

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

Применение диодов: Диоды являются одними из самых распространенных электронных компонентов. Они присутствуют практически во всех электронных приборах, которые мы ежедневно используем (TV, мобильный телефон, зарядка). Используется нелинейность прямой ветви вольт – амперной характеристики (ВАХ), односторонняя проводимость, явление пробоя в обратной ветви ВАХ, наличие барьерной емкости $p-n$ перехода и ее зависимость от величины обратного напряжения.

Все полупроводниковые диоды можно разделить на группы: **выпрямительные, светодиоды 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. Положительные качества полупроводниковых диодов реализуются с помощью различных электрических схем.

1. Выпрямители

В большинстве случаев ИП 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.

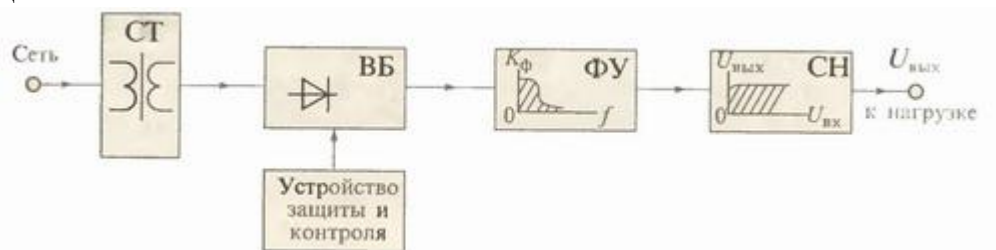
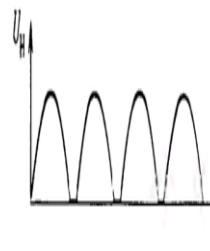
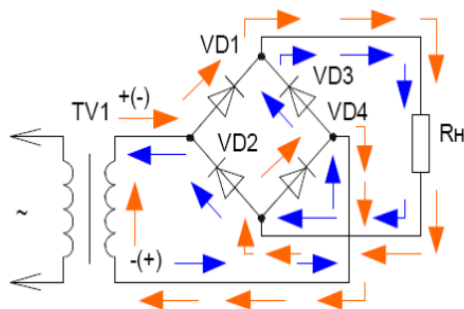
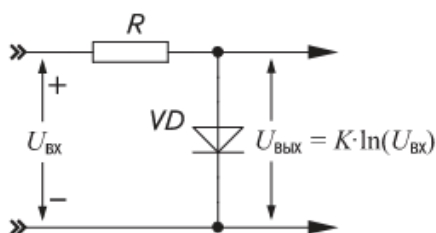


Рис. 1. Обобщенная структурная схема выпрямителя.



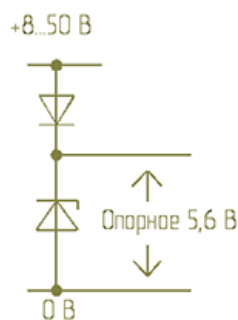
Двухполупериодный

2. Нелинейная обработка аналоговых сигналов



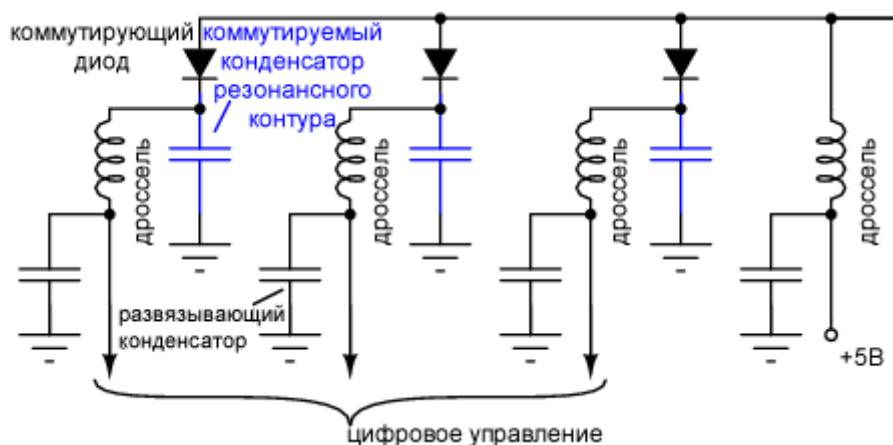
Диоды относятся к элементам нелинейного типа и применяются в детекторах, логарифматорах, экстрематорах, ограничителях, преобразователях частоты и в других устройствах, в которых предполагается **нелинейная обработка аналоговых сигналов**. В таких случаях диоды используют или как основные рабочие приборы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

косвенных элементов, например в цепях обратной связи.

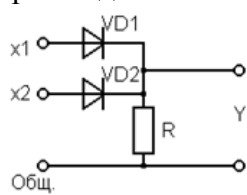


3. Стабилизаторы. Диоды используются либо в цепях, отвечающих за опорные напряжения, либо в цепях, которые служат для коммутации накопительной индуктивности.

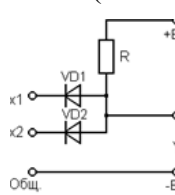
4. Устройства коммутации используются для того, чтобы переключать токи или напряжения. Диодные мосты дают возможность размыкать или замыкать цепь, которая служит для передачи сигнала. В работе применяется некоторое управляющее напряжение, под воздействием которого и происходит замыкание или размыкание.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



5. Логические цепи. В логических цепях диоды применяются для того, чтобы обеспечить прохождение тока в нужном направлении (элементы «И», «ИЛИ»).



A	B	$A \vee B$
1	1	1
1	0	1
0	1	1
0	0	0



A	B	$A \wedge B$
1	1	1
1	0	0
0	1	0
0	0	0

6. 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 некоторые приборы стоят достаточно дорого.

6.1. Одиночные светодиоды

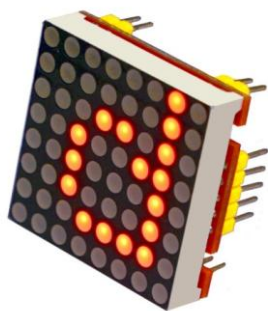
Подобные устройства широко используются в самой разной аппаратуре в качестве лампочек индикации, которые чаще всего свидетельствуют о том, включен или выключен прибор. Кроме того, они применяются для освещения различных небольших пространств, например в автомобилях.



6.2. 7'Segment индикаторы.

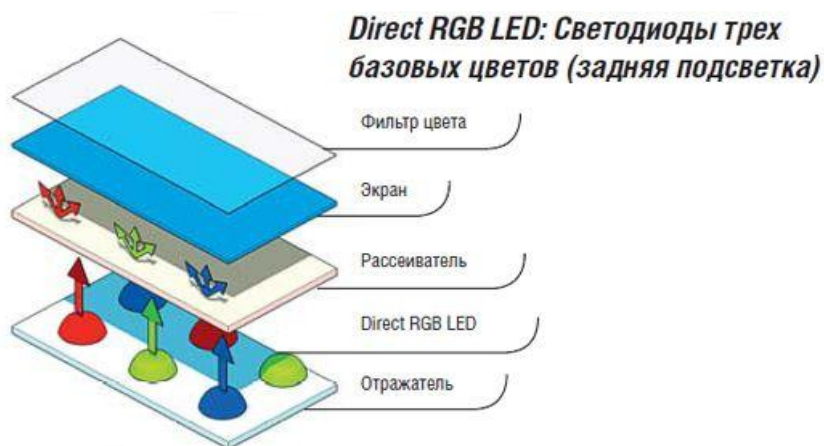
Технология Seven-Segment Display с использованием светодиодов применяется в электронных часах, в различных измерительных приборах и в других технических средствах, которые предполагают отображение цифровой информации на дисплее. 7'Segment позволяет отображать простейшие данные на дисплее самым простым способом и с низкими энергозатратами.

