

# ЛЕКЦИЯ 11

## Полупроводниковые диоды

План занятия:

1. Выпрямительные диоды
2. Импульсные диоды
3. Полупроводниковые стабилитроны
4. Варикапы
5. Светодиоды
6. Фотодиоды
7. Оптопары

*Полупроводниковым диодом* называют полупроводниковый прибор с одним электрическим *p-n* переходом и двумя выводами.

По функциональному назначению диоды делятся на выпрямительные, импульсные, стабилитроны (опорные), варикапы, туннельные, фотодиоды, светодиоды и др.

Большинство полупроводниковых диодов выполняют на основе несимметричных *p-n* переходов. Низкоомную область диодов называют *эмиттером*, а высокоомную – *базой*.

В реальных диодах прямая и обратная ветви ВАХ отличаются от идеальной характеристика *p-n* перехода. При обратном включении диода тепловой ток  $I_0$  составляет лишь часть обратного тока диода. При прямом включении существенное влияние на ход ВАХ оказывает падение напряжения на сопротивление базы диода, которое начинает проявляться уже при 2...10 мА.

При практическом использовании диодов выделять составляющие, которые искажают идеальную ВАХ не принято. Вместо этого в качестве одного из основных параметров диода используют обратный ток ( $I_{обр}$ ). Поскольку  $I_{обр}$  меняется в широких пределах от образца к образцу в паспортных данных на каждый вид диода указывается его максимально допустимое значение.

Для инженерных расчетов обратного тока, в зависимости от температуры окружающей среды, можно пользоваться упрощенным выражением:

$$I_{обр}(T) \approx I_{обр}(T_0) 2^{\frac{\Delta T}{T^*}},$$

где  $I_{обр}(T_0)$  – обратный ток при температуре  $T_0$ ;

$$\Delta T = T - T_0$$

$T^*$  – приращение температуры, при котором обратный ток удваивается

$T^* \approx 8...10^\circ\text{C}$  – для германия

$T^* \approx 6...7^\circ\text{C}$  – для кремния

Падение напряжения на диоде при прямом включении можно найти из выражения:

$$U = \left[ \varphi_T \ln \left( \frac{I}{I_0} + 1 \right) \right] + I \cdot r_{\delta} \approx \varphi_T \ln \left( \frac{I}{I_0} + 1 \right) \rightarrow \text{для малых токов } I$$

где  $I$  – ток, протекающий через диод;  
 $I_0$  – обратный тепловой ток;  
 $r_{\delta}$  – омическое сопротивление базы;  
 $\varphi_T$  – температурный потенциал.

### Выпрямительные диоды

*Выпрямительные диоды* это диоды, предназначенные для преобразования переменного тока в постоянный, к быстродействию, емкости  $p$ - $n$  перехода и стабильности параметров которых не предъявляют специальных требований.

Для выпрямительных диодов характерно, что они имеют малые сопротивления в проводящем состоянии и позволяют пропускать большие токи. Барьерная емкость их из-за большой площади  $p$ - $n$  перехода велика и достигает значений десятков микрофарад.

Основные параметры выпрямительных диодов:

1. *Максимально допустимое обратное напряжение* ( $U_{\text{обр. max}}$ ) – значение напряжения, приложенного в обратном направлении, которое диод может выдержать в течение длительного времени без нарушения его работоспособности (десятки – тысячи В для диодов малой мощности);
2. *Средний выпрямленный ток* ( $I_{\text{вып. ср}}$ ) – среднее за период значение тока протекающего через диод в однополупериодном выпрямителе с активной нагрузкой (сотни мА – десятки А);
3. *Импульсный прямой ток* ( $I_{\text{пр. и}}$ ) – пиковое значение импульса тока при заданной максимальной длительности, скважности и форме импульса;
4. *Средний обратный ток* ( $I_{\text{обр. ср}}$ ) – среднее за период значение обратного тока (доли мкА – единицы мА);
5. *Среднее прямое напряжение* ( $U_{\text{пр. ср}}$ ) – среднее за период прямое напряжение при заданном среднем значении прямого тока (доли В);
6. *Средняя рассеиваемая мощность* ( $P_{\text{ср}}$ ) – средняя за период мощность, рассеиваемая диодом при протекании тока (сотни мВт – десятки и более Вт);
7. *Дифференциальное сопротивление диода* ( $r_d$ ) – отношение приращения напряжения на диоде к вызвавшему его малому приращению тока (единицы – сотни Ом).

При разработке выпрямительных схем может возникнуть необходимость получить выпрямительный ток, превышающий предельно-допустимое значение для одного диода. В этом случае применяют параллельное включение однотипных диодов рис.11.1.

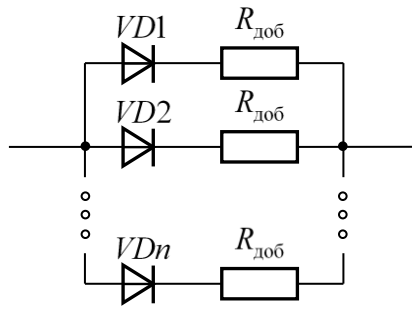


Рис.11.1. Параллельное включение однотипных диодов

Для выравнивания токов, протекающих через диоды, последовательно с диодами включаются добавочные резисторы ( $R_{доб}$ ) порядка несколько Ом. Это позволяет искусственно уравнивать прямые сопротивления диодов.

В высоковольтных цепях часто используется последовательное включение диодов рис.11.2. При таком включении обратное напряжение распределяется между всеми диодами.

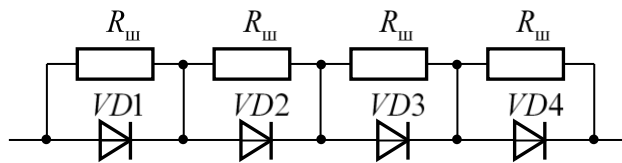


Рис.11.2. Последовательное включение однотипных диодов

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.

