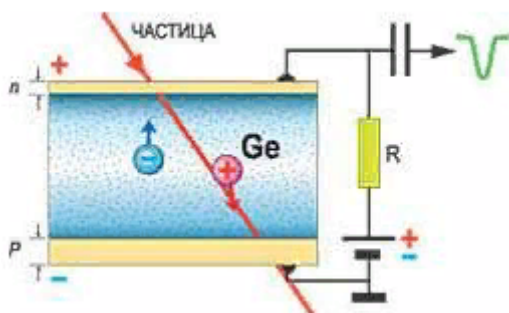


Рис. Квадратичное (а) и линейное (б) детектирование

Полупроводниковый детектор - прибор для регистрации ионизирующих излучений, основным элементом которого является кристалл полупроводника. В кристалле полупроводника частица создает дополнительные заряды — электронно-дырочные пары. Под действием приложенного напряжения они перемещаются к электродам детектора, создавая во внешней цепи электрический импульс.



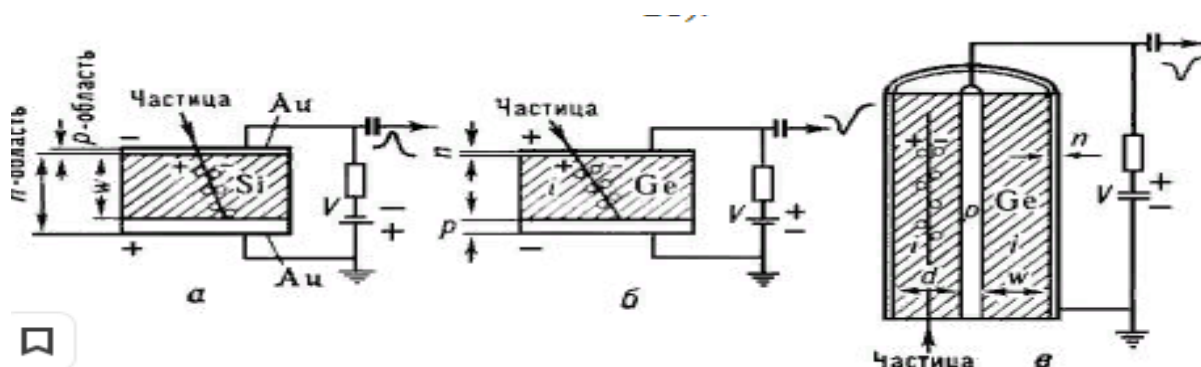
Газонаполненные детекторы имеют два недостатка. Во-первых, плотность газа низка и энергия, теряемая частицей в объеме детектора мала, что не позволяет эффективно регистрировать высокоэнергичные и слабоионизирующие частицы. Во-вторых, энергия, необходимая для рождения пары электрон – ион в газе велика (30-40 эВ), что ухудшает энергетическое разрешение.

Рис. Устройство кремниевого детектора

Полупроводниковый детектор работает подобно ионизационной камере с тем отличием, что ионизация происходит не в газовом промежутке, а в толще кристалла. Полупроводниковый детектор представляет собой полупроводниковый диод, на который подано обратное (запирающее) напряжение (~ сотни В). Слой полупроводника вблизи границы $p-n$ -перехода с объемным зарядом «обеднён» носителями тока (электронами проводимости и дырками) и обладает высоким удельным сопротивлением. Заряженная частица, проникая в детектор, создаёт дополнительные (неравновесные) электронно-дырочные пары, которые под действием электрического поля «рассасываются», перемещаясь к электродам прибора. В результате во внешней цепи полупроводникового детектора возникает электрический импульс, который далее усиливается и регистрируется.



Небольшое значение энергии, необходимой на образование электронно-дырочной пары (примерно в 10 раз меньше, чем на образование ион-электронной пары в газе), означает, что при прочих равных условиях амплитуда сигнала от полупроводникового счетчика в 10 раз больше амплитуды сигнала от ионизационной камеры. Приблизительно на порядок меньше и дисперсия амплитудного распределения импульсов, а значит, лучше и энергетическое разрешение.



Полупроводниковые детекторы: а – кремниевый поверхностно-барьерный детектор; б – дрейфовый германий-литиевый планарный детектор; в – германий-литиевый коаксиальный детектор.

Выпрямительные диоды.



Анод Катод

Обозначение

ВАХ выпрямительного диода:

$$I := I_{обрТ} \left[e^{\frac{U}{\Phi_T}} - 1 \right], \text{ где } I_{обрТ} - \text{тепловой}$$

обратный ток; Φ_T - температурный потенциал (0.025 В).

Первые силовые полупроводниковые диоды - т.н. **купроксные и селеновые выпрямители**; В первых - медная пластина со слоем заиси меди с нанесенной по верх металлизацией (выпрямляющий контакт $\text{Cu-Cu}_2\text{O}$); Во вторых - металлическая пластина, покрытая слоем закристаллизованного селена, по верх которого нанесен слой легирующего металла (переход p-Se - n-Se)

Кремниевые диоды: Максимально допустимый прямой ток: от 0,1 до 1600А. Обратная ветвь ВАХ не имеет участка насыщения, пробой имеет лавинный характер. Для некоторых диодов при комнатной температуре обратное напряжение достигает 2 кВ.

Германиевые диоды: единственное преимущество: - **прямое напряжение при максимально допустимом прямом токе почти в два раза меньше, чем у кремниевых диодов**. Недостатки: - большие обратные токи, из-за чего пробой имеет тепловой характер.

- плохо выдерживают даже кратковременный перегрев при обратном включении
- верхний предел рабочей температуры -75 град. Цельсия

Арсенид-галлиевые диоды – высокочастотные, в основном маломощные, используются

Рис. 2.2. ВАХ выпрямительного диода.

2.3 Кремниевые диоды

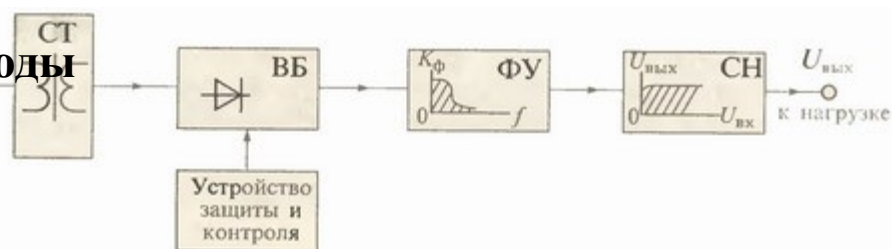


Рис. 1. Обобщенная структурная схема выпрямителя.

Выпрямительные диоды большой мощности называют "силовыми". Материалом для таких диодов обычно служит кремний или арсенид галлия. Германий практически не применяется из-за сильной температурной зависимости обратного тока и низкой рабочей температуры. Кремниевые сплавные диоды используются для выпрямления переменного тока с частотой до 5кГц. Кремниевые диффузионные диоды могут работать на повышенной частоте, до 100 кГц. Кремниевые эпитаксиальные диоды с металлической подложкой (с барьером Шоттки) могут использоваться на частотах до 500 кГц. Арсенид галлиевые диоды способны работать в диапазоне частот до нескольких МГц. Основные параметры диодов $U_{обр}$, $I_{пр}$, $I_{пр\text{ макс}}$, $I_{обр}$, C_{pF} , $F_{зр}$.