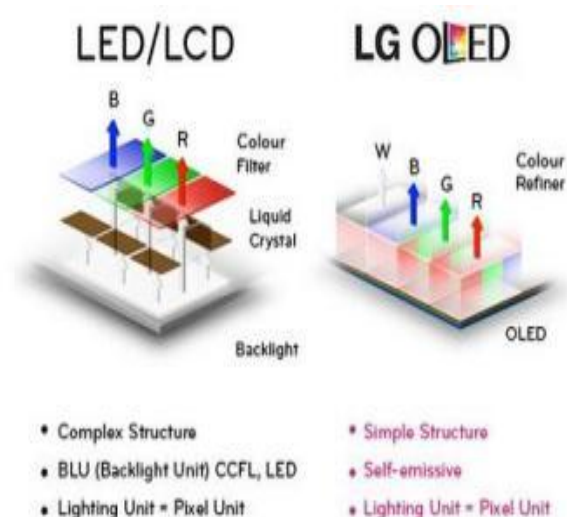
6.3. Матрица светодиодов



Arduino Max7219 Матрица 8x8. Светодиодная матрица представляет собой определенное количество светодиодов, которые размещаются на одной площадке. 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.

6.4. LED телевизоры. Принцип работы основан 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**. Такая матрица способна не только "высвечивать" различные участки изображения с заданной яркостью, но и обеспечивать "засветку" нужной цветовой гаммой, в результате чего, изображения получается максимально чётким и красивым.



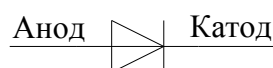


Для создания **органических светодиодов (OLED)** используются **тонкопленочные многослойные структуры полимеров**. Катод отдает электроны в эмиссионный слой, а анод отдает дырки в проводящий слой. Эмиссионный слой получает отрицательный заряд, а проводящий слой положительный. Под действием электростатических сил электроны и дырки движутся навстречу друг к другу и при встрече рекомбинируют с выделением (эмиссией) электромагнитного излучения в области видимого света. Чтобы зажечь пиксель, необходимо включить соответствующую строку и столбец: на пересечении строки и столбца пиксель

будет излучать свет. При обратном направлении тока излучения нет (диод). **OLED-телевизор - "подсветка"**, вообще отсутствует, диоды основных цветов, формирующие изображение, в том числе белые (white), расположены прямо "на экране" и светят сами.

Выпрямительные силовые диоды.

Обозначение



Электрические параметры



- $I_{обр}$ – постоянный обратный ток, мкА;
- $U_{пр}$ – постоянное прямое напряжение, В;
- $I_{пр\ max}$ – максимально допустимый прямой ток, А;
- $U_{обр\ max}$ – максимально допустимое обратное напряжение, В;
- P_{max} – максимально допустимая мощность, рассеиваемая на диоде;
- Рабочая частота, кГц;
- Рабочая температура, С.

Первые силовые полупроводниковые диоды - т.н. **купроксные и селеновые выпрямители**;

В первых - медная пластина со слоем окиси меди с нанесенной поверх металлизацией (выпрямляющий контакт $Cu-Cu_2O$);

Во вторых - металлическая пластина, покрытая слоем закристаллизованного селена, поверх которого нанесен слой легирующего металла (переход $p-Se - n-Se$)

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 р-n-переход.

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: - 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 и выдерживающие большие токи при небольших напряжениях.

Материалом для мощных диодов обычно служит кремний или арсенид галлия. Германий практически не применяется. 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 Шотки) могут использоваться на частотах до 500 кГц. Арсенид галлиевые диоды способны работать в диапазоне частот до нескольких МГц. Основные параметры диодов $U_{обр}$, $I_{пр}$, $I_{пр\text{ или }T}$, $I_{обр}$, C_pF , $F_{гр}$.