### Импульсные диоды

Импульсные диоды предназначены для работы в быстродействующих импульсных схемах со временем переключения менее 1 мкс. Они характеризуются малым временем переходных процессов и от выпрямительных диодов отличаются малыми емкостями  $p-n$  переходов. Уменьшение емкости достигается за счет уменьшения площади  $p-n$  перехода, поэтому допустимые мощности рассеяния у этих диодов невелики (30...40 мВт).

Схема включения и осциллограммы входного напряжения и тока приведены на рис.11.3.

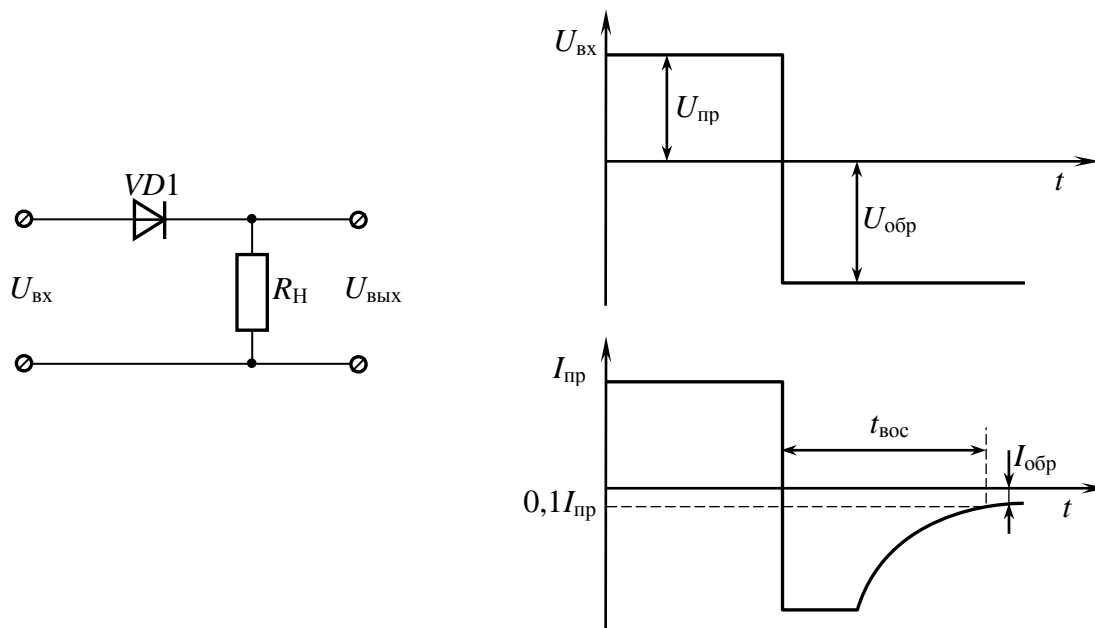


Рис.11.3. Схема включения и осциллограммы входного напряжения и тока

Основные параметры импульсных диодов:

1. *Общая емкость диода ( $C_d$ )* – емкость между выводами при заданных напряжении смещения и частоте (доли пФ – несколько пФ);
2. *Максимальное импульсное прямое напряжение ( $U_{пр.и.мах}$ )*;
3. *Максимально допустимый импульсный ток ( $I_{пр.и.мах}$ )*;
4. *Время установленного прямого напряжения диода ( $t_{уст}$ )* – интервал времени с момента подачи импульса прямого тока на диод до достижения заданного значения прямого напряжения на нем;
5. *Время восстановления обратного сопротивления диода ( $t_{вос}$ )* – интервал времени, прошедший с момента прохождения тока через нуль до момента, когда обратный ток достигает заданного значения (порядка  $0,1 I_{пр}$ , где  $I_{пр}$  – ток при прямом включении). Наличие времени восстановления обусловлено зарядом, накопленным в базе диода при инжекции. Для запираания диода этот заряд должен быть "ликвидирован" за счет рекомбинаций и обратного перехода неосновных носителей в эмиттер.

### Полупроводниковые стабилитроны

*Полупроводниковые стабилитроны* предназначены для стабилизации напряжений. Их работа основана на использовании явления электрического пробоя *p-n* перехода при включении диода в обратном направлении. По сравнению с выпрямительными диодами стабилитрон имеет достаточно низкое регламентированное напряжение пробоя и может поддерживать это напряжение на постоянном уровне при значительном изменении обратного тока.

Материалы, используемые для создания *p-n* перехода стабилитронов, имеют высокую концентрацию примесей. Поэтому напряженность

электрического поля в  $p-n$  переходе значительно выше, чем у обычных диодов. При относительно небольших обратных напряжениях в  $p-n$  переходе возникает сильное электрическое поле, вызывающее электрический пробой. В этом режиме нагрев диода не носит лавинообразного характера. Поэтому электрический пробой не переходит в тепловой.

Механизм пробоя может быть лавинным, туннельным или смешанным. Несмотря на схожие результаты действия, эти механизмы различны, хотя и присутствуют в любом стабилитроне совместно, но преобладает только один из них. У стабилитронов до напряжения 5,6 В преобладает туннельный пробой с отрицательным температурным коэффициентом, выше 5,6 В доминирует лавинный пробой с положительным температурным коэффициентом. При напряжении 5,6 В оба эффекта уравниваются, поэтому выбор такого напряжения является оптимальным решением для устройств с широким температурным диапазоном применения.

На рис.11.4,б приведена ВАХ стабилитрона КС510А при различных температурах.