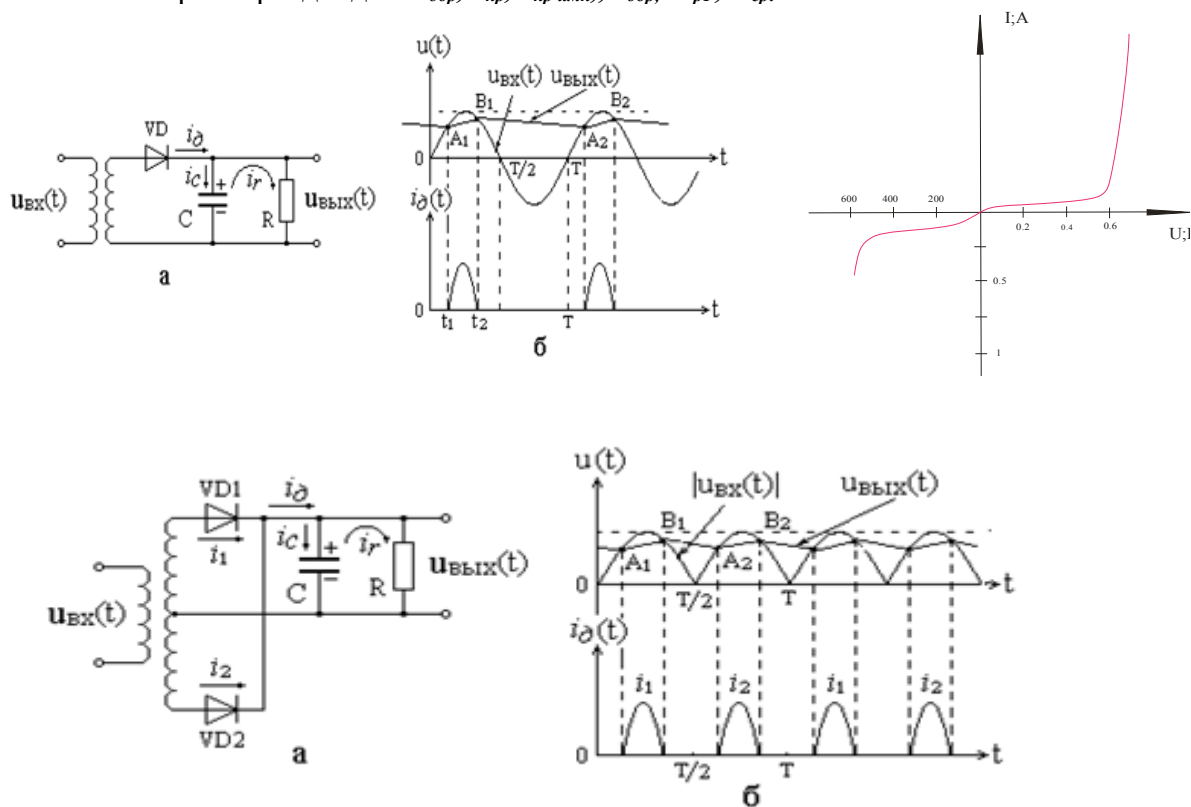


Рис. Схема двухполупериодного выпрямителя

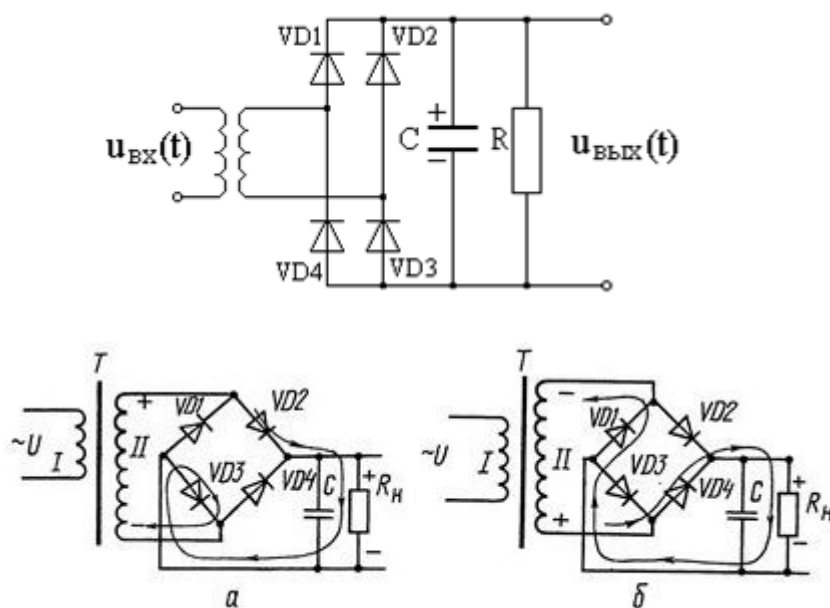
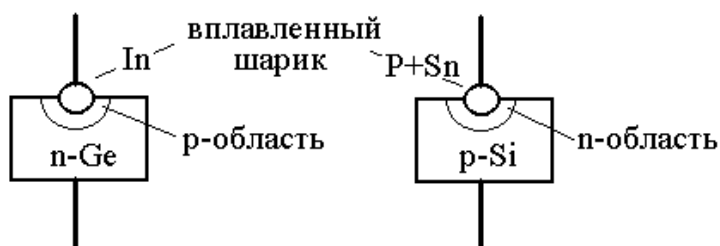


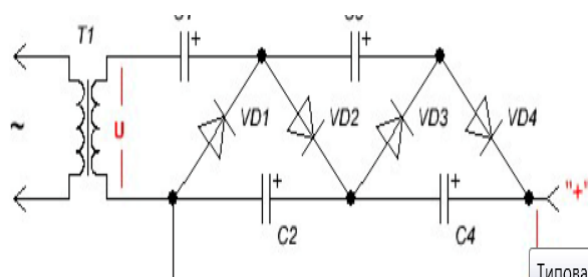
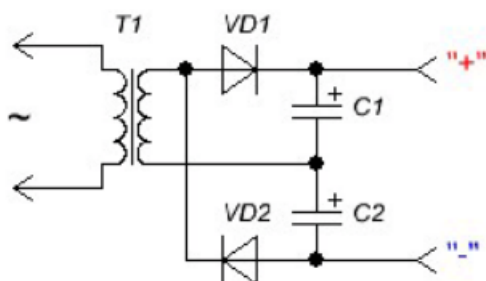
Схема двухполупериодного мостового выпрямителя

3. **сплавные (т.н. плоскостные) диоды** - высокие рабочие токи и напряжения, но значительные емкости и низкие рабочие частоты



Умножители напряжения — это специальные схемы, совмещающие в себе две функции: выпрямление и умножение напряжения. Применение умножителей наиболее оправдано в случаях, когда наличие дополнительного повышающего трансформатора нежелательно. В них используются конденсаторы с рабочим напряжением $2E_t$, независимо от того, во сколько раз увеличилось значение напряжения.

Симметричный удвоитель напряжения



При положительной полуволне входного напряжения работает выпрямитель на диоде VD1, заряжая конденсатор C1, а при отрицательной полуволне — выпрямитель на диоде VD2, заряжающий конденсатор C2. В результате и C1, и C2 заряжаются до уровня входного напряжения, а при их последовательном включении суммарное напряжение равно удвоенному входному. Коэффициент умножения подобных схем можно увеличивать, наращивая количество звеньев умножения.

Четырёхзвенный умножитель - на выходе мы получаем напряжение в четыре раза превышающее входное (U). Эти выпрямители получили большое распространение там, где нужно получить высокое напряжение при достаточно малом токе. Такие источники питания используются в научных лабораториях, в детекторах элементарных частиц, в медицинской аппаратуре (люстра Чижевского) и в оружии самообороны (электрошокер).

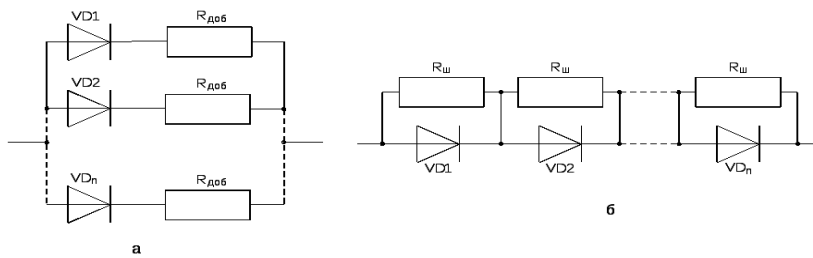


Селеновые выпрямители по многим параметрам уступают КД и ГД, но широко применялись вследствие низкой себестоимости и способности выдерживать значительные кратковременные перегрузки и быстро восстанавливать свои свойства после сбоя. Они намного превосходят диоды в радиационной стойкости и обладают уникальной особенностью самовосстановления: при пробое, в месте пробоя слой селена выгорает и при этом не образуется короткое замыкание. Селеновый

выпрямитель состоит из алюминиевой пластины, покрытой с одной стороны слоем кристаллического селена (50—60 мкм), являющимся одним из электродов с дырочной (р-тип) проводимостью. Для создания второго электрода на поверхность селена наносится

сплав из олова, кадмия и висмута. При вступлении в реакцию (диффузия) селена и кадмия образуется тонкий слой селенида кадмия с электронной (n-тип) проводимостью. На границе между селеном и селенидом кадмия образуется p-n-переход.

В высоковольтных устройствах широко применяют высоковольтные столбы, которые скомпонованы из диодов, соединенных **последовательно**. При разработке выпрямительных схем может возникнуть необходимость получить выпрямленный ток, превышающий предельно допустимое значение для одного диода. В этом случае применяют **параллельное** включение однотипных диодов.



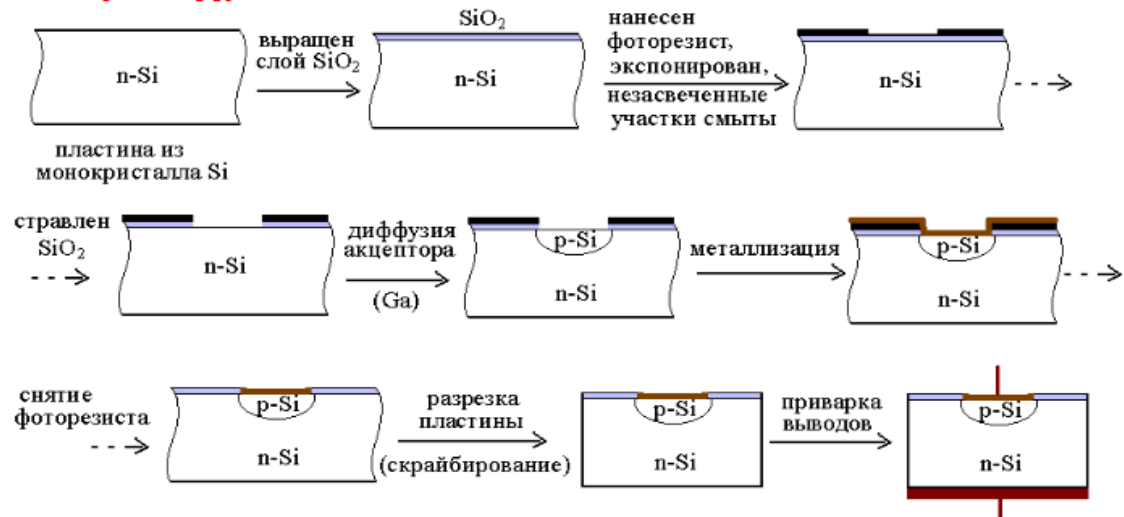
Параллельное (а) и последовательное (б) соединение выпрямительных диодов

Для выравнивания токов, протекающих через диоды, последовательно с диодами включаются омические добавочные резисторы $R_{доб}$ порядка нескольких Ом. Это позволяет искусственно уравнивать прямые сопротивления диодов, которые для разных

образцов приборов могут быть существенно различными.