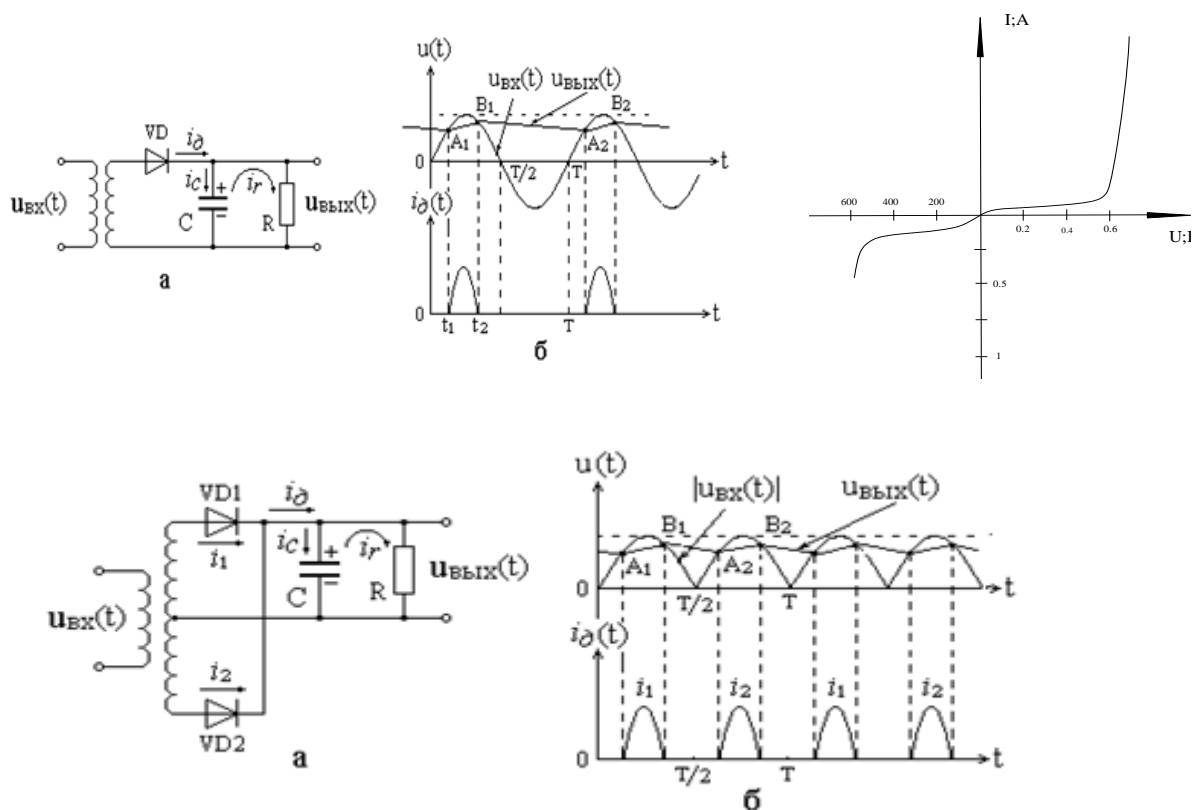


Рис. Схема двухполупериодного выпрямителя

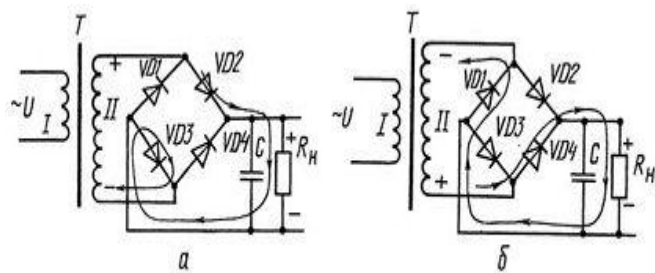
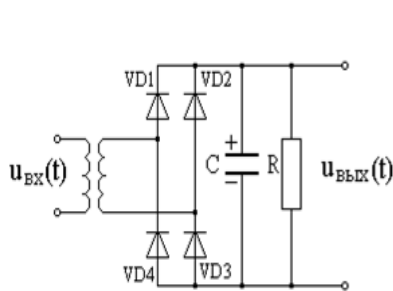
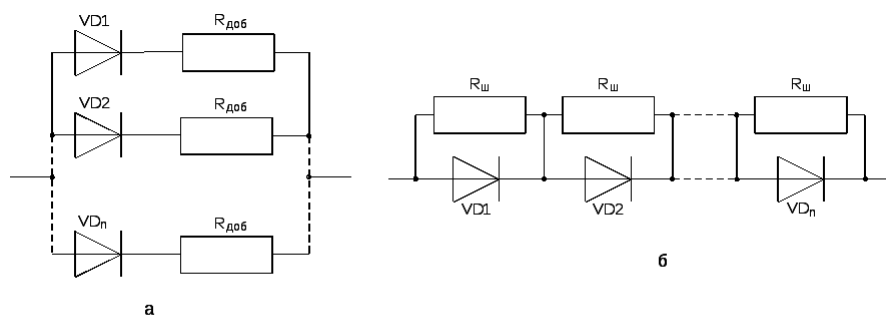


Схема двухполупериодного мостового выпрямителя

В высоковольтных устройствах широко применяют **высоковольтные столбы**, которые скомпонованы из диодов, соединенных **последовательно**. 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.

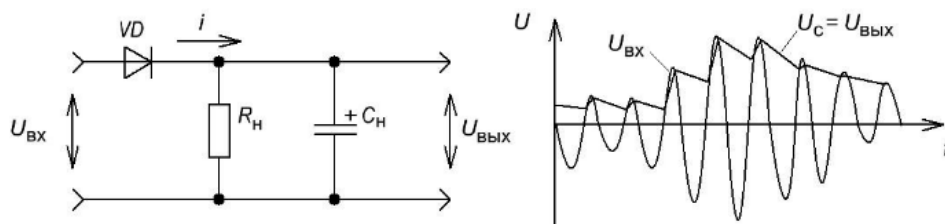
При разработке выпрямительных схем может возникнуть необходимость получить выпрямленный ток, превышающий предельно допустимое значение для одного диода. В этом случае применяют **параллельное** включение однотипных диодов.



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.

Детекторные диоды. Детектор — в общем случае аппаратное или программное средство, выдающее определённый сигнал при наступлении заданного события. **Детектор** в электрической цепи обнаруживает электромагнитные колебания. В радиоприемнике - это узел, отделяющий полезный сигнал модуляции от несущей составляющей.



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

На вход диодного детектора подаётся тональный АМ сигнал $U_{ам}(t) = U_0(1 + M \cos \Omega t) \cos \omega t$. 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 $i = a_0 + a_1 u + a_2 u^2$ – **квадратичный детектор**. Полезная информация содержится в низкочастотной составляющей. Высокочастотные составляющие с частотой ω не проходят через низкочастотный фильтр на выходе детектора. Квадратичное детектирование вносит существенное искажение формы сигнала, но имеет большую чувствительность. Этот вид детектирования используют в основном в измерительной технике и радиолокации.

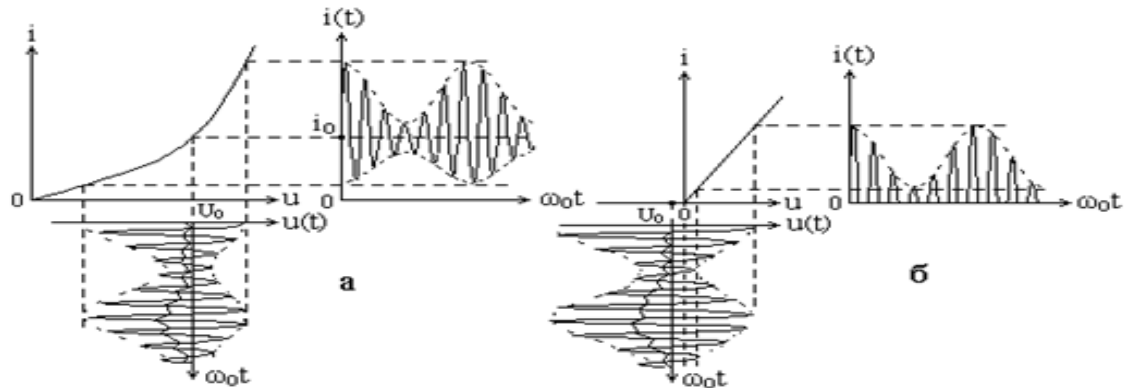
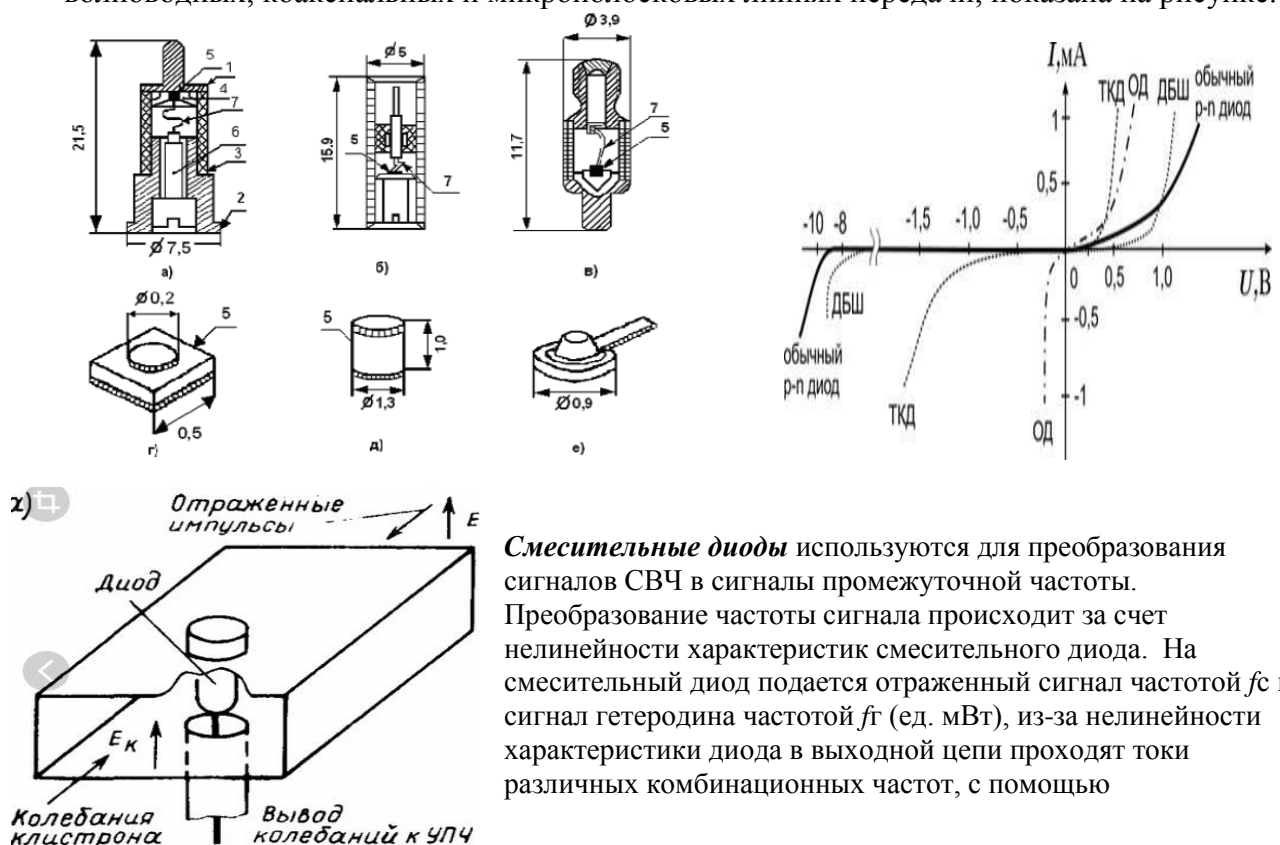