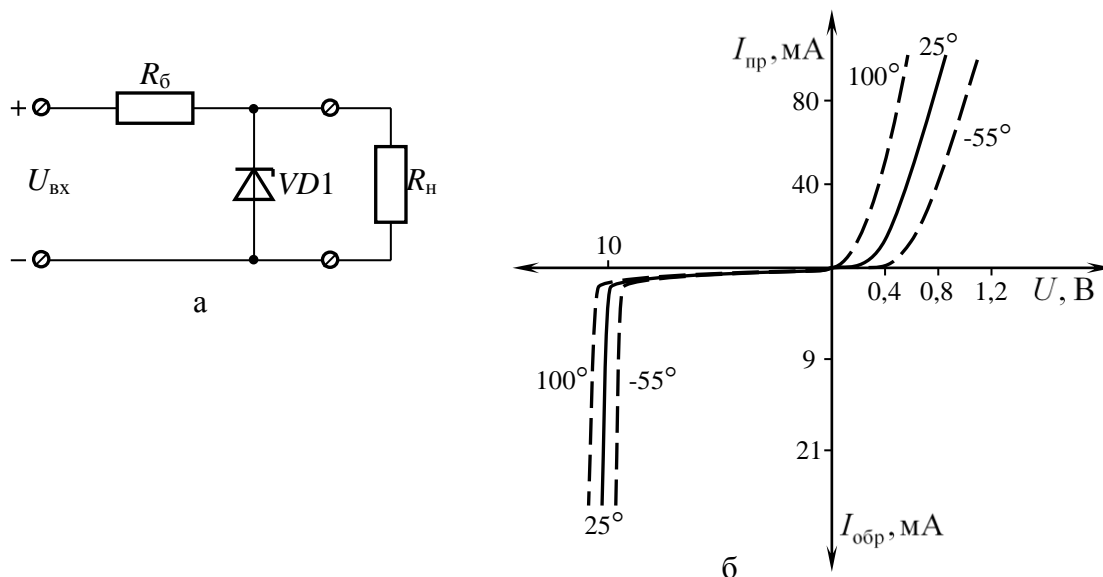


Рис.11.4. Стабилитрон КС510А: а – схема включения; б – ВАХ при различных температурах

Основные параметры стабилитрона и их типовые значения:

1. *Напряжение стабилизации ( $U_{ст}$ )* – падение напряжения на стабилитроне при протекании заданного тока стабилизации (несколько В – десятки В);
2. *Максимально допустимый ток стабилизации ( $I_{ст.max}$ )* – наибольший ток стабилизации, при котором напряжение стабилизации находится в заданных пределах, а температура перехода не превышает допустимой (несколько мА – несколько А);
3. *Минимально допустимый ток стабилизации ( $I_{ст.min}$ )* – наименьший ток через стабилитрон, при котором напряжение стабилизации находится в заданных пределах (доли – десятки мА);

4. *Дифференциальное сопротивление стабилизатора* ( $r_{\text{диф}}$ ), - отношение приращения напряжения стабилизации на стабилизаторе к вызвавшему его малому приращению тока. Дифференциальное сопротивление стабилизатора определяется при заданном значении тока на участке пробоя как:

$$r_{\text{диф}} = \frac{\partial U_{\text{ст}}}{\partial I_{\text{ст}}}, \quad (\text{доли Ом} - \text{тысячи Ом})$$

5. *Температурный коэффициент напряжения стабилизации* ( $\alpha_{\text{ст}}$ ) – отношение относительного изменения напряжения стабилизации к абсолютному изменению температуры окружающей среды при постоянном токе стабилизации ( $\alpha_{\text{ст}}$  – тысячные доли процента).

$$\alpha_{\text{ст}} = \frac{1}{U_{\text{ст}}} \frac{\Delta U_{\text{ст}}}{\Delta T} \cdot 100\%, \quad (\text{при } I_{\text{ст}} - \text{const})$$

Поскольку стабилизатор работает при обратном включении, режим пробоя не связан с инжекцией неосновных носителей. Поэтому в стабилизаторе инерционные явления, связанные с накоплением и рассасыванием носителей, при переходе из области пробоя в область запирающего и обратно практически отсутствуют. Это позволяет использовать их в импульсных схемах в качестве фиксаторов уровней и ограничителей.

Включение стабилизатора в схему стабилизации напряжения показано на рис.11.4,а. При увеличении напряжения источника ток в цепи возрастает, а падение напряжения на стабилизаторе и на нагрузке остается неизменным. При росте тока через стабилизатор растет и падение напряжения на сопротивлении  $R_6$ . Другими словами, почти все приращение напряжения питания падает на сопротивлении  $R_6$ , а выходное напряжение остается неизменным за счет характеристики обратной ветви стабилизатора.

По II Закону Кирхгофа

$$U_{\text{п}} = U_{R_6} + U_{\text{ст}} \Rightarrow U_{\text{п}} = R_6 I + U_{\text{ст}} \Rightarrow U_{\text{п}} = R_6 I_{\text{ст}} + I_{\text{н}} + U_{\text{ст}}.$$

Параметры цепи стабилизации выбирают так, что бы удовлетворить следующие неравенства:

$$\begin{cases} I_{\text{ст. min}} \leq \frac{U_{\text{п min}} - U_{\text{ст}}}{R_6} - I_{\text{н max}}; \\ I_{\text{ст. max}} \geq \frac{U_{\text{п max}} - U_{\text{ст}}}{R_6} - I_{\text{н min}}; \end{cases}$$

где  $U_{п\max}$  и  $U_{п\min}$  – максимальное и минимальное напряжения источника питания;

$I_{н\max}$  и  $I_{н\min}$  – максимальный и минимальный ток нагрузки.

Если неравенства не удовлетворяются, то реализовать параметрический стабилизатор напряжения, имеющий заданные параметры, нельзя и необходимо применять более сложные технические решения.

В схеме простейшего стабилизатора (рис.11.5,а) переменное напряжение ограничивается на уровне напряжения стабилизации стабилитрона  $U_{ст}$ . В результате этого на выходе получается напряжение трапецеидальной формы. При изменении величины входного напряжения амплитуда выходного напряжения остается постоянной, а действующее значение меняется незначительно (за счет некоторых изменений площади трапеций).