При последовательном соединении диодов напряжение распределяется между всеми диодами. Для обеспечения надежной работы диодов параллельно каждому из них следует включить резистор (порядка 100 кОм) для выравнивания обратных сопротивлений. В этом случае напряжения на всех диодах будут равными.

4. планарная диффузионная технология

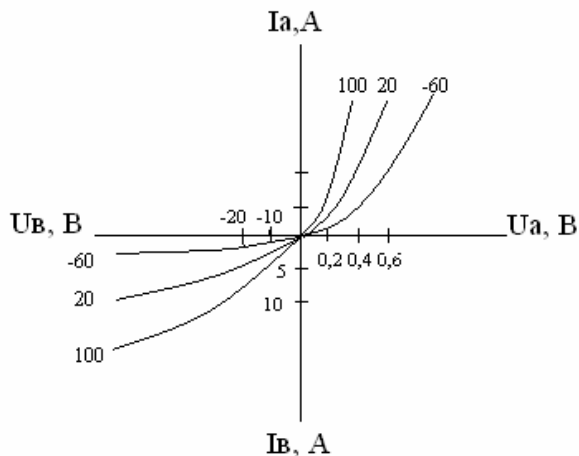


без разрезки - **сборка диодов** с общим катодом



Диод Шоттки – это полупроводниковый диод, выпрямляющие свойства которого, основаны на использовании электрического барьера между металлом и полупроводником. Диоды Шоттки, в сравнении с кремниевыми диодами, имеют меньше на 0,3÷0,5 В прямое падение напряжения и на 2÷3 порядка больше обратные токи. Они

обладают высоким быстродействием, т.е. малым временем перехода из проводящего состояния в непроводящее, и обратно.



Преимущественное применение выпрямительных диодов Шоттки – высокочастотные устройства и, например, низковольтные выпрямители. Основные особенности: - меньше прямое напряжение; - большая максимально допустимая плотность прямого тока; - хороший теплоотвод из-за наличия металлической подложки; - способность выдерживать значительно большие перегрузки по току по сравнению с аналогичным диодом с р – n переходом на основе того же полупроводника. Недостаток – пониженное обратное

напряжение.

Импульсные диоды оптимизированы по собственной ёмкости, времени восстановления обратного сопротивления (рассасывания неосновных носителей) для работы в импульсном режиме. Основное применение: работа в качестве коммутирующих элементов в цифровых схемах, для детектирования высокочастотных сигналов и в ВЧ преобразовательной технике.

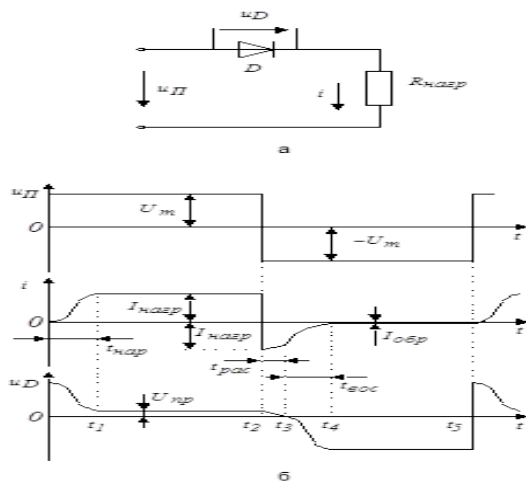
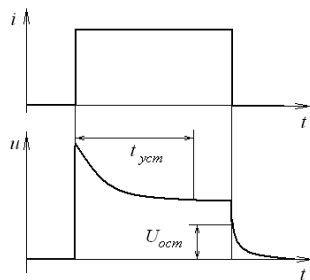


Рис. 1.23. Схема испытания (а) и графики процессов отпирания и запираания диода (б)

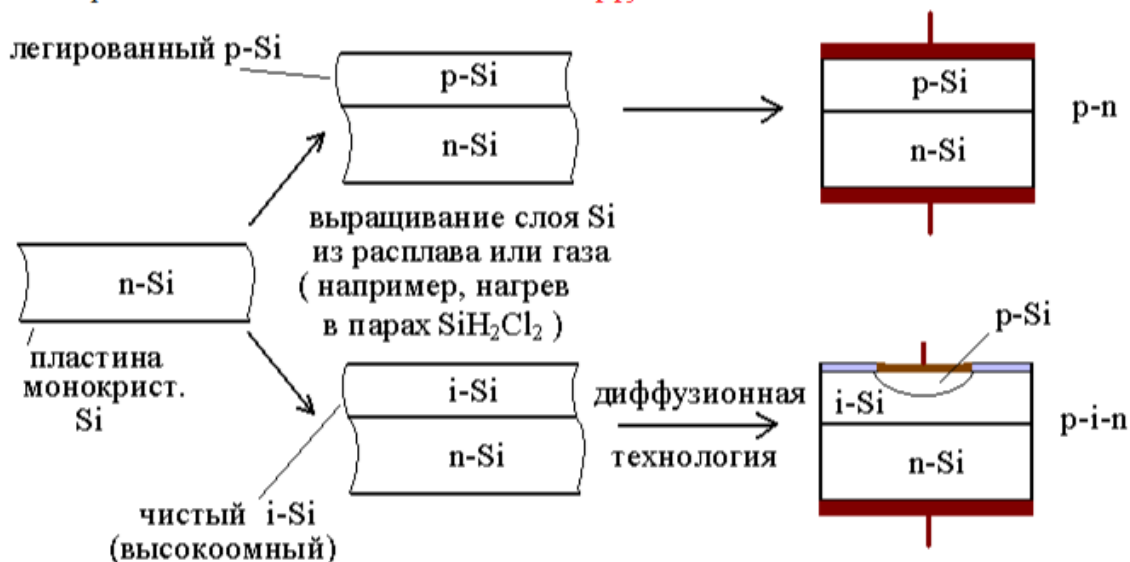
При переключении диода с прямого напряжения на обратное, в начальный момент через диод течёт неуправляемый обратный ток. Этот обратный ток ограничен только объемным сопротивлением базы диода и сопротивлением нагрузки. С течением времени, накопленные в базе неосновные носители зарядов рекомбинируют или уходят из базы через р – n переход, после чего обратный ток уменьшается до обычного значения. Переходный процесс, в течение которого обратное сопротивление диода восстанавливается до постоянного значения после быстрого переключения с прямого напряжения на обратное, называется **восстановлением обратного сопротивления диода**.

При пропускании большого импульса тока в прямом направлении наблюдается выброс напряжения в первый момент после включения (рис. -в), что связано с повышением напряжением до тех пор, пока не закончится накопление неосновных носителей в базе диода (инжективное). После насыщения базы это сопротивление понижается и напряжение уменьшается. Этот процесс характеризуется вторым параметром импульсного диода – **временем установления прямого напряжения** $t_{уст}$, равным интервалу времени от начала импульса тока до достижения заданного значения прямого напряжения.

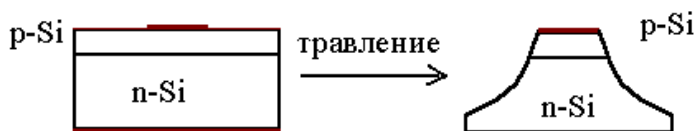


В)

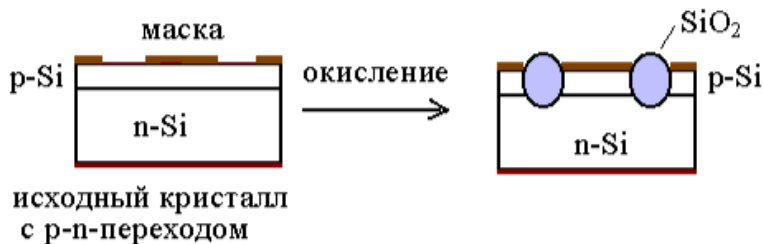
5. планарная эпитаксиальная и эпитаксиально-диффузионная технологии



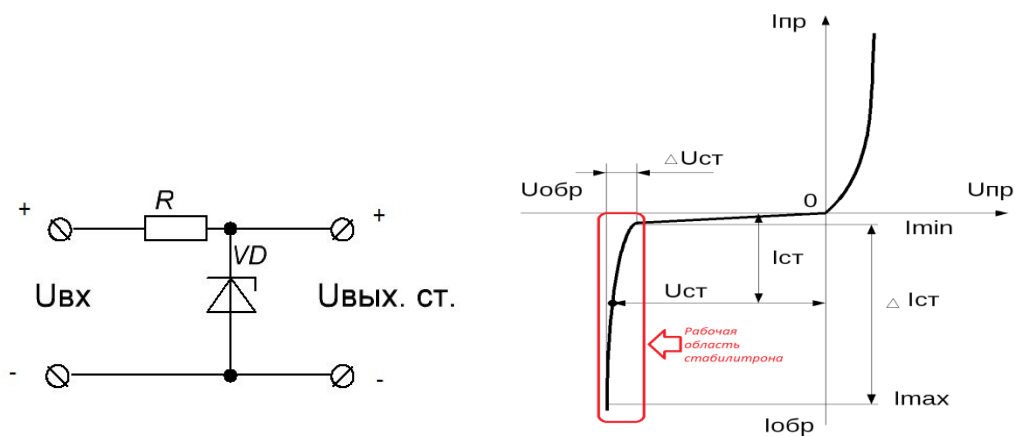
6. меза-диффузионная и меза-эпитаксиальная технологии - уменьшение площади перехода (для уменьшения емкостей и увеличения рабочих частот) специальным травлением



