

**Федеральное агентство по образованию  
Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА**

**С.Н. Охулков**

# **ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА**

**Кафедра “Теоретическая и общая  
электротехника”**

**Для студентов электротехнических  
специальностей всех форм обучения**

# Автозаводская высшая школа управления и технологий

Очная и заочная форма обучения

- Автомобили и автомобильное хозяйство
- Автомобиле- и тракторостроение
- Технология машиностроения

г. Нижний Новгород, ул. Лескова, 68, т. (831) 256-02-10

# Тема 7

## **ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА СОВРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ**

**Полупроводники –  
это широкий класс веществ  
с электронным механизмом электропроводности  
(электрической проводимости)**

*К полупроводникам относятся материалы,  
проводимость которых больше проводимости  
диэлектриков, но меньше проводимости проводников.*

*Обычно это кристаллический материал с шириной  
запрещенной зоны от 0,5 до 2 эВ.*

*В электронике в качестве полупроводников  
обычно используются  
кремний, германий, селен, арсенид галлия и др.*

## ***Электропроводность полупроводников***

обусловлена наличием свободных носителей заряда –  
электронов проводимости и дырок

Химически чистые полупроводники обладают  
электрической проводимостью,  
обусловленной собственными свободными электронами  
и дырками теплового происхождения.

Такая проводимость называется

***собственной проводимостью полупроводника***

Для придания полупроводнику необходимых свойств в ряде случаев в него вводят примеси.

Примеси, атомы которых легко ионизируются, добавляя электрон к электронам собственной проводимости, называются ***донорными примесями.***

Полупроводники, содержащие донорные примеси, называются **полупроводниками *n*-типа.**

Примеси, атомы которых ионизируются, принимая электрон от соседнего атома основного полупроводника и создавая тем самым дырку в полупроводнике, называются ***акцепторными примесями.***

Полупроводники, содержащие акцепторные примеси, называются **полупроводниками *p*-типа.**

Примесные полупроводники называются ***легированными.***

Поскольку абсолютно чистые исходные полупроводники получить невозможно, наряду со специально введенными примесями присутствуют

***собственные примесные атомы.***

По этой причине в полупроводнике *n*-типа появляются дырки, а в полупроводнике *p*-типа – электроны.