Рис. Квадратичное (а) и линейное (б) детектирование

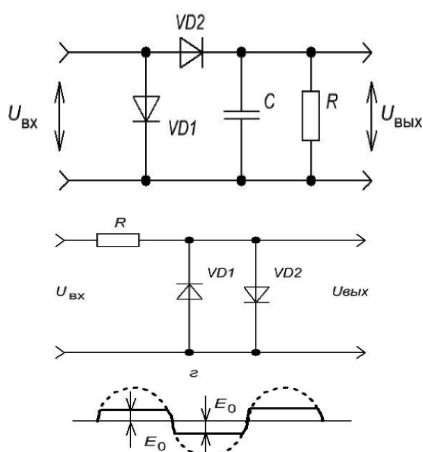
Для работы детектора в **линейном режиме** входное напряжение должна быть порядка **1...1,5 В**, чтобы рабочий участок располагался на линейном участке характеристики диода. У линейного диодного детектора меньше величина нелинейных искажений и выше коэффициент передачи, чем у квадратичного.

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.



Смесительные диоды используются для преобразования сигналов СВЧ в сигналы промежуточной частоты. Преобразование частоты сигнала происходит за счет нелинейности характеристик смесительного диода. На смесительный диод подается отраженный сигнал частотой f_c и сигнал гетеродина частотой f_H (ед. мВт), из-за нелинейности характеристики диода в выходной цепи проходят токи различных комбинационных частот, с помощью

колебательного контура, настраиваемого на промежуточную частоту $f_c - f_t$, выделяется сигнал промежуточной частоты. По постоянному току подбирается рабочая точка.



Для повышения выходного напряжения детектора иногда используется схема с удвоением напряжения (рис. 4). В такой схеме в течение одного полупериода напряжения через диод VD2 конденсатор C заряжается до амплитудного значения U_0 , а в течение следующего полупериода конденсатор заряжается до двойного амплитудного напряжения через диод VD1.

Широкое распространение нашли **ограничители** на диодах рис. Уровни ограничения в этой схеме равны пороговым напряжениям диодов ($0,5 \div 0,6$ В).

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.

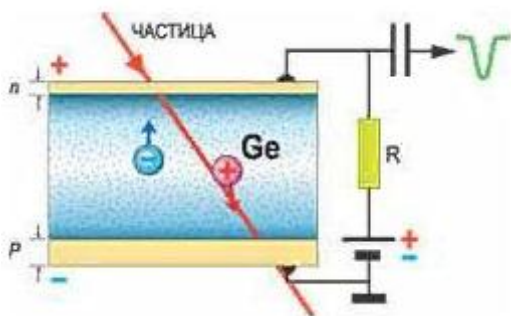
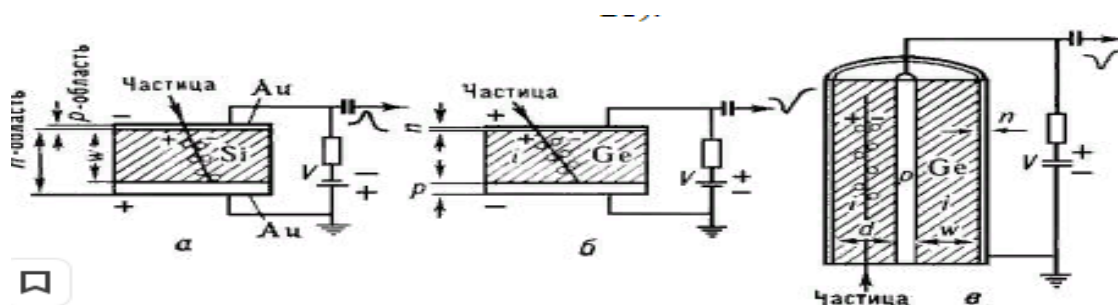


Рис. Устройство кремниевого детектора

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 (\sim 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.



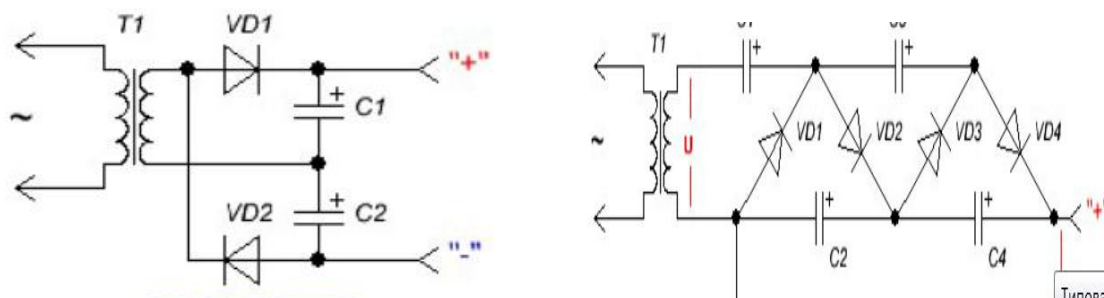
Значение энергии, необходимой на образование электронно-дырочной пары в полупроводнике примерно в 10 раз меньше, чем на образование ион-электронной пары в газе, При прочих равных условиях амплитуда сигнала от полупроводникового счетчика в 10 раз больше амплитуды сигнала от ионизационной камеры.