7. ЛОКОС-технология - уменьшение площади перехода локальным объемным окислением

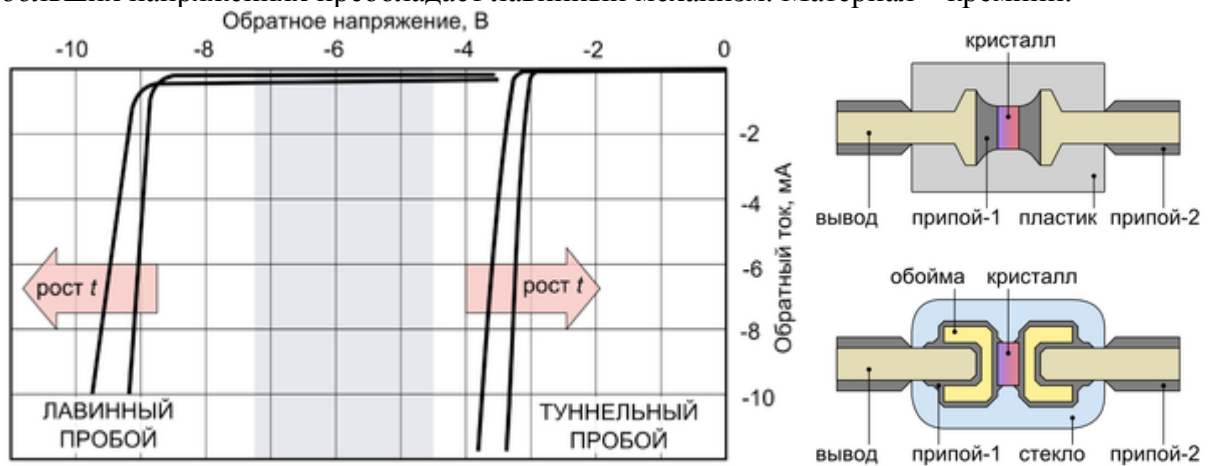


Полупроводниковый стабилитрон - это полупроводниковый диод, напряжение на котором в области электрического пробоя при обратном смещении слабо зависит от тока в заданном его диапазоне и который предназначен для стабилизации напряжения. В схемах стабилитрон включается последовательно с резистором: $U_{вх} = U_{вых.стаб} + U_{резистора}$



Серийные стабилитроны изготавливаются на напряжения от 1,8 В до 400 В. Интегральные стабилитроны со скрытой структурой на напряжение около 7 В являются самыми точными и стабильными твердотельными источниками опорного напряжения.

Туннельный механизм действует только при напряжениях пробоя до примерно 5,5 В, а при больших напряжениях преобладает лавинный механизм. Материал – кремний.



а) Вольт-амперные характеристики стабилитронов с преобладанием лавинного (слева) и туннельного (справа) механизмов пробоя б) Устройство маломощного стабилитрона с гибкими выводами в пластиковом (вверху) и стеклянном (внизу) корпусах

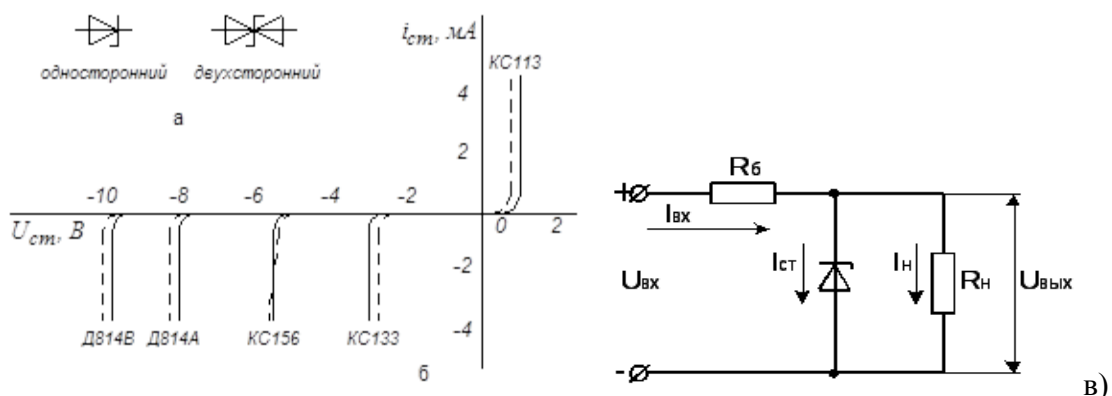


Рис. Условное обозначение (а) и вольт-амперные характеристики стабилитронов (б) штриховой линией показано перемещение вольт-амперных характеристик при увеличении температуры; в) схема стабилизатора на стабилитроне. При изменении входного напряжения изменяются ток через балластный резистор $R_б$ (ограничительный, гасящий) и ток через стабилитрон, а напряжение на нагрузке практически не меняется.

Стабистор это полупроводниковый диод напряжение, на котором в области прямого смещения слабо зависит от тока в заданном его диапазоне. Отличительной особенностью его по сравнению со стабилитроном является меньшее напряжение стабилизации, которое определяется прямым падением напряжения на диоде, и составляет 0,7В. Последовательное соединение двух, трёх и т. д. стабисторов даёт возможность получить удвоенное, утроенное напряжение стабилизации. Стабистор имеет отрицательный температурный коэффициент и поэтому часто используется для температурной компенсации стабилитрона с положительным температурным коэффициентом.

Основные параметры стабилитрона:

- **номинальное напряжение стабилизации $U_{ст.ном}$** — напряжение на стабилитроне в рабочем режиме (при заданном токе стабилизации);
- **минимальный ток стабилизации $I_{ст.мин}$** — наименьшее значение тока стабилизации, при котором режим пробоя устойчив;
- **максимально ток стабилизации $I_{ст.мах}$** — наибольший ток стабилизации, при котором нагрев стабилитронов не выходит за допустимые пределы.

Дифференциальное сопротивление $r_{ст}$ — отношение приращения напряжения стабилизации к вызывающему его приращению тока стабилизации: $r_{ст} = DU_{ст}/DI_{ст}$.

- **максимально допустимый прямой ток $I_{пр.и max}$, максимально допустимый импульсный ток $I_{пр.и max}$, максимально допустимую рассеиваемую мощность $P_{мах}$.**

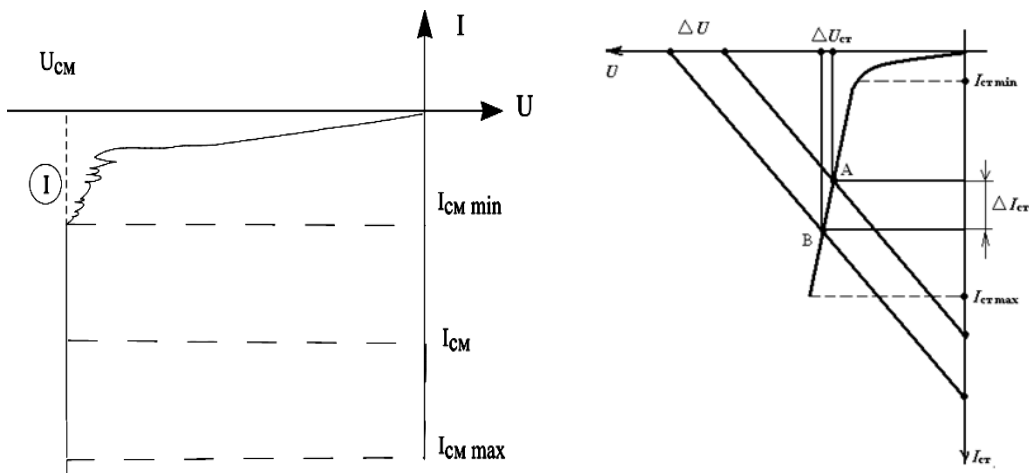
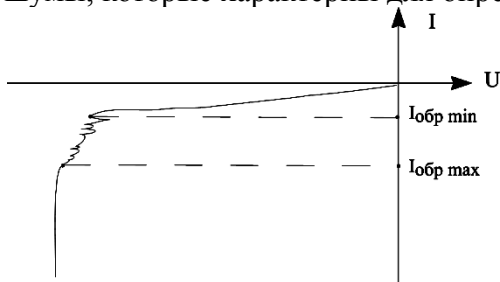


Рис. а) ВАХ стабилитрона

Шумовые диоды это стабилитроны, являющиеся источником шума заданной спектральной плотностью в определённом диапазоне частот. Результатом случайной неравномерности генерации новых носителей заряда при ударной ионизации являются шумы, которые характерны для определённых диапазонов тока.



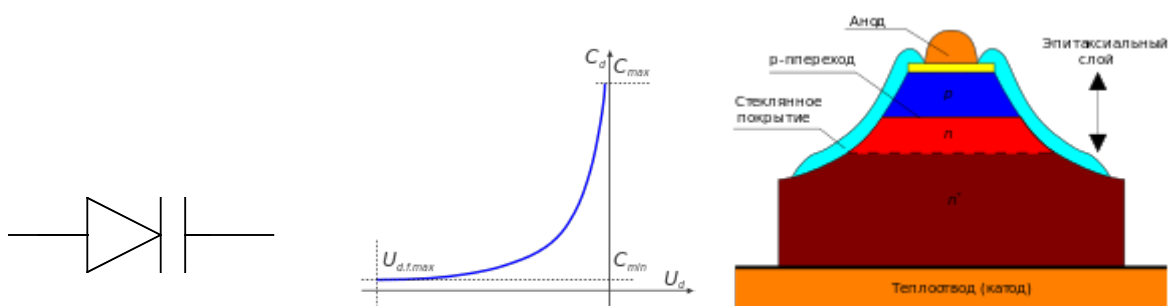
Основные параметры:

- 1) **спектральная плотность шума S** — это эффективное значение напряжения шума, отнесённое к 1Гц при заданном $I_{обр.}$.
- 2) **граничная частота равномерности спектра** — это наибольшая частота, при которой удовлетворяется заданное требование по неравномерности спектральной плотности шума.