Эти заряды называются ***неосновными.***

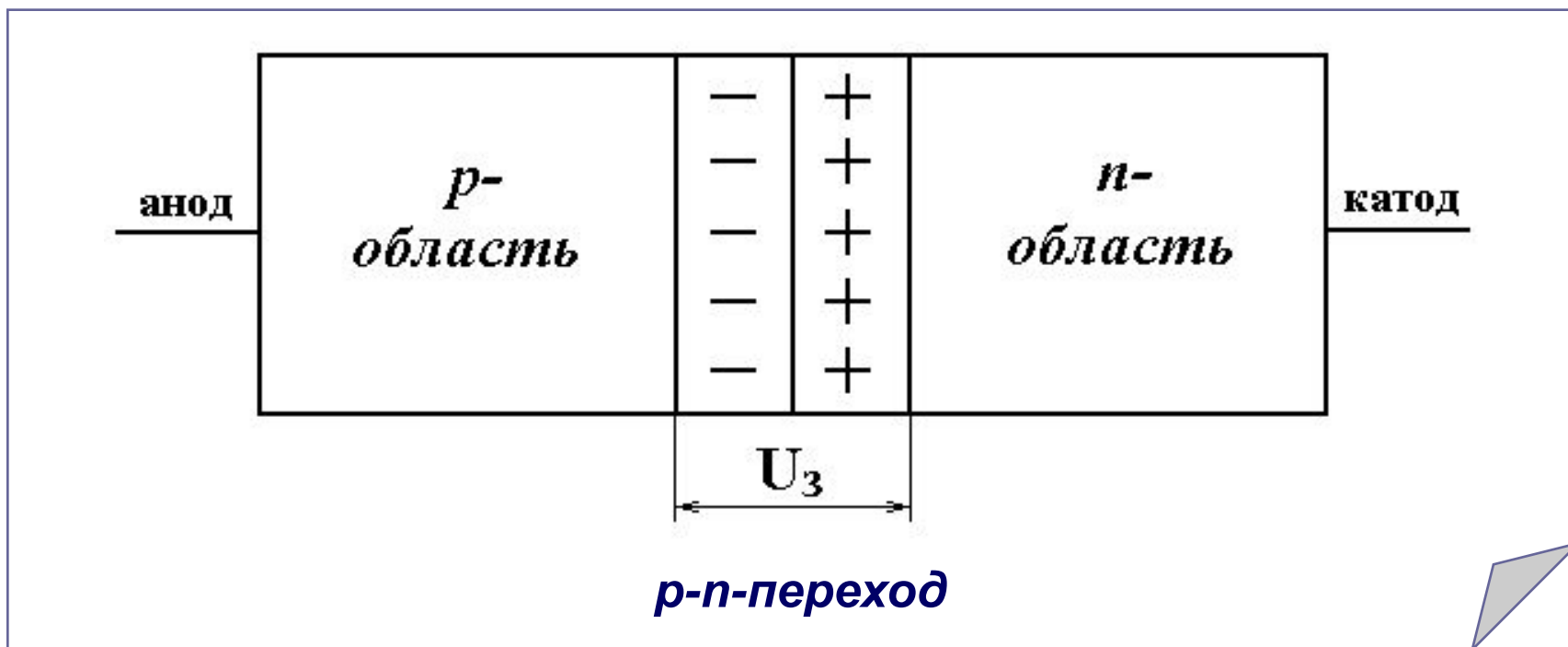
Наибольшее применение нашли полупроводники, одна часть которых легирована акцепторными примесями, а другая – донорными.

Переход между двумя областями полупроводника с разными типами электропроводности называется

***электронно-дырочным***

или

***p-n-переходом.***



Электрод, подключенный к *p*-области называют **анодом**,  
а электрод, соединенный с *n*-областью – **катодом**.



После создания в полупроводнике  $p$ - и  $n$ -областей начинается **диффузный ток** основных носителей заряда: дырок из  $p$ -области в  $n$ -область и электронов в обратном направлении. Диффундируя, электроны и дырки оставляют за собой соответственно положительно и отрицательно заряженные ионы примесей (эти ионы жестко закреплены в кристаллической решетке и перемещаться не могут). В  $n$ -области диффундирующие дырки рекомбинируют с электронами, резко уменьшая концентрацию электронов и дополнительно образуя нескомпенсированные положительные ионы. Аналогично в  $p$ -области диффундирующие электроны рекомбинируют с дырками, резко уменьшая концентрацию основных носителей заряда и дополнительно образуя нескомпенсированные отрицательные ионы.

Таким образом, вблизи границы  $p$ - и  $n$ -областей концентрация основных носителей заряда резко падает. Возникает обедненный носителями слой, где «обнажаются» нескомпенсированные отрицательные и положительные заряды акцепторных и донорных ионов.

Появление противоположно заряженных ионов приводит к возникновению электрического поля в переходе. Это поле направлено так, что тормозит процессы диффузии. Возникшему электрическому полю соответствует