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

Умножители напряжения — это 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 умножилось значение напряжения.

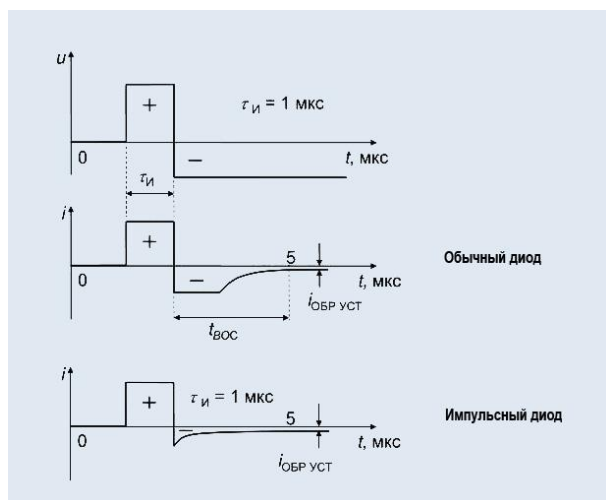
Симметричный удвоитель напряжения



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).

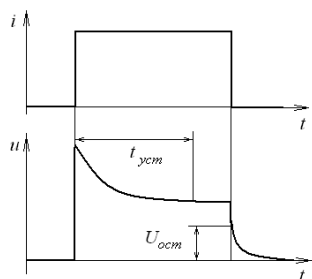


Импульсные диоды оптимизированны по собственной ёмкости, времени восстановления обратного сопротивления (рассасывания неосновных носителей) для работы в импульсном режиме. Основное применение: работа в качестве коммутирующих элементов в цифровых схемах, для детектирования высокочастотных сигналов и в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

преобразовательной технике.

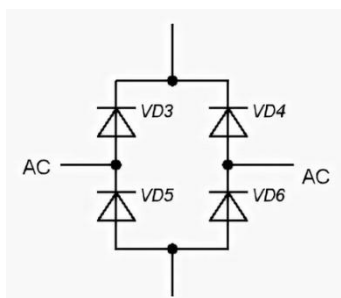
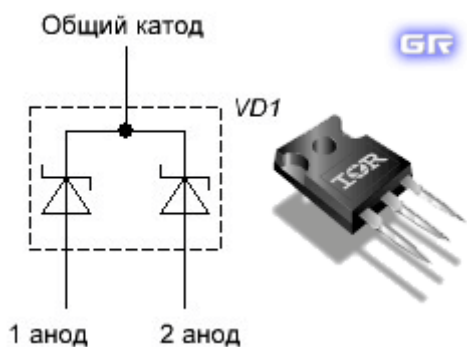
Рис. Импульс обратного тока

В число основных параметров импульсного диода входят следующие: ёмкость; максимальное импульсное прямое напряжение; максимальный импульсный прямой ток; время восстановления обратного сопротивления, длительность установления прямого напряжения.



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 (инжектирование). 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.

Диод Шоттки в сравнении с кремниевыми диодами, имеют меньше на $0,3 \div 0,5$ В прямое падение напряжения и на $2 \div 3$ порядка больше обратные токи. Они обладают высоким быстродействием, т.е. малым временем перехода из проводящего состояния в непроводящее, и обратно. В схемах встречаются сдвоенные диоды Шоттки (сборки). Выводы катодов или анодов у них объединены. Поэтому такая сборка имеет три вывода

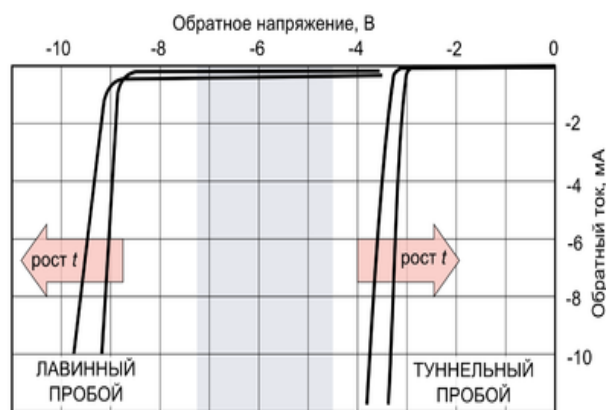
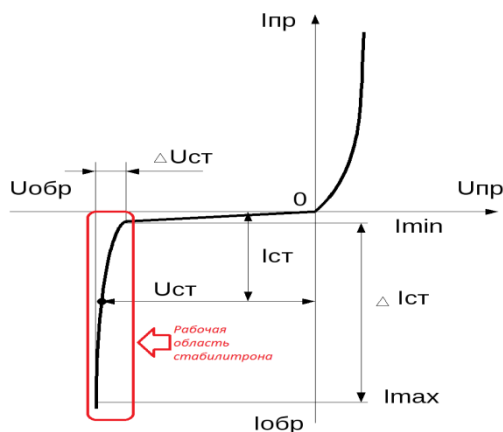


Малое падение напряжения проявляется при приложенном напряжении не более 50-60 вольт. При дальнейшем его повышении диод Шоттки ведёт себя как обычный кремниевый выпрямительный диод.

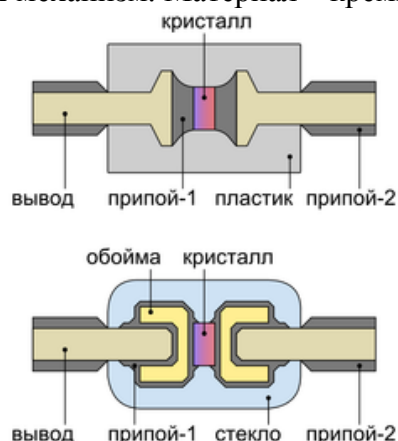
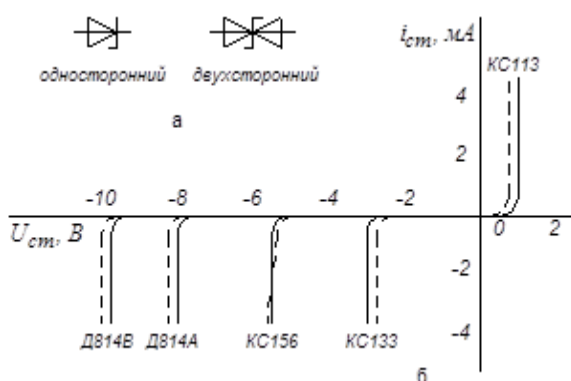
Максимальное обратное напряжение для Шоттки обычно не превышает 250 вольт, прямой ток от 30 до 300А.

Преимущественное применение выпрямительных диодов Шоттки – высокочастотные устройства, например, низковольтные выпрямители. Недостатки - даже при кратковременном превышении обратного напряжения они мгновенно и необратимо выходят из строя. В то время как кремниевые силовые вентили после прекращения действия превышенного напряжения прекрасно самовосстанавливаются и продолжают работать.

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.