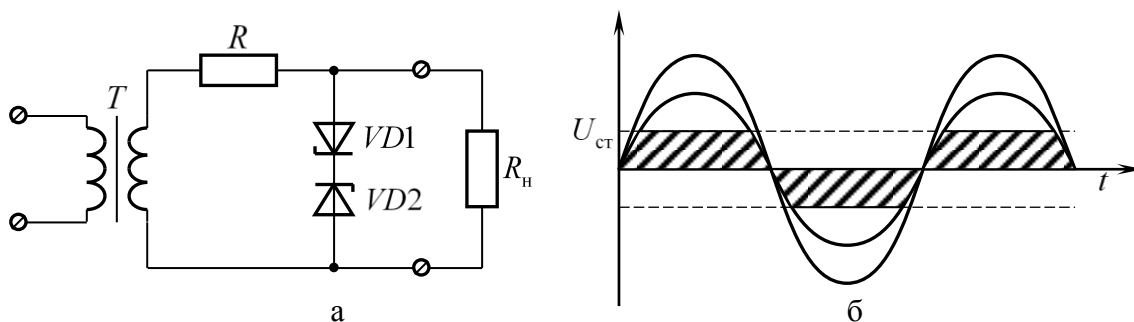


Рис.11.5. Схема простейшего стабилизатора переменного напряжения

## Варикапы

*Варикап* это полупроводниковый – прибор, предназначенный для использования в качестве управляемой электрическим напряжением емкости.

Условное графическое обозначение варикапа представлено на рис.11.6.



Рис.11.6. Условное обозначение варикапа

Варикап работает при обратном напряжении, приложенном к  $p-n$  переходу. Его емкость меняется в широких пределах, а его значение определяется из выражения:

$$C_{в} U = C_{в} 0 \left( \frac{U_{к}}{U_{к} + U} \right)^{\frac{1}{n}},$$

где  $C_{в}(0)$  – емкость при нулевом напряжении на диоде;

$U_{к}$  – значение контактного потенциала;

$U$  – приложенное обратное напряжение;

- $n = 2$  – для резких переходов;  
 $n = 3$  – для плавных переходов.

Основные параметры варикапов и их основные значения:

1. *Номинальная емкость* ( $C_n$ ) – емкость между выводами варикапа при номинальном напряжении смещения (обычно  $U_{см} = 4$  В,  $C_n$  – десятки – сотни нФ);
2. *Коэффициент перекрытия емкости* ( $K_C$ ) – отношение максимальной емкости варикапа к минимальной (несколько единиц, несколько десятков единиц);
3. *Сопротивление потерь* ( $r_{п}$ ) – суммарное активное сопротивление варикапа;
4. *Добротность варикапа* ( $Q_v$ ) – отношение реактивного сопротивления варикапа на заданной частоте к сопротивлению потерь при заданном значении емкости (десятки – сотни единиц);
5. *Максимально допустимое напряжение* ( $U_{max}$ ) – максимальное мгновенное значение переменного напряжения, обеспечивающее заданную надежность при длительной работе;
6. *Температурный коэффициент емкости варикапа* ( $\alpha_C$ ) – отношение относительного изменения емкости к вызвавшему его абсолютному изменению температуры окружающей среды ( $2 \cdot 10^{-4} \dots 6 \cdot 10^{-4}$  1/К)

$$\alpha_C = \frac{\Delta C}{C \cdot \Delta T}.$$

В качестве примера (рис.11.7) показано включение варикапа в цепь резонансного LC – контура. Конденсатор  $C$  необходим для исключения попадания постоянного напряжения  $U$  во входную цепь. Его емкость выбирают достаточно большой  $C \gg C_{VD1}$ . Резистор также берут достаточно большим, так чтобы введение цепи подачи напряжения не приводило к существенному снижению добротности варикапа.

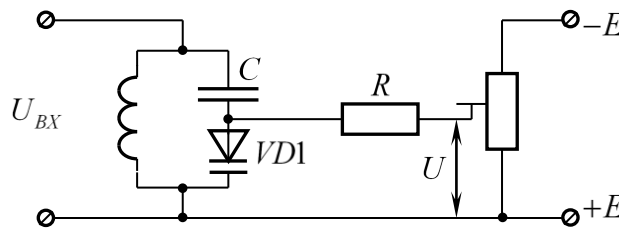


Рис.11.7. Схема резонансного LC – контура с варикапом

Получить варикап с добротностью, заметно превышающей добротность контурной катушки, непросто. Это объясняется тем, что в варикапе, как и в любом диоде, последовательно с  $p-n$  переходом всегда включено сопротивление базовой области полупроводника, а параллельно – эквивалентное сопротивление, обусловленное обратным током через переход.



## Туннельные диоды

Туннельные диоды – это полупроводниковые приборы, на ВАХ которых имеется участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением (рис.11.8,б). Наличие этого участка является следствием проявления туннельного эффекта.

Важное преимущество туннельных диодов заключается в очень высокой рабочей частоте (до  $10^{11}$  Гц).

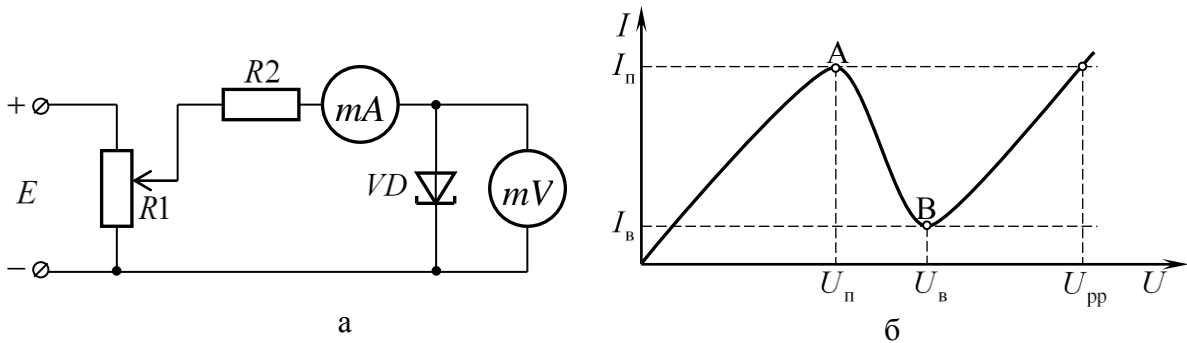


Рис.11.8. Туннельный диод: а – схема включения; б – ВАХ

Температурный диапазон работы туннельных диодов выше, чем у других полупроводниковых приборов, а потребляемая мощность очень маленькая.