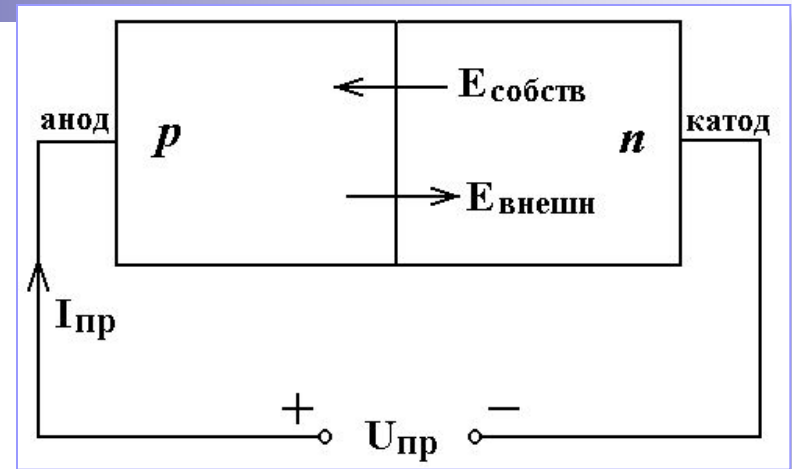
***контактная разность потенциалов  $U_z$ .***

Для германиевого перехода  $U_z = 0,2-0,3$  В,  
для кремниевого –  $U_z = 0,6-0,8$  В.

Электрическое поле в переходе обуславливает появление ***дрейфового тока*** – тока неосновных носителей заряда в переходе: дырки из  $n$ -области переносятся электрическим полем в  $p$ -область, а электроны из  $p$ -области затягиваются в  $n$ -область.

Величина дрейфового тока мала, так как мала концентрация неосновных зарядов. В установившемся состоянии диффузный ток будет равен дрейфовому току.

Пусть к  $p$ - $n$ -переходу подключен источник небольшого постоянного напряжения, причем плюс этого напряжения прикладывается к  $p$ -области (см. рис. справа).



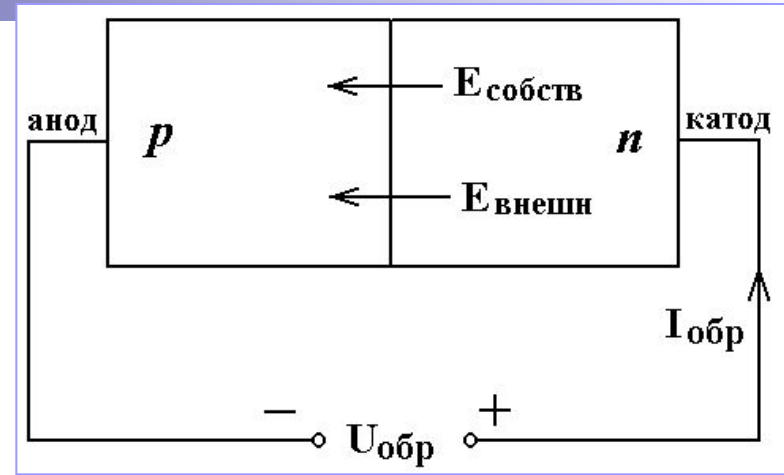
Электрическое поле, создаваемое этим источником, накладывается на внутреннее поле в  $p$ - $n$ -переходе, созданное ионами примесей. Результирующее поле в переходе уменьшается. Возникает дополнительная диффузия основных носителей заряда. Диффузионный ток через переход становится больше дрейфового. Причем, чем больше прикладываемое напряжение, тем больше диффузионный ток через переход.

Напряжение, при котором ток через  $p$ - $n$ -переход быстро увеличивается, называется **прямым (открывающим) напряжением**.

Возникающий при этом большой ток называется **прямым током**.

Сопротивление  $p$ - $n$ -перехода при подаче прямого напряжения резко уменьшается.

Подключим к  $p$ - $n$ -переходу источник постоянного напряжения так, чтобы минус этого напряжения прикладывался к  $p$ -области (см. рис. справа)



Дополнительное электрическое поле, создаваемое источником, складывается с внутренним полем в  $p$ - $n$ -переходе. Результирующее поле в переходе увеличивается. Диффузия основных носителей заряда уменьшается, а при дальнейшем увеличении приложенного напряжения полностью прекращается. Дрейфовый ток через переход незначительно увеличивается и становится больше диффузного. Однако сопротивление перехода протекающему току остается увеличенным, так как концентрация неосновных носителей в полупроводнике мала и дрейфовый ток при прочих равных условиях много меньше прямого тока.