Шумовые диоды используют в измерительной технике в качестве генераторов шумовых напряжений.

Варикапы. Это полупроводниковый диод, действие которого основано на использовании зависимости ёмкости от обратного напряжения, и который предназначен для работы в качестве элемента с электрически управляемой ёмкостью.

Нормальный режим работы варикапа — с обратным смещением. Если к диоду приложить обратное напряжение, то высота потенциального барьера увеличится. Внешнее обратное напряжение отталкивает электроны в глубь n-области, в результате чего происходит расширение обеднённой области р-n-перехода. Это можно представить в виде плоского конденсатора, в котором обкладками служат обеднённые зоны полупроводника и с переменной толщиной слоя диэлектрика. В соответствии с формулой для ёмкости плоского конденсатора, с ростом расстояния между обкладками (вызванной ростом значения обратного напряжения) ёмкость р-n-перехода будет уменьшаться.



Основные электрические и эксплуатационные параметры

- Общая ёмкость при заданном обратном напряжении.
- Коэффициент перекрытия - отношение ёмкостей при двух заданных значениях обратного напряжения на варикапе.
- Добротность — отношение реактивного сопротивления варикапа на заданной частоте к сопротивлению потерь при заданном значении ёмкости или обратного напряжения.
- Постоянный обратный ток утечки, протекающий через варикап при заданном обратном напряжении.
- Максимально допустимое постоянное обратное напряжение.
- Максимально допустимая рассеиваемая мощность.

Варикапы находят широкое применение для электронной подстройки резонансной частоты колебательных контуров. Изменяя напряжение на варикапе, подключенном к колебательному контуру, можно обеспечить дистанционное и безынерционное управление резонансной частотой контура. Так, например, для получения необходимых значений промежуточных частот в гетеродине телевизионного приемника должно предусматриваться плавное изменение частоты.

Варикапы с большой рассеиваемой мощностью, предназначенные для умножения частоты в радиопередатчиках, принято называть **варакторами**.

Туннельный диод — полупроводниковый диод на основе вырожденного полупроводника, в котором при приложении напряжения в прямом направлении туннельный эффект проявляется в появлении участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением на вольт-амперной характеристике. Эффект состоит в преодолении микрочастицей потенциального барьера в случае, когда её полная энергия (остающаяся при туннелировании неизменной) меньше высоты барьера.

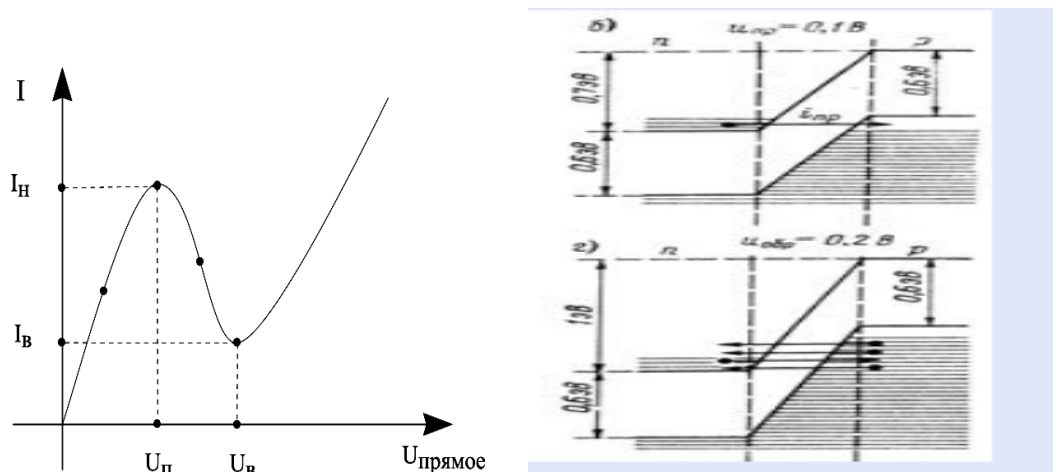
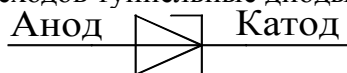


Рис. а) ВАХ туннельного диода б) Энергетические диаграммы $n - p$ -перехода в туннельном диоде

В туннельном диоде квантово-механическое туннелирование электронов добавляет прогиб в ВАХ, при этом из-за высокой степени легирования p - и n -областей напряжение пробоя уменьшается практически до нуля. Данная область отрицательного дифференциального сопротивления и используется для усиления слабых сверхвысокочастотных сигналов. Туннельные диоды изготавливают из материала имеющего повышенное количество примесей. В результате этого $p - n$ переход в туннельном диоде создаётся полупроводник с высокой концентрацией носителей зарядов, что приводит к малой толщине $p - n$ перехода и к большей величине диффузионного электрического поля.

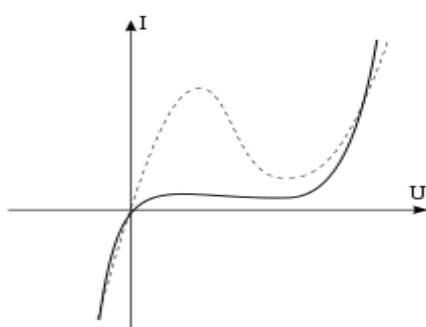
Для изготовления туннельных диодов используются **вырожденные полупроводники**, по характеру проводимости приближающиеся к металлам, поэтому рабочая температура этих диодов приближается к 400°C . Однако из-за низких рабочих напряжений и малых площадей переходов туннельные диоды имеют очень маленькую мощность.



Обозначение:

Наибольшее распространение на практике получили туннельные диоды из Ge, GaAs, а также из GaSb. Эти диоды находят применение в качестве предварительных усилителей, генераторов и высокочастотных переключателей. Они работают на частотах до $30 \dots 100$ ГГц.

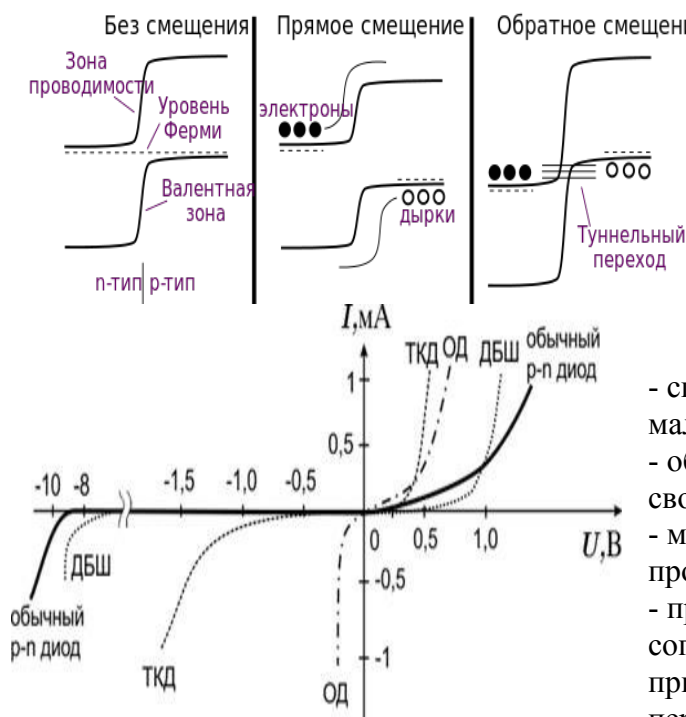
Обращённые диоды - проводимость при обратном смещении значительно больше, чем при прямом. Прямая ветвь ВАХ обращённого диода аналогична туннельному, а обратная ветвь ВАХ аналогична выпрямительному диоду. Обращённые диоды — это вырожденные туннельные диоды. Обратные токи у них велики уже при ничтожно малых обратных напряжениях (десятки милливольт) и значительно превосходят прямые токи в при таком же прямом напряжении. Максимальное рабочее обратное напряжение не превышает $0,7$ В.



Обозначение на схемах. От катода к аноду — прямое (проводящее) направление тока. От анода к катоду — обратное (запирающее) направление тока

Рис. ВАХ обращённого диода

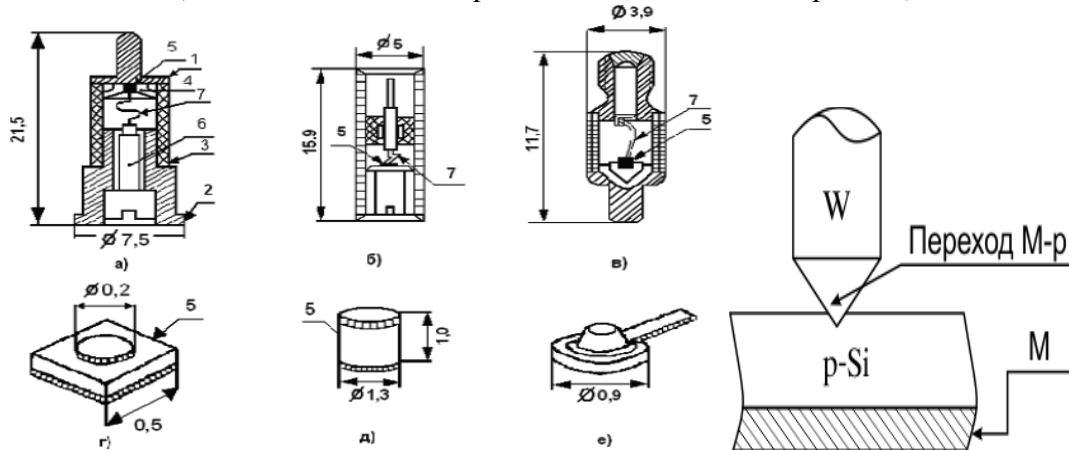
Обращенные диоды обладают выпрямляющим эффектом, но проводящее направление у них соответствует обратному включению, а запирающее — прямому. При этом все сказанное выше о быстродействии туннельных



диодов полностью распространяется и на обращенные диоды. Это позволяет использовать такие приборы для выпрямления малых сигналов на высоких и сверхвысоких частотах, в смесительных и переключательных схемах. Их дополнительным преимуществом является очень высокая чувствительность и низкий уровень шумов.