Особенности туннельных диодов объясняются особенностями туннельного перехода электронов.

По назначению туннельные диоды делятся на усилительные, генераторные и переключающиеся.

В переключающейся схеме (рис.11.9) при отрицательном напряжении сигнала напряжение на диоде будет равно  $U_1$ , а при положительном  $U_3$ , причем  $U_3 \gg U_1$ . Это позволяет рассматривать туннельный диод как прибор с двумя устойчивыми состояниями.

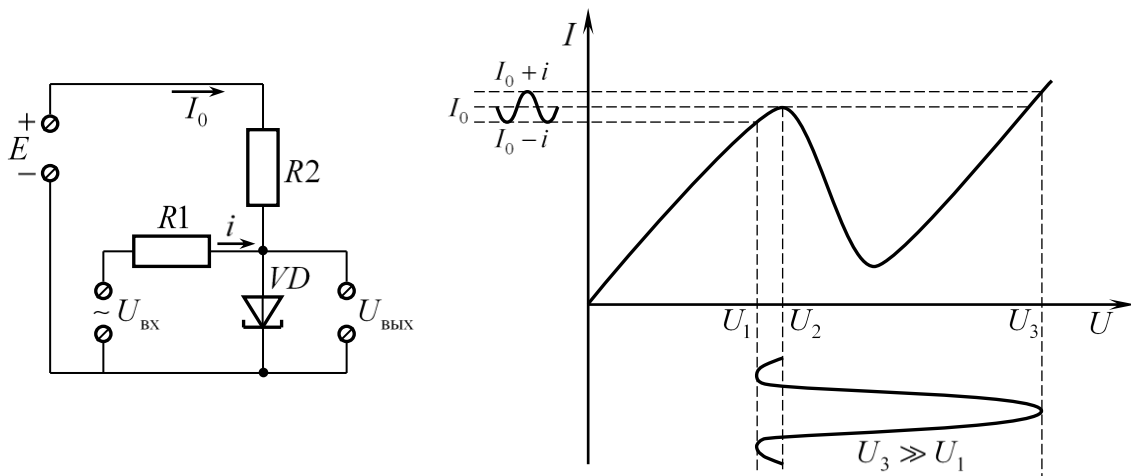


Рис.11.9. Работа туннельного диода в переключающейся схеме

## Светодиоды

*Светодиодом* называют излучающий полупроводниковый прибор с одним *p-n* переходом, предназначенный для непосредственного преобразования электрической энергии в энергию светового излучения.

В светодиодах *p-n* переход всегда смещен в прямом направлении (рис.11.10). При этом наблюдается интенсивная инжекция неосновных носителей заряда: электронов в *p*-область и дырок в *n*-область. При встрече электронов и дырок происходит обильная рекомбинация с выделением энергии из-за перехода электронов с одного энергетического уровня на другой. У многих полупроводников рекомбинация носит безизлучательный характер – выделяющаяся энергия отдается кристаллической решетке. Однако, у полупроводников выполненных на основе карбида кремния (SiC), галлия (Ga), мышьяка (As) и некоторых других элементов, рекомбинация является излучательной, т.е. энергия рекомбинации выделяется в виде квантов излучения – *фотонов*.

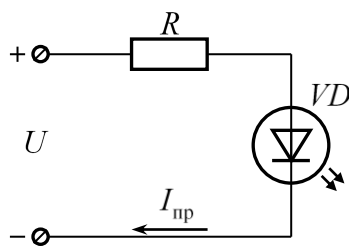


Рис.11.10. Схема включения и условное обозначение светодиода

У таких полупроводников прохождение через *p-n* переход тока в прямом направлении сопровождается некогерентным оптическим излучением определенного спектрального состава. Частота излучения зависит от материала светодиодов и состава легирующих примесей. Наибольшее распространение получили светодиоды, излучающие желтый, красный и зеленый свет.

Длина волны  $\lambda$  излучаемого света однозначно определяется энергией кванта, которая при излучательной рекомбинации в полупроводнике приблизительно равна ширине запрещенной зоны.

$$\lambda = \frac{h}{\epsilon_3},$$

где  $h$  – постоянная Планка.

В настоящее время светодиоды различных типов позволяют перекрыть диапазоны длин волн излучения от 366 нм до 950 нм и более (табл.11.1).