Поданное напряжение называется **обратным (запирающим или закрывающим) напряжением**, а возникающий при этом небольшой ток называют **обратным током**

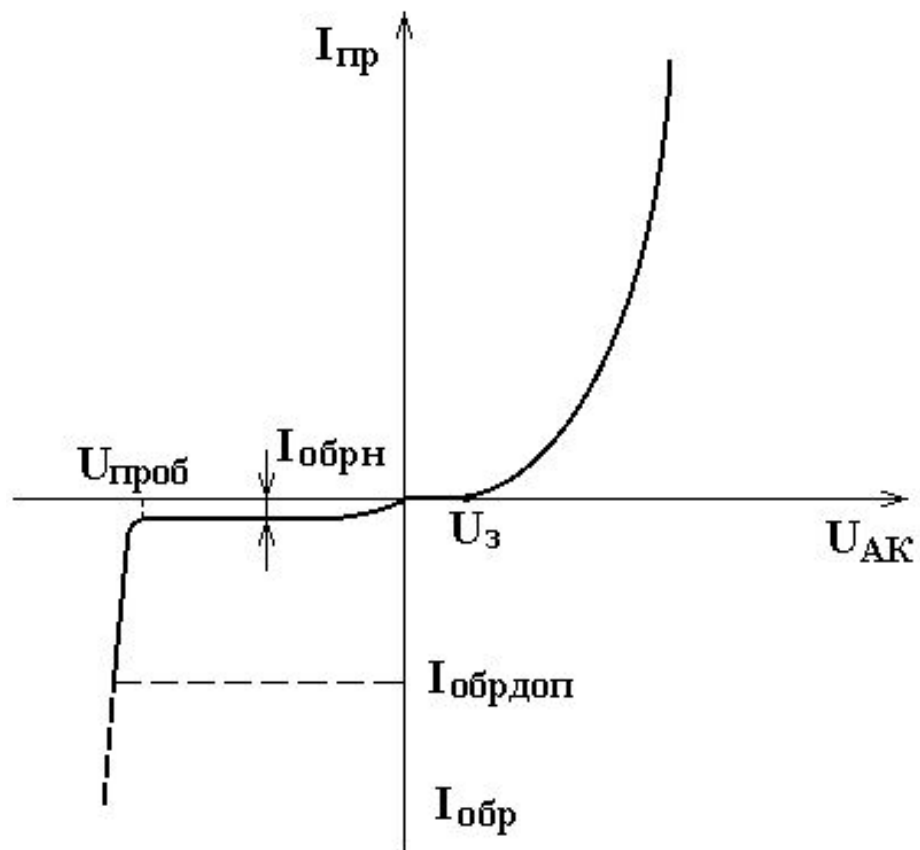
**При большом обратном напряжении возникает резкий рост обратного тока через переход.**

**Это явление называют электрическим пробоем.**

**Когда обратный ток достигает определенной величины ( $I_{обр доп}$ ), электрический пробой переходит в тепловой и p-n-переход полностью разрушается.**

**За положительное направление тока  $i$  и согласованного с током направления напряжения и принято *направление прямого тока диода*.**

## Вольт-амперная характеристика p-n-перехода



Из анализа ВАХ следует основное свойство  $p$ - $n$ -перехода – ***односторонняя проводимость.***

При подаче прямого напряжения ток через переход возрастает по экспоненциальному закону. Обратный ток, возникающий при обратном напряжении, значительно меньше прямого и слабо зависит от величины обратного напряжения. При подаче на вход переменного напряжения через переход будет протекать в основном прямой ток. Поэтому  $p$ - $n$ -переход называют ***выпрямляющим переходом.***