- способны работать только в диапазоне малых напряжений.
- обладают хорошими частотными свойствами.
- малочувствительны к воздействию проникающей радиации.
- при малых смещениях дифференциальное сопротивление диода очень велико, эти приборы применяются в коммутаторах и переключателях малых СВЧ-сигналов

Детекторный СВЧ диод. В диапазоне СВЧ применяют диоды, у которых отсутствует инжекция неосновных носителей и барьерная ёмкость очень мала, а нелинейность вольт-амперной характеристики сохраняется на частотах сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн. К ним относятся **диоды с контактом металл-полупроводник и туннельные диоды**. Конструкция некоторых детекторных СВЧ диодов, используемых в волноводных, коаксиальных и микрополосковых линиях передачи, показана на рисунке.



Переключатели СВЧ. Используются р-і-п-диоды, имеющие различные характеристики диода при прямом и обратном смещениях. *) Диод с р-і-п-структурой представляет собой тонкие высоколегированные р⁺- и п⁺- области кремния, разделенные сравнительно толстым (0,01 мм) слоем с собственной проводимостью i.

Элементарной ячейкой многодиодных переключателей является выключатель. Диодный выключатель представляет собой отрезок линии передачи с встроенным в него р-і-п-диодом. Он может быть собран по параллельной (рисунок 4.15,а) и последовательной (рисунок 4.15,б) схеме. В волноводных конструкциях, как правило, используют параллельную схему, а в коаксиальных и микрополосковых — как параллельную, так и последовательную, а также их комбинацию.

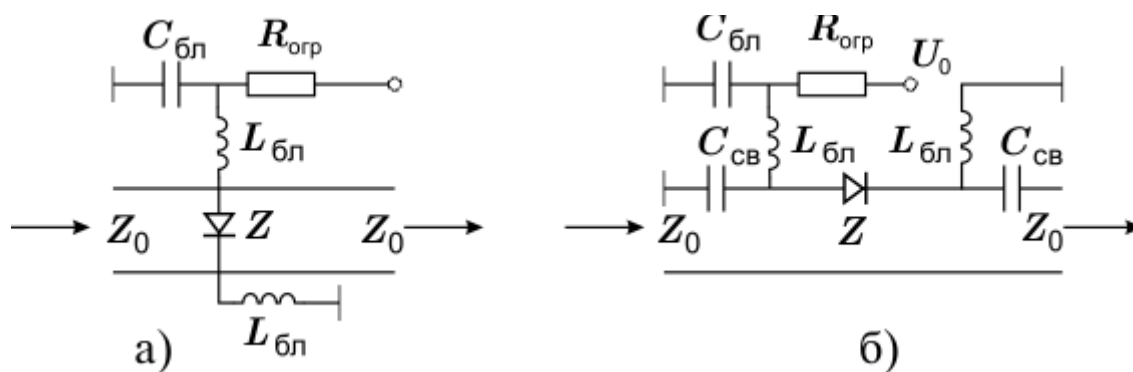


Рис. 4.15: Схемы диодного выключателя: а — параллельная; б — последовательная

Принцип работы выключателя основан на эффекте изменения сопротивления диода. Подавая прямое напряжение смещения $+U_0$ на диод по схеме рисунка 4.15,а, устанавливают значение тока до нескольких десятков миллиампер. При этом малое сопротивление r_+ практически закорачивает линию передачи. Энергия СВЧ отражается в сторону генератора — выключатель “закрыт”. При обратном смещении минус $-U_0$ большое сопротивление диода r_- не шунтирует линию передачи, выключатель “открыт”, т.е. пропускает энергию.

В последовательной схеме (рисунок 4.15,б) наоборот — прямое смещение диода обеспечивает пропускание СВЧ энергии в нагрузку, т.е. выключатель “открыт”, а при обратном смещении падающая волна отражается к генератору, выключатель “закрыт”.

Светодиодом (LED, Light-emitting diode) называется полупроводниковый прибор с одним p - n переходом, предназначенный для преобразования электрической энергии в световое излучение (излучающий некогерентный свет). Первый светодиод, излучающий свет в видимом диапазоне спектра, был изготовлен в 1962 году в университете Иллинойса. Условное графическое обозначение, структура и внешний вид светодиода представлены на рис.

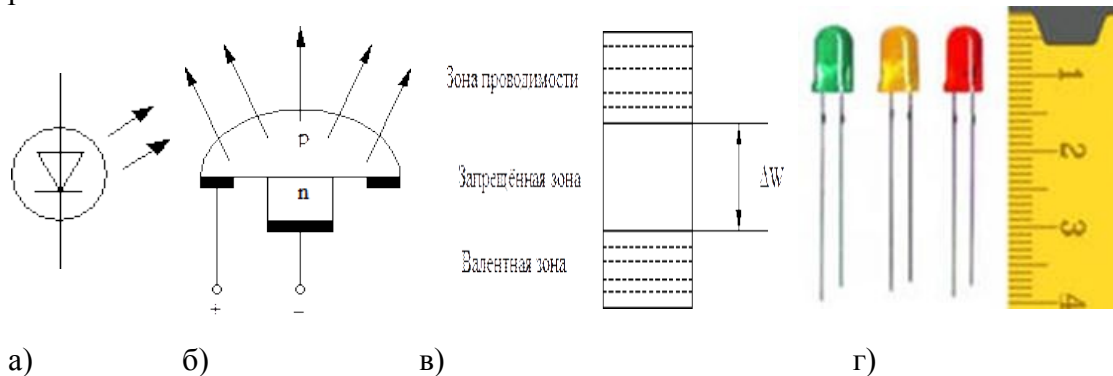


Рис. Светодиод:

а - условное графическое обозначение; б – структура; в – диаграмма энергетических уровней в полупроводнике; г) - внешний вид.

При прямом включении p - n перехода (снижении потенциального барьера) в процессе рекомбинации происходит переход электрона с высокого энергетического уровня в зоне проводимости (n) на низкий в валентной зоне (p). Разность энергий выделяется в виде кванта света (фотона). Диаграмма энергетических уровней в полупроводнике

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{\Delta W}$$

представлена на рис. Длина волны излучения определяется выражением $\lambda = \frac{h \cdot c}{\Delta W}$, где h – постоянная Планка, $h = 4,135 \times 10^{-15}$ эВ \times с; c – скорость света; ΔW – ширина запрещенной зоны.

При работе на светодиодах следует подавать прямое напряжение. Схема включения светодиода в цепь постоянного тока и его вольт-амперная характеристика представлены на рис. Напряжение на светодиоде определяет цвет свечения приборов. Например, для синих, зеленых и белых кристаллов напряжение составляет около 3В, для желтых и красных – от 1,8 до 2,4В.

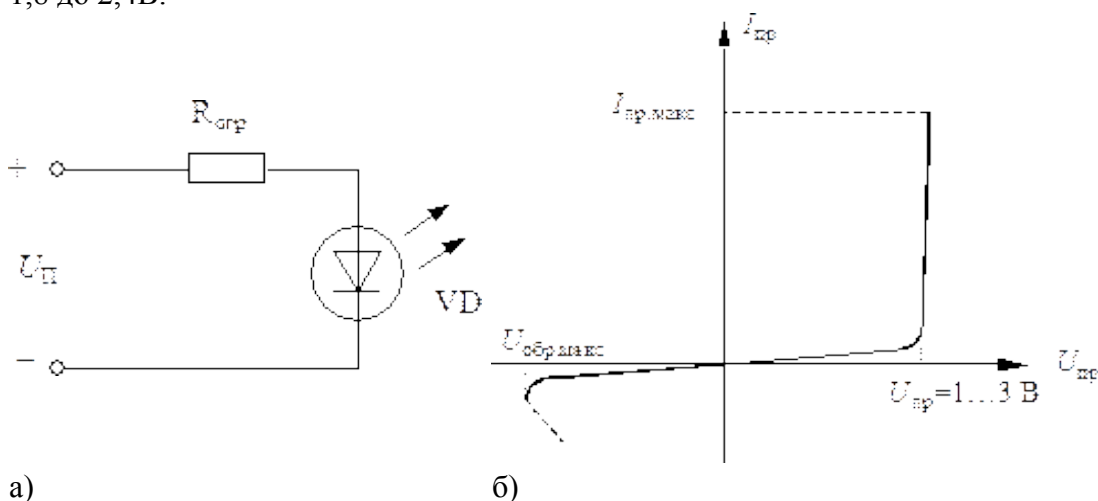


Рис. Схема включения светодиода (а) и его вольт-амперная характеристика (б)

Излучаемый светодиодом свет лежит в узком диапазоне спектра, его цветовые характеристики зависят от химического состава использованного в нем полупроводника. Для видимой части светового спектра длина волны 770...400 нм. Основным цветам соответствуют следующие границы длин волн (Каждый охотник желает знать где сидят фазаны):

фиолетовый: 390—440 нм; синий: 440—480 нм; жёлто-зелёный: 550—575 нм; жёлтый: 575—585 нм; голубой: 480—510 нм; зелёный: 510—550 нм; оранжевый: 585—620 нм; красный: 620 -770 нм.