## Классификация светодиодов по цветовому спектру

Цвет	Длина волны (нм)	Напряжение (В)	Материал полупроводника
Инфракрасный	$\lambda > 760$	$\Delta U < 1,9$	Арсенид галлия (GaAs) Алюминия галлия арсенид (AlGaAs)
Красный	$610 < \lambda < 760$	$1,63 < \Delta U < 2,03$	Алюминия-галлия арсенид (AlGaAs) Галлия арсенид-фосфид (GaAsP) Алюминия-галлия-индия фосфид (AlGaInP) Галлия(III) фосфид (GaP)
Оранжевый	$590 < \lambda < 610$	$2,03 < \Delta U < 2,10$	Галлия фосфид-арсенид (GaAsP) Алюминия-галлия-индия фосфид (AlGaInP) Галлия(III) фосфид (GaP)
Жёлтый	$570 < \lambda < 590$	$2,10 < \Delta U < 2,18$	Галлия арсенид-фосфид (GaAsP) Алюминия-галлия-индия фосфид (AlGaInP) Галлия(III) фосфид (GaP)
Зелёный	$500 < \lambda < 570$	$1,9 < \Delta U < 4,0$	Индия-галлия нитрид (InGaN) / Галлия(III) нитрид (GaN) Галлия(III) фосфид (GaP) Алюминия-галлия-индия фосфид (AlGaInP) Алюминия-галлия фосфид (AlGaP)
Голубой	$450 < \lambda < 500$	$2,48 < \Delta U < 3,7$	Селенид цинка (ZnSe) Индия-галлия нитрид (InGaN) Карбид кремния (SiC) в качестве субстрата Кремний (Si) в качестве субстрата
Фиолетовый	$400 < \lambda < 450$	$2,76 < \Delta U < 4,0$	Индия-галлия нитрид (InGaN)
Пурпурный	Смесь нескольких спектров	$2,48 < \Delta U < 3,7$	Двойной: синий/красный диод, синий с красным люминофором, или белый с пурпурным пластиком
Ультрафиолетовый	$\lambda < 400$	$3,1 < \Delta U < 4,4$	Нитрид алюминия (AlN) (210 nm) Нитрид алюминия-галлия (AlGaIn) Нитрид алюминия-галлия-индия (AlGaInN)
Белый	Широкий спектр	$\Delta U \approx 3,5$	Синий/ультрафиолетовый диод с люминофором

Основные параметры и характеристики светодиодов:

1. Яркость свечения при заданном прямом токе или силе света (мкд) – световой поток, приходящийся на единицу телесного угла в заданном направлении (0,1...10 мкд);
2. Постоянное прямое напряжение ( $U_{пр}$ ) – падение напряжения при заданном токе (2...4 В);
3. Максимально допустимый прямой ток ( $I_{пр\ max}$ ) (10...50 мА);
4. Максимально допустимое обратное напряжение ( $U_{пр\ max}$ ) (обычно не более 5 В)

5. *Угол излучения* ( $\alpha$ ) – плоский угол, в пределах которого сила света составляет не менее половины ее максимального значения;
6. *Спектральная характеристика* – зависимость относительной мощности излучения от длины излучаемой волны при определенной температуре.
7. *Цвет свечения* или *длина волны излучения* ( $\lambda$ ) – длина волны соответствующая максимуму спектральной характеристики излучения (366...950 нм);

По сравнению с другими электрическими источниками света светодиоды имеют следующие преимущества:

- Высокая световая отдача. Современные светодиоды сравнялись по этому параметру с натриевыми газоразрядными лампами и металлогалогенными лампами, достигнув 150 Люмен на Ватт;
- Высокая механическая прочность, вибростойкость;
- Длительный срок службы – от 30 тыс. до 100 тыс. часов. При длительной работе и/или плохом охлаждении происходит «отравление» кристалла и постепенное падение яркости;
- Спектр современных светодиодов бывает различным – от тёплого белого 2700 К, до холодного белого 6500 К.
- Малая инерционность. Светодиод является быстродействующим источником света, при работе в номинальном режиме его переключение осуществляется за  $10^{-7} \dots 10^{-9}$  с;
- Количество циклов включения-выключения не оказывают существенного влияния на срок службы светодиодов;
- Различный угол излучения – от 15 до 180 градусов;
- Безопасность – не требуются высокие напряжения, низкая температура светодиода или арматуры (обычно не выше 60°C);
- Нечувствительность к низким и очень низким температурам. Однако, высокие температуры светодиодам противопоказаны, как и любым полупроводникам;
- Экологичность – отсутствие ртути, фосфора и ультрафиолетового излучения в отличие от люминесцентных ламп.

Последнее время все большее применение получают сверхяркие осветительные светодиоды "белого света". Различают два вида белых светодиодов: псевдобелый, состоящий из трех светодиодов красного, зеленого и синего свечения в одном корпусе и устройство на основе голубого светодиода, покрытого слоем люминофора жёлтого диапазона свечения. Свет приблизительно белого спектра получается путем смешения синего света от светодиода и более длинноволнового переизлучаемого от люминофора. Основным недостатком белых светодиодов является ограниченный срок службы из-за выгорания люминофора.

## Фотодиоды

*Фотодиодом* называется фотоэлектрический прибор с одним  $p$ - $n$  переходом, в котором используется явление внутреннего фотоэффекта.

Кроме  $p$ - $n$  фотодиодов, существуют и  $p$ - $i$ - $n$  фотодиоды, в которых между слоями  $p$  и  $n$  находится слой нелегированного полупроводника  $i$ , фотодиоды Шоттки, лавинные фотодиоды и фотодиоды с гетероструктурой.

*Внутренним фотоэффектом* называется процесс ионизации атомов кристаллической решетки полупроводника или примеси в ней квантами света, сопровождающийся образованием подвижных носителей заряда.

При ионизации атомов генерируются электронно-дырочные пары, которые под влиянием градиента концентрации диффундируют к  $p$ - $n$  переходу. На границе перехода они разделяются и неосновные носители под влиянием электрического поля, величина которого определяется контактной разностью потенциалов, перебрасываются через переход в область, где они являются основными носителями заряда. Ток, создаваемый неосновными носителями заряда, при переходе в область, где они являются основными носителями заряда, называют *полным фототоком*.

Основные носители остаются в области генерации пары. Если цепь разомкнута, то электроны накапливаются в  $n$ -области, а дырки в  $p$ -области. Объемный заряд этих носителей частично компенсирует заряд ионов запирающего слоя, снижая потенциальный барьер. Это приводит к нарушению условий термодинамического равновесия и возникновению тока диффузии через  $p$ - $n$  переход.