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 стабилизаторов с преобладанием лавинного (слева) и туннельного (справа) механизмов пробоя б) Устройство маломощного стабилизатора с гибкими выводами в пластиковом (вверху) и стеклянном (внизу) корпусах

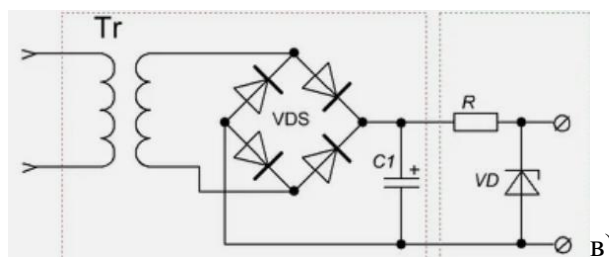
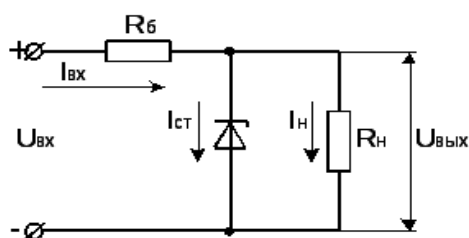
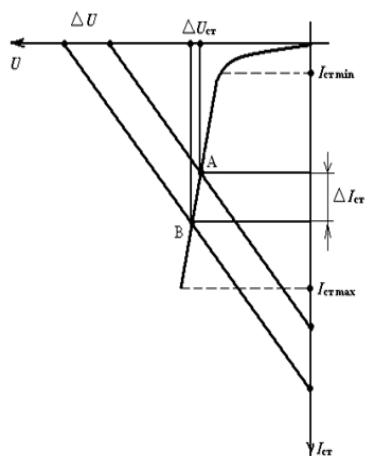


Рис. Условное обозначение (а) и вольт-амперные характеристики стабилизаторов (б) штриховой линией показано перемещение вольт-амперных характеристик при увеличении температуры; в) схема стабилизатора на стабилизаторе. При изменении входного напряжения изменяются ток через балластный резистор $R_б$ (ограничительный, гасящий) и ток через стабилизатор, а напряжение на нагрузке практически не меняется. В схемах стабилизатор включается последовательно с резистором:

$$U_{вх} = U_{вых.стаб} + U_{резистора}$$



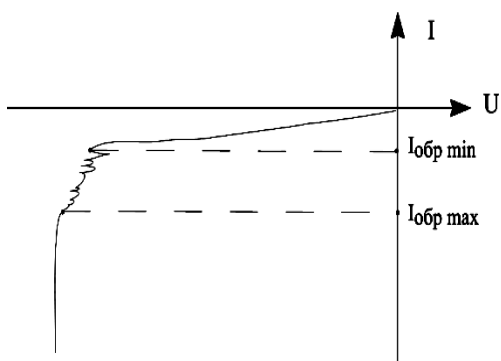
Серийные стабилизаторы изготавливаются на напряжения от 1,8 В до 400 В. Интегральные стабилизаторы со скрытой структурой на напряжение около 7 В являются самыми точными и стабильными твердотельными источниками опорного напряжения.

Основные параметры стабилизатора:

- **номинальное напряжение стабилизации** $U_{ст\ ном}$ — напряжение на стабилитроне в рабочем режиме (при заданном токе стабилизации);
- **минимальный ток стабилизации** $I_{ст.min}$ — наименьшее значение тока стабилизации, при котором режим пробоя устойчив;
- **максимально ток стабилизации** $I_{ст.max}$ — 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_{max} ,
- **максимально допустимый импульсный ток** $I_{пр.и\ max}$,
- **максимально допустимую рассеиваемую мощность** P_{max} .

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.

Шумовые диоды - это стабилитроны, являющиеся источником шума заданной



спектральной плотностью в определённом диапазоне частот при малых токах. Результатом случайной неравномерности генерации новых носителей заряда при ударной ионизации являются шумы, которые характерны для определённых диапазонов тока.

Основные параметры:

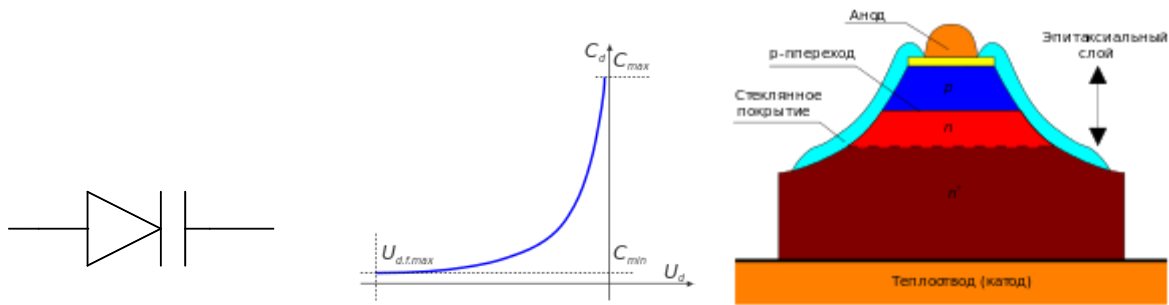
- 1) спектральная плотность шума S — это эффективное значение напряжения шума, отнесённое к 1Гц при заданном $I_{обp}$.
- 2) граничная частота равномерности спектра — это

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 полупроводниковые диоды, действие которых основано на использовании зависимости ёмкости от обратного напряжения, и которые предназначены 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 вглубь n-области, в результате чего происходит расширение обеднённой области p-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 p-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.

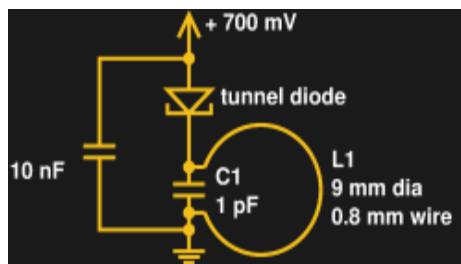
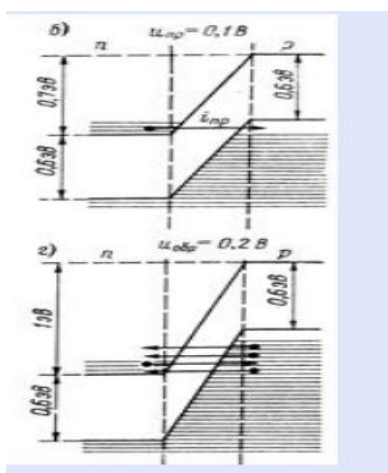
Варикапы с большой рассеиваемой мощностью, предназначенные для умножения частоты в радиопередатчиках, принято называть **варакторами**.



Туннельные диоды изготавливают из материала имеющего повышенное количество примесей. В результате этого 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.

Наибольшее распространение на практике получили туннельные диоды из Ge, GaAs, а также из GaSb. Эти диоды находят применение в качестве предварительных усилителей,

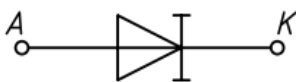
генераторов и высокочастотных переключателей. Они работают на частотах до 30...100 ГГц.



Колебательный контур состоит из одного витка диаметром в 9 мм и конденсатора на 2 пФ. Конденсатор на 10 нФ замыкает генерируемые колебания на себя, не пропуская их в цепь

питания. Напряжение питания составляет 700 мВ, частота 300 МГц.