Такие длины волн соответствуют разности энергий электрона $dW \approx 1,6...3,1$ эВ. Для получения видимого излучения ширина запрещённой зоны DW в полупроводнике должна быть более 1,6 эВ. Германий и кремний имеют $DW < 1,3$ эВ, поэтому светодиоды из таких материалов сделать нельзя.

Для светодиодов применяют другие полупроводниковые материалы, например:

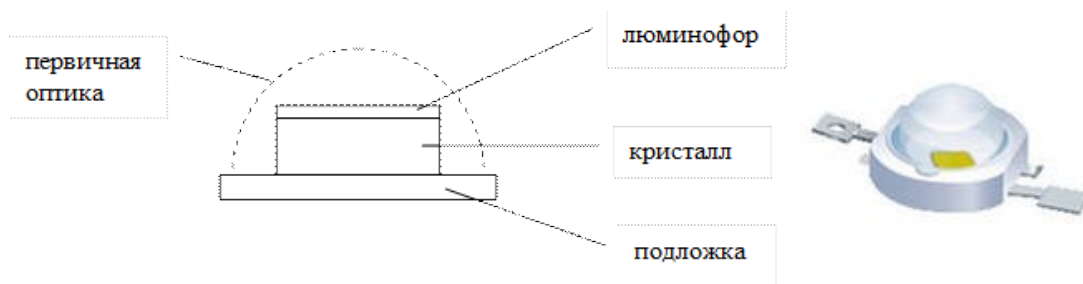
- арсенид галлия (GaAs) – инфракрасное излучение;
- арсенид галлия, легированный алюминием (AlGaAs) – красное свечение;
- арсенид галлия, легированный фосфором (GaAsP) – оранжевое свечение;
- фосфид галлия, легированный алюминием и индием (AlGaInP) – жёлтое свечение;
- фосфид галлия (GaP), легированный N(азотом) – зелёное свечение;
- карбид кремния (SiC), легированный (InGaN) – синее свечение.

Пример основных параметров для некоторых типов светодиодов представлен в таблице. Некоторые параметры светодиодов

Тип	Цвет свечения	Сила света, мкд (при токе, мА)	$U_{пр}$, В, не более	$I_{пр.макс}$, мА	Максимум спектрального распределения, мкм
АЛ307А	красный	0,15 (10)			0,666
АЛ307В	зелёный	0,4 (20)	2,8		0,57
КЛ101Б	жёлтый	0,15 (20)	5,5		0,6
АЛ107А	инфракрасный	Мощность излучения 60 мВт			0,9...1,2

Существуют также сверхяркие белые светодиоды, применяемые для освещения. Для получения белого света на кристалл синего светодиода наносят слой люминофора, который под действием синего излучения испускает жёлтый и красный свет. В результате

смешения синего, жёлтого и красного получается белый свет. Для получения требуемого угла излучения света применяется первичная оптика – линза.



а) б)
Рис. Конструкция (а) и внешний вид (б) белого светодиода

Излучение белых светодиодов характеризуется **цветовой температурой**. Она указывает на **спектральное распределение энергии излучения**, а не на температуру источника. Цветовая температура выражается в кельвинах (К). При большем значении световой температуры излучение характеризуется синеватым оттенком, при меньшем - желтоватым и даже красноватым (рис.).

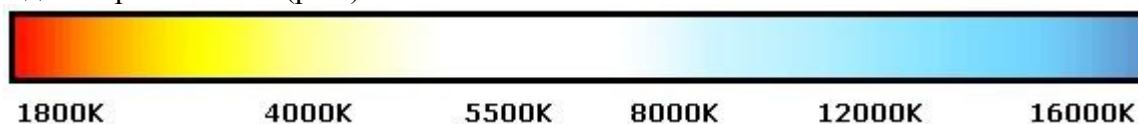


Рис. Зависимость оттенка белого света от световой температуры

Ток через белый светодиод составляет от 50 мА до 1 А при прямом напряжении от 3 до 3,6 В. Таким образом, мощность светодиода от 0,15 до 3,6 Вт. 30% этой мощности идёт на световое излучение, 70% выделяется в виде тепла. Для сравнения самая лучшая лампа накаливания выделяет в виде тепла 95% мощности, а люминесцентная лампа 80 - 85%. Для эффективного отвода выделяющегося тепла печатная плата для монтажа белых светодиодов выполняется из алюминия.

Мощные сверхяркие светодиоды XLamp. Их главной конструктивной особенностью является наличие радиатора для отвода тепла, вызванного большим рабочим током (350мА и выше).

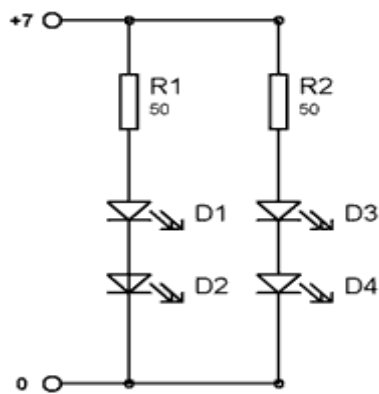
К преимуществам белых светодиодов как источников света следует отнести мгновенный (без разогрева) выход на рабочий режим, длительный срок службы, отсутствие пульсаций светового потока (питание светодиодов постоянным током).

Светодиод, как и любой полупроводник, обладает отрицательным температурным коэффициентом сопротивления, то есть с ростом температуры увеличивается прямой ток и снижается прямое напряжение светодиода. Поэтому применять для питания светодиодов стабилизатор напряжения нежелательно. Чтобы обеспечить нормальную работу светодиодов в широком диапазоне температур следует стабилизировать через них ток.

Работа светодиода зависит от температуры кристалла. С увеличением температуры яркость (сила света), а также падение напряжения на светодиоде уменьшается.

Зависимость яркости от температуры практически линейная, в интервале рабочей температуры может изменяться в 2-3 раза. Также с ростом температуры снижается срок службы. Для сверхярких светодиодов, номинальный ресурс не бывает выше 50...60 тыс. часов, цифра 100 000 часов может относиться только к индикаторным светодиодам.

Пример: Пусть имеются светодиоды с рабочим напряжением 3 вольта и рабочим током 20 мА. Надо подключить 4 светодиода к источнику 7 вольт. 4 светодиода по 3 вольта = 12 вольт, для последовательного подключения напряжения не хватит, поэтому будем подключать их последовательно-параллельно двумя группами по 2 светодиода.



$R = U_{\text{гасящее}} / I_{\text{светодиода}}$
 Упитания = 7 В
 $U_{\text{светодиода}} = 3 \text{ В}$
 $I_{\text{светодиода}} = 20 \text{ мА} = 0.02 \text{ А}$
 $R = (7 - 2 \cdot 3) / 0.02 = 50 \text{ Ом} = 0.05 \text{ кОм}$

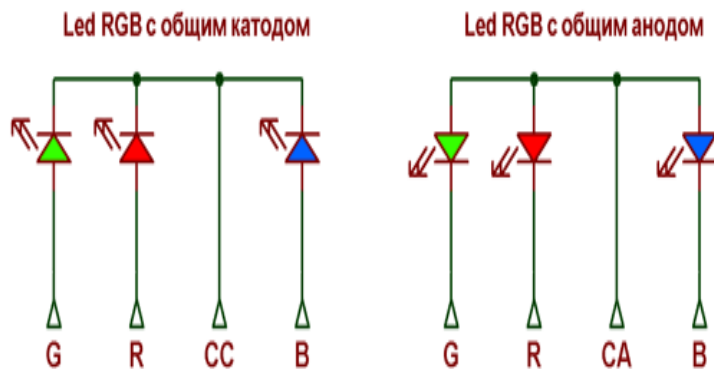
RGB-светодиоды



Полноцветный светодиод или RGB-светодиод - Red, Green, Blue. Смешивая эти три цвета в разной пропорции можно отобразить любой цвет. К примеру, если зажечь все три цвета на полную мощность (Red: 100%, Green: 100%, Blue: 100%), то

получится свечение белого цвета. Если зажечь только два (Red: 100%, Green: 100%, Blue: 0%), то будет светиться желтый цвет. Для некоторых типов RGB-светодиодов необходимо использовать рассеиватель, иначе будут видны составляющие цвета.

Конструктивно, RGB-светодиод состоит из трех кристаллов под одним корпусом и имеет 4 вывода: один общий и три цветовых вывода.



Самый длинный вывод RGB-светодиода, обычно является общим (анодом или катодом).

Напряжение, подаваемое для свечения цвета, может быть разным для разных цветов.