Новое равновесное состояние соответствует меньшей высоте потенциального барьера, равной  $U_k - E_\phi$ , при котором поток неосновных носителей заряда через переход, вызванный световым облучением, полностью уравновешен встречным диффузионным потоком основных носителей заряда.

ЭДС, на значение которой снижается потенциальный барьер называют *фото ЭДС* ( $E_\phi$ ).

Для перехода в зону проводимости электрон, который находится в валентной зоне, должен получать приращение энергии, превышающее ширину запрещенной зоны. Собственный фотоэффект возникает в том случае, если энергия кванта света превышает  $\Delta\varepsilon$ . Для кремня максимальная длина волны лежит в инфракрасной области  $\lambda \approx 1,1$  мкм. Граница фотоэффекта соответствует переходу электрона с самого верхнего уровня валентной зоны на самый низкий уровень зоны проводимости.

Если в результате ионизации электронно-дырочные пары генерируются на расстоянии от  $p$ - $n$  перехода большем диффузионной длины, они успевают рекомбинировать не достигнув  $p$ - $n$  перехода и не вносят вклада в фототок.

ВАХ фотодиода при различных значениях светового потока приведена на рис.11.11.

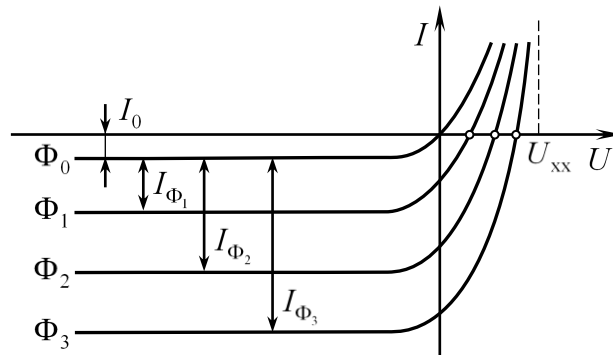


Рис.11.11. ВАХ фотодиода при различных значениях светового потока

Здесь  $\Phi_3 > \Phi_2 > \Phi_1$ . Значение фототока в первом приближении можно найти из выражения

$$I_{\Phi} = S_{\text{инт}} \cdot \Phi,$$

где  $S_{\text{инт}}$  – интегральная чувствительность;  
 $\Phi$  – световой поток.

Как следует из принципа работы фотодиода, фототок суммируется с обратным током теплового происхождения

$$I_{\text{общ}} = I_{\Phi} - I_0 \left( 1^{\frac{U}{\varphi_T}} - 1 \right),$$

где  $\varphi_T$  – температурный потенциал  $\varphi_T = \frac{kT}{q} \approx 26 \text{ мВ}$ .

Если фотодиод замкнут на резистор  $R$ , то напряжение на  $p$ - $n$  переходе  $U_{\text{вых}} = IR$ , тогда

$$I_{\text{общ}} = I_{\Phi} - I_0 \left( 1^{\frac{IR}{\varphi_T}} - 1 \right).$$

Решив это уравнение относительно  $U_{\text{вых}}$  получим уравнение, аналитически описывающее ВАХ фотодиода

$$U_{\text{вых}} = \varphi_T \ln \left( 1 + \frac{I_{\Phi} + I_{\text{общ}}}{I_0} \right).$$

Фотодиод можно включать в схему, как с внешним источником питания (рис.11.12,а), так и без него (рис.11.12,б).

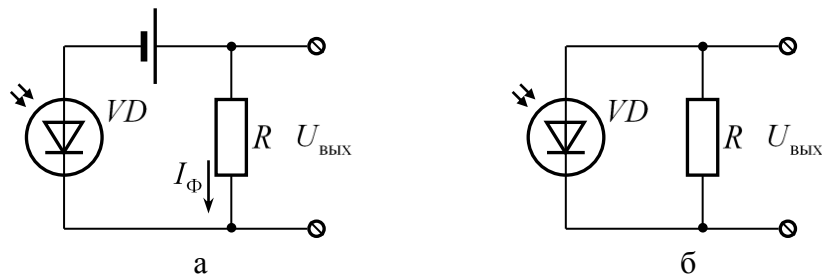


Рис.11.12. Схемы включения фотодиода: а – с внешним источником питания; б – фотодиод замкнут на резистор

В схеме с внешним источником питания (рис.11.12,а) под действием приложенного напряжения в цепи фотодиода протекает небольшой тепловой ток при отсутствии освещения. При освещении фотодиода поток неосновных носителей заряда увеличивается, вследствие чего увеличивается ток в цепи, который определяется напряжением источника и световым потоком.

При замыкании фотодиода на резистор (рис.11.12,б) ток во внешней цепи создается за счет фото-ЭДС. При этом фотодиод работает в режиме фотогенератора непосредственно преобразуя световую энергию в электрическую.

Основные параметры и характеристики фотодиодов:

1. Вольтамперная характеристика ( $I_d = f(U_d)$  при  $\Phi = \text{const}$ ) определяет зависимость тока фотодиода от напряжения на нем при постоянной величине светового потока;
2. Световая характеристика отображает зависимость тока фотодиода от величины светового потока при постоянном напряжении на фотодиоде ( $I_d = f(\Phi)$  при  $U_d = \text{const}$ ). В широком диапазоне изменений светового потока световая характеристика фотодиода оказывается линейной.
3. Спектральная характеристика показывает относительное изменение тока фотодиода от длины волны падающего на фотодиод света (рис 3.11);