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



Обращённые диоды

- — это вырожденные туннельные диоды, проводимость при обратном смещении значительно больше, чем при прямом. Прямая ветвь ВАХ обращённого диода аналогична туннельному, а обратная ветвь ВАХ аналогична выпрямительному диоду. Максимальное рабочее обратное напряжение не превышает 0,7 В.

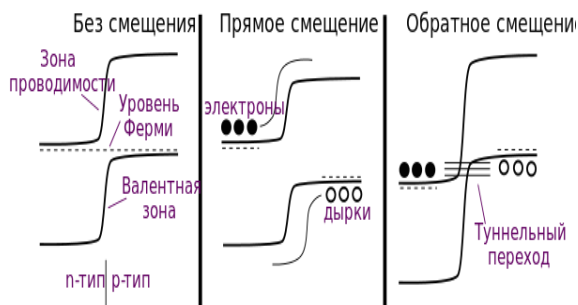
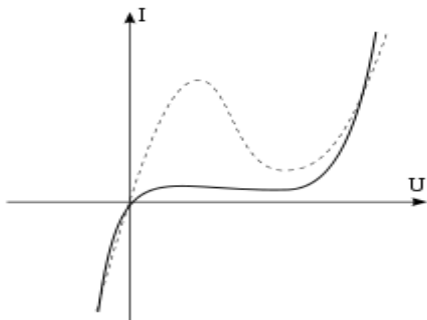


Рис. ВАХ обращённого диода

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**.

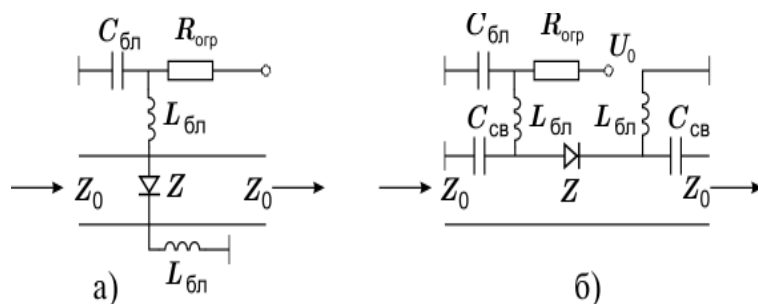
Переключатели СВЧ. Используются $p-i-n$ -диоды, имеющие различные характеристики диода при прямом и обратном смещениях. *) Диод с $p-i-n$ -структурой представляет собой тонкие высоколегированные p^+ - и n^+ -области кремния, разделенные сравнительно толстым (0,01 мм) слоем с собственной проводимостью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

Элементарной ячейкой многодиодных переключателей является выключатель. Диодный выключатель представляет собой отрезок линии передачи с встроенным в него $p-i-n$ -диодом.



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.

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.



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”.

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

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.

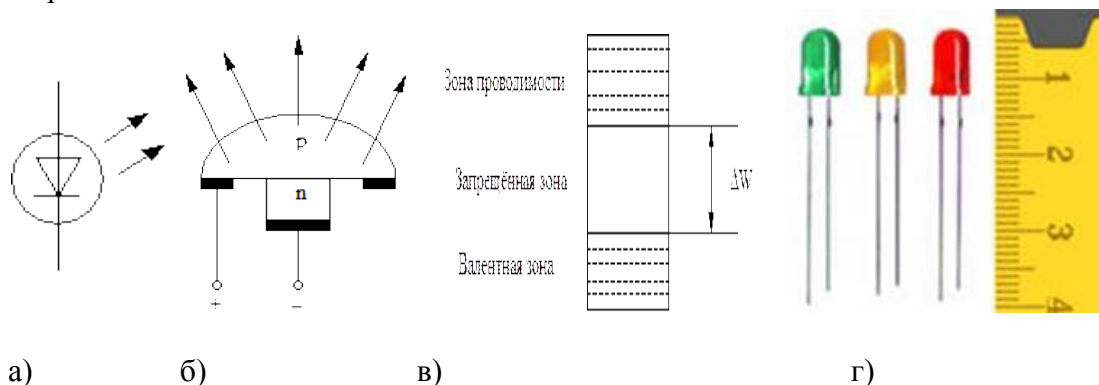


Рис. Светодиод:

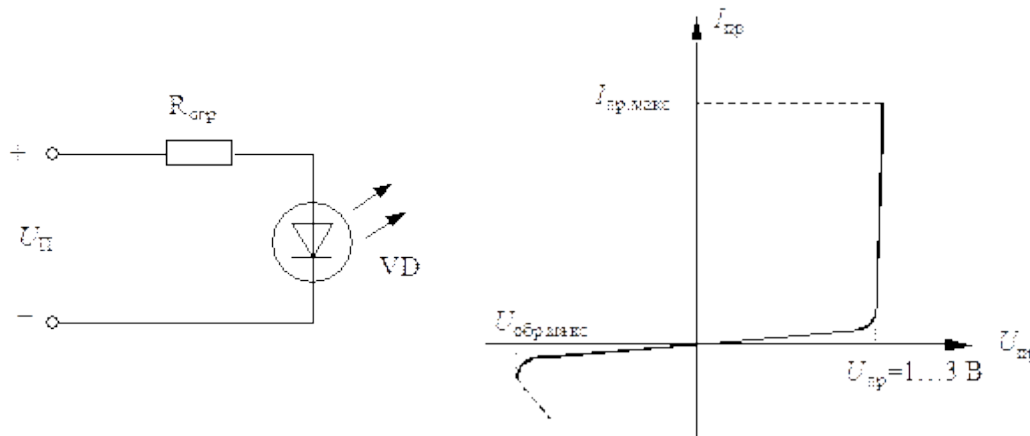
а - условное графическое обозначение; б – структура; в – диаграмма энергетических уровней в полупроводнике внешний вид; г) - внешний вид.

При прямом включении $p-n$ перехода (снижении потенциального барьера) в процессе рекомбинации происходит переход электронов с **высокого энергетического уровня в зоне проводимости** на **низкий в валентной зоне**. Если **разность энергий при этом переходе превышает 1.6 эВ (электронВольт)**, то выделяется **квант света (фотон)**.

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

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

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



а)

б)

Рис. Схема включения светодиода (а) и его вольтамперная характеристика (б)

Излучаемый светодиодом свет лежит в узком диапазоне спектра, его цветовые характеристики зависят от химического состава использованного в нем полупроводника и напряжения на переходе. **Для получения видимого излучения ширина запрещённой зоны ΔW в полупроводнике должна быть более 1,6 эВ.** Германий и кремний имеют $\Delta W < 1,3$ эВ, поэтому светодиоды из таких материалов сделать нельзя.

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—600 нм; голубой: 480—510 нм; зелёный: 510—585 нм; оранжевый: 585—620 нм; красный: 620 -770 нм.

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 N(азотом) – синее свечение.

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.