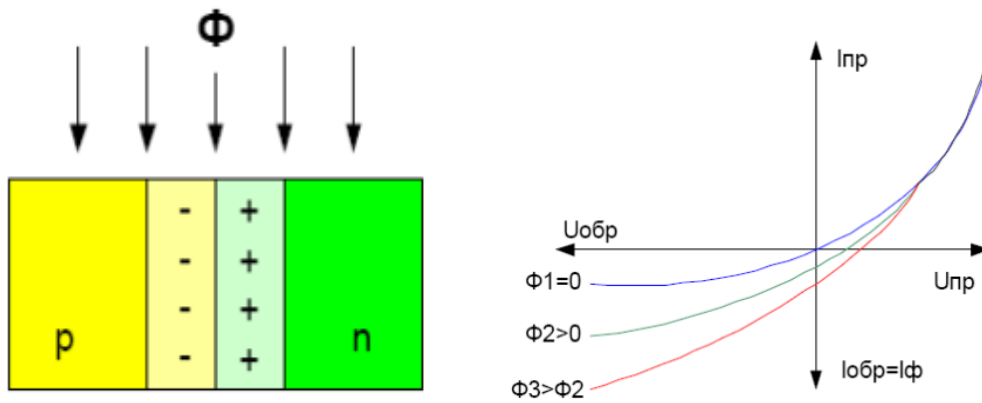
К примеру, возьмем 5мм светодиод MCDL-5013RGB ($I = 20 \text{ мА}$):

$U_{\text{red}} = 2.0 \text{ Вольт}$

$U_{\text{green}} = 3.5 \text{ Вольт}$

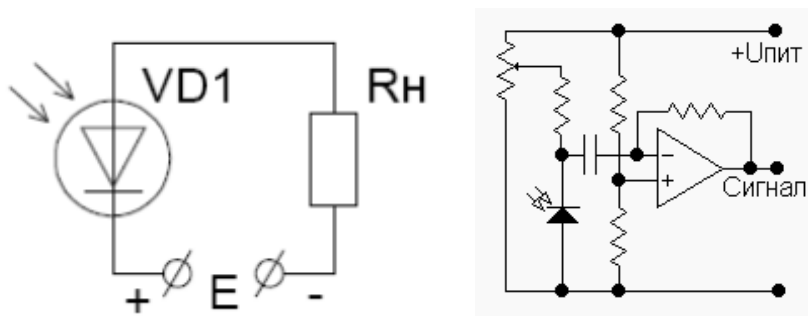
$U_{\text{blue}} = 3.5 \text{ Вольт}$

Фотодиоды. При облучении полупроводника световым потоком Φ возрастает фотогенерация собственных носителей зарядов, что приводит к увеличению количества как основных, так и неосновных носителей зарядов. Фотогенерация в значительной степени будет влиять на обратный ток (см. рисунок ниже.)



Для фотодиодов $I_{обр}$ – это фототок. Зависимость фототока $I_{ф}$ от величины светового потока $I_{ф}=f(\Phi)$.

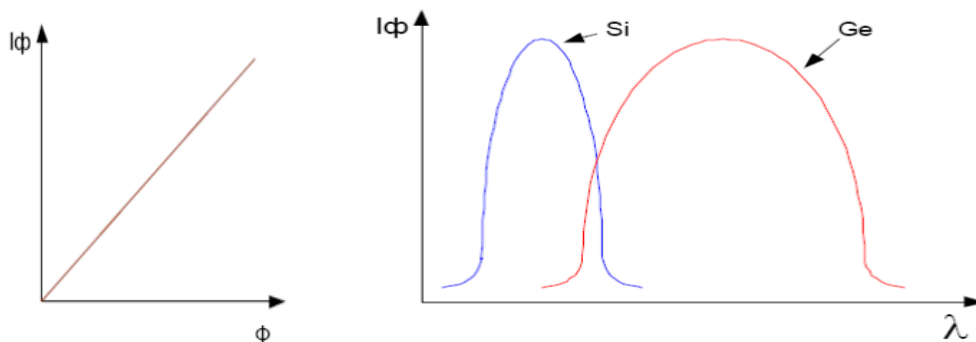
Схема включения фотодиода:



Фотодиод может работать в двух режимах:

- фотогальванический — без внешнего напряжения на его контактах появляется напряжение.
- фотодиодный — с внешним обратным напряжением изменяется обратный ток фотодиода, который регистрируют при помощи преобразователя ток-напряжение.

Спектральная характеристика – это зависимость фототока от длины волны светового излучения $I_{ф}=f(\lambda)$.



Темновой ток – ток через фотодиод при отсутствии светового потока и при заданном рабочем напряжении.

Интегральная чувствительность – это отношение фототока к световому потоку $S = \frac{I_{ф}}{\Phi}$
 Рабочее напряжение – это обратное напряжение, подаваемое на фотодиод, при котором все параметры фотодиода будут оптимальными.

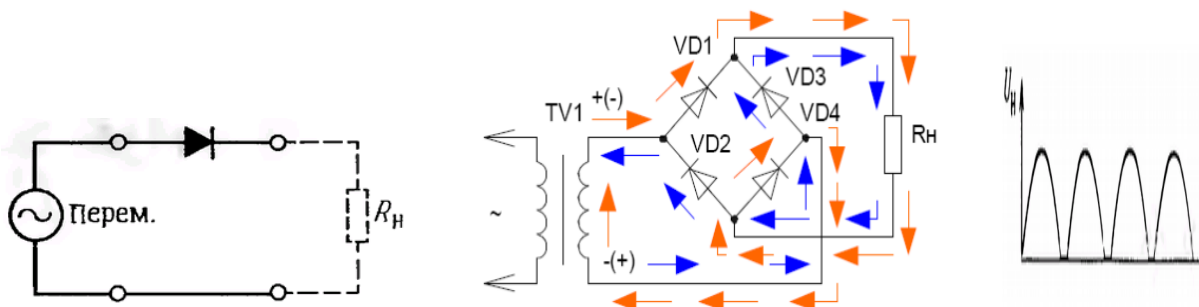
Применение диодов: Диоды являются одними из самых распространенных электронных компонентов. Они присутствуют практически во всех электронных приборах, которые мы ежедневно используем – от мобильного телефона до его зарядного устройства.

1. Нелинейная обработка аналоговых сигналов

Диоды относятся к элементам нелинейного типа и применяются в детекторах, логарифматорах, экстрематорах, преобразователях частоты и в других устройствах, в которых предполагается нелинейная обработка аналоговых сигналов. В таких случаях диоды используют или как основные рабочие приборы – для обеспечения прохождения главного сигнала, или же в качестве косвенных элементов, например в цепях обратной связи.

2. Выпрямители

В большинстве случаев они включают в себя три главных элемента – это силовой трансформатор, непосредственно выпрямитель (вентиль) и фильтр для сглаживания. Диоды применяют в качестве вентилях, так как по своим свойствам они отлично подходят для этих целей. Представленная схема называется *однополупериодным выпрямителем*, так как она использует только половину входного сигнала (половину периода).



3. Стабилизаторы

Диоды используются либо в цепях, отвечающих за опорные напряжения, либо в цепях, которые служат для коммутации накопительной индуктивности.

4. Ограничители

Ограничители – это специальные устройства, используемые для того, чтобы ограничивать возможный диапазон колебания различных сигналов. В цепях такого типа широко применяются диоды, которые имеют прекрасные ограничительные свойства.

5. **Устройства коммутации** используются для того, чтобы переключать токи или напряжения. Диодные мосты дают возможность размыкать или замыкать цепь, которая служит для передачи сигнала. В работе применяется некоторое управляющее напряжение, под воздействием которого и происходит замыкание или размыкание. Иногда управляющим может быть сам входной сигнал, такое бывает в самых простых устройствах.

6. Логические цепи

В логических цепях диоды применяются для того, чтобы обеспечить прохождение тока в нужном направлении (элементы «И», «ИЛИ»). Подобные цепи используются в схемах аналогового и аналогово-цифрового типа.

Светодиоды

Светодиоды могут излучать разные цвета и делятся на такие типы - 3 мм, 5мм, 8мм, SMD 0603, Top type, мигающий диод, диод с резистором, Star PCB, Emitter. В сравнении с традиционными лампами светодиоды обладают многими преимуществами – это экономичность, прочность, яркость света, долговечность, низкий нагрев в процессе работы. Что касается недостатков, то главным из них является цена, так как подобные приборы стоят достаточно дорого.

1. Одиночные светодиоды

Подобные устройства широко используются в самой разной аппаратуре в качестве лампочек индикации, которые чаще всего свидетельствуют о том, включен или выключен прибор. Кроме того, они применяются для освещения различных небольших пространств, например в автомобилях.

2. 7-Segment индикаторы.

Технология Seven-Segment Display с использованием светодиодов применяется в электронных часах, в различных измерительных приборах и в других технических средствах, которые предполагают отображение цифровой информации на дисплее. В таких целях светодиоды используются еще с 1910 года, но они не потеряли своей актуальности и сейчас. 7-Segment позволяет отображать простейшие данные на дисплее самым простым способом и с низкими энергозатратами.

3. Матрица светодиодов

Светодиодная матрица представляет собой определенное количество светодиодов, которые размещаются на одной площадке. Главные характеристики таких устройств это яркость и размеры. Большое количество применяемых диодов позволяет добиться высоких показателей освещения. Устанавливаются подобные матрицы чаще всего в специальных плафонах, которые могут использоваться в различных местах, например в салоне автомобиля, в его бардачке или в багажнике.

4. LED телевизоры. Принцип работы основывается на использовании светодиодов. Они дают возможность добиться хорошего качества изображения и позволяют экономить на электроэнергии. Благодаря небольшим размерам таких диодов, телевизионные экраны имеют значительно меньшую толщину, чем у традиционных моделей. Кроме того, подобные устройства характеризуются надежностью и достаточно большим сроком службы. Все телевизоры, изготовленные по этой технологии, имеют боковую подсветку экрана и подсветку за матрицей.

OLED – органическая пиксельная матрица в виде полимерных пленок.