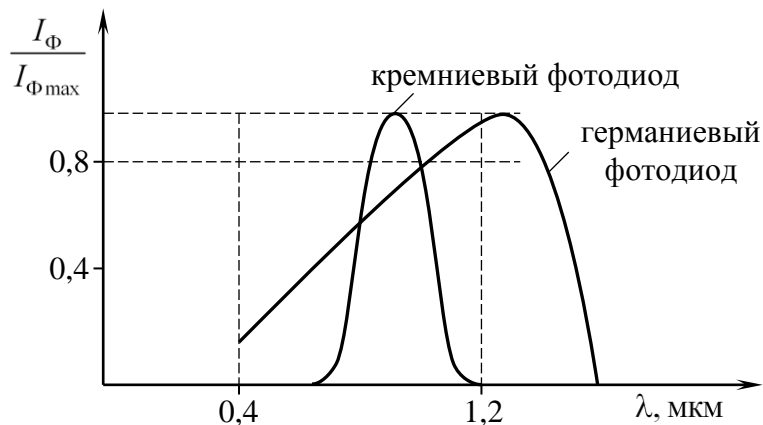


Рис.11.13. Спектральная характеристика фотодиода

4. Интегральная чувствительность ( $S_{\text{инт}}$ ) – отношение фототока диода к потоку падающего монохроматического излучения с заданной длиной

ВОЛНЫ:

$$S_{\text{инт}} = \frac{I_{\Phi}}{\Phi};$$

5. *Рабочее напряжение* ( $U_p$ ) – постоянное напряжение, приложенное к фотодиоду, при котором обеспечиваются номинальные параметры при длительной его работе в заданных эксплуатационных условиях;
6. *Темновой ток* ( $I_T$ ) – ток, протекающий через фотодиод при отсутствии на нем светового излучения;
7. *Граничная частота* – частота измерения яркости светового потока, на которой интегральная чувствительность уменьшается в  $\sqrt{2}$  (порядка  $10^7$  Гц).

### Оптопары

Свето- и фотодиоды как и другие оптические приборы часто применяют совместно в т.н. оптопарах.

*Оптрон* (оптопара) – электронный прибор, состоящий из оптического излучателя и фотоприемника, связанных оптическим каналом и объединённых в общем корпусе.

Принцип работы оптрона заключается в преобразовании электрического сигнала в световое излучение, его передаче по оптическому каналу и последующем преобразовании обратно в электрический сигнал.

Классификация

По степени интеграции:

- оптопары, состоящие из двух и более элементов (в т.ч. собранные в одном корпусе);
- оптоэлектронные интегральные схемы, содержащие одну или несколько оптопар с дополнительными компонентами (усилителями и т.п.).

По типу оптического канала:

- с открытым оптическим каналом;
- с закрытым оптическим каналом.

По типу фотоприёмника (рис.11.14):

- с фоторезистором;
- с фотодиодом;
- с фототиристором;
- с биполярным фототранзистором;
- с полевым фототранзистором.

Тип фотоприёмника определяет линейность передаточной функции оптрона. Наибольшей линейностью обладают резисторные оптроны и оптроны с приёмным фотодиодом. Транзисторные оптроны используются в импульсных (ключевых, цифровых) устройствах, в которых линейность передачи не требуется. Оптоны с фототиристорами применяются для гальванической развязки схем управления от силовых цепей.



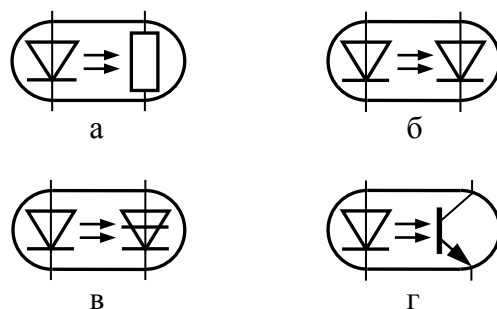


Рис.11.14. Условное обозначение оптопар: а – с фоторезистором; б – с фотодиодом; в – с фототиристором; г – с биполярным фототранзистором

Нижняя рабочая частота оптрона не ограничена – оптроны могут работать в цепях постоянного тока. Верхняя рабочая частота оптронов, оптимизированных под передачу цифровых сигналов, достигает сотен МГц. Верхняя рабочая частота линейных оптронов составляет единицы - сотни кГц.

Оптроны имеют несколько областей применения, использующих их различные свойства.

Оптроны используются для гальванической развязки цепей – передачи сигнала без передачи напряжения. Для некоторых стандартных интерфейсов передачи существуют специализированные микросхемы оптронной развязки. Бесконтактное управление мощными, высоковольтными цепями по оптическим каналам позволяет обезопасить дорогостоящее оборудование различных устройств и комплексов промышленной электроники от выхода из строя.

Оптроны с открытым оптическим каналом, доступным для механического воздействия (перекрытия канала или отражения светового потока), используются как датчики (рис.11.15) во всевозможных детекторах (бумаги в принтере, цифровых спидометрах, координатные счётчики компьютерной мыши).

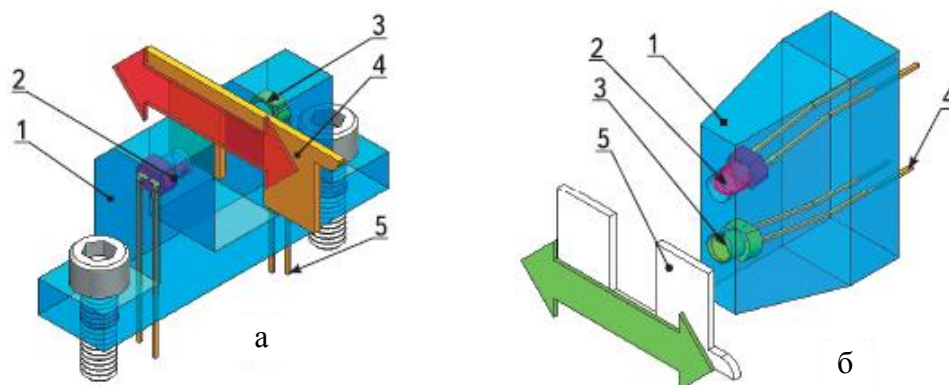


Рис.11.15. Датчики на оптронах с открытым каналом: а – с перекрытием канала; б – с отражением светового потока; 1 – корпус датчика; 2 – светодиод; 3 – фотоприемник