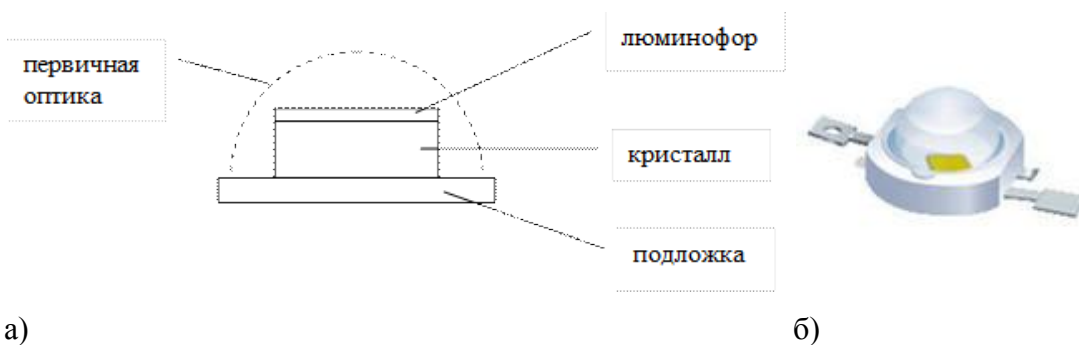


Рис. Конструкция (а) и внешний вид (б) белого светодиода

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

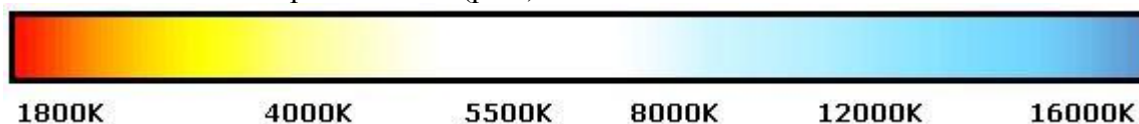


Рис. Зависимость оттенка белого света от световой температуры

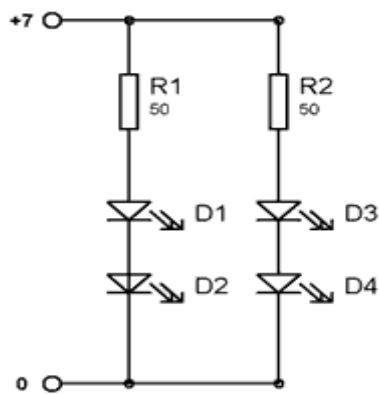
Ток через белый светодиод составляет от 50 мА до 1 А при прямом напряжении от 3 до 3,6 В. Таким образом, мощность светодиода от 0,15 до 3,6 Вт. 30% этой мощности идёт на световое излучение, 70% выделяется в виде тепла. Для сравнения самая лучшая лампа накаливания выделяет в виде тепла 95% мощности, а 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 текущий через них ток.

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

Расчет: 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

Усветодиода = 3 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

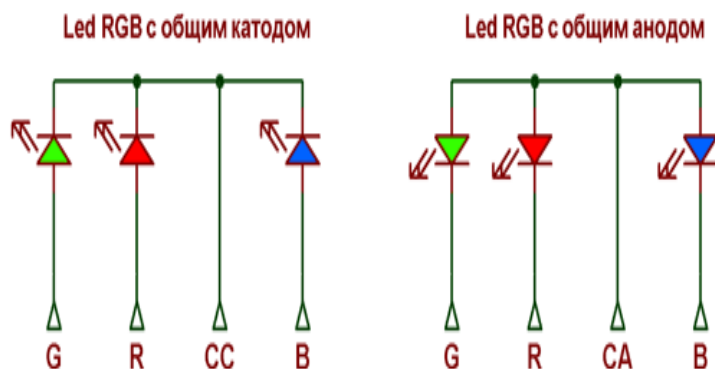


Полноцветный светодиод или RGB-светодиод - Red, Green, Blue.

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.

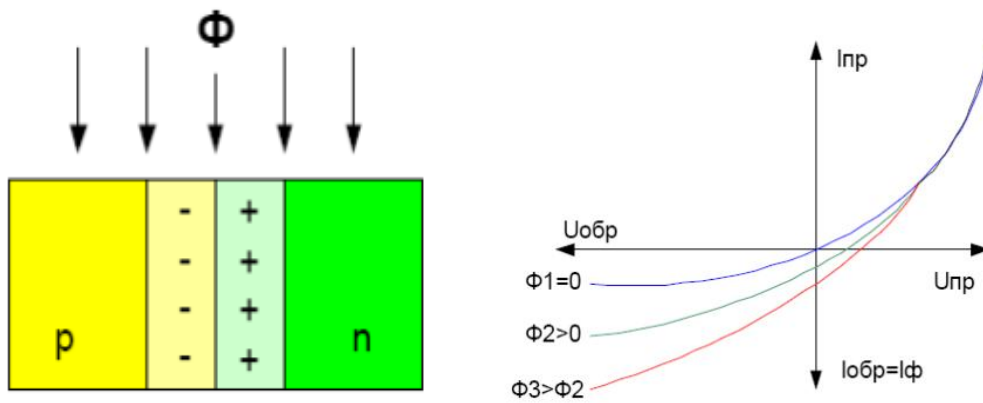
К примеру, возьмем 5мм светодиод MCDL-5013RGB ($I=20\text{мА}$):

$U_{\text{red}} = 2.0 \text{ Вольт}$

$U_{\text{green}} = 2.5 \text{ Вольт}$

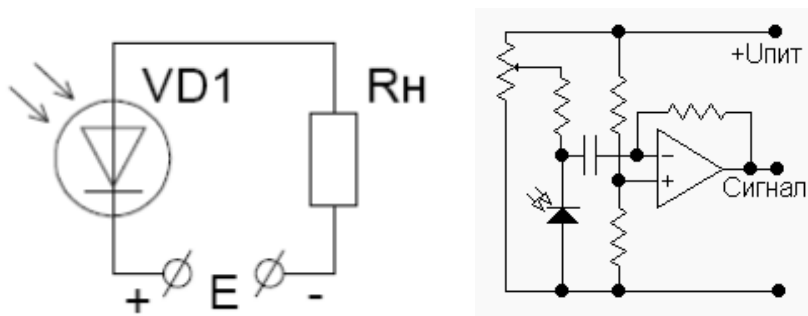
$U_{\text{blue}} = 3.5 \text{ Вольт}$

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_{ϕ} от величины светового потока $I_{\phi} = f(\Phi)$.

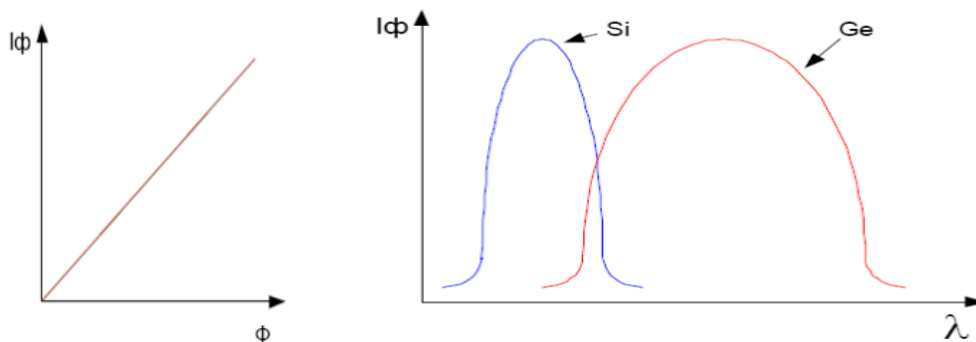
Схема включения фотодиода обратная:



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 $I_{\phi} = f(\lambda)$.



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

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