Приборы, обладающие односторонней проводимостью: высокой (для токов прямого направления) или низкой (для токов обратного направления), получили название ***вентилей.***

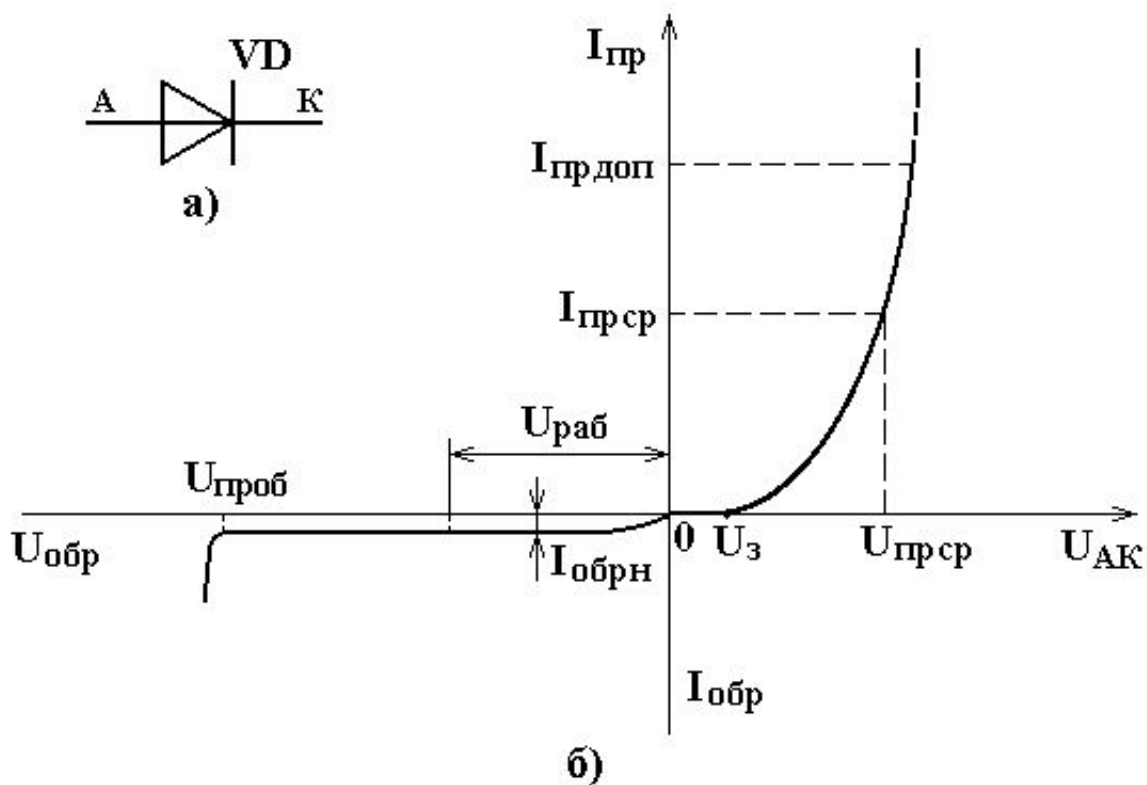
В качестве вентилей применяют различные электронные приборы, в том числе полупроводниковые диоды.

## ***Полупроводниковый диод (вентиль) –***

это прибор с одним выпрямляющим переходом и двумя выводами, действие которого обусловлено вентильными свойствами *p-n*-перехода. Условное графическое обозначение полупроводникового диода и его вольт-амперная характеристика приведены на рисунке ниже



**Условное графическое обозначение (а) и вольт-амперная характеристика (б) полупроводникового диода (вентилия)**



**Вольт-амперная характеристика показывает, что при увеличении прямого напряжения экспоненциальное возрастание тока происходит только на начальном участке. В дальнейшем ток через диод увеличивается практически по линейному закону. Это объясняется наличием объемных сопротивлений р- и n-областей.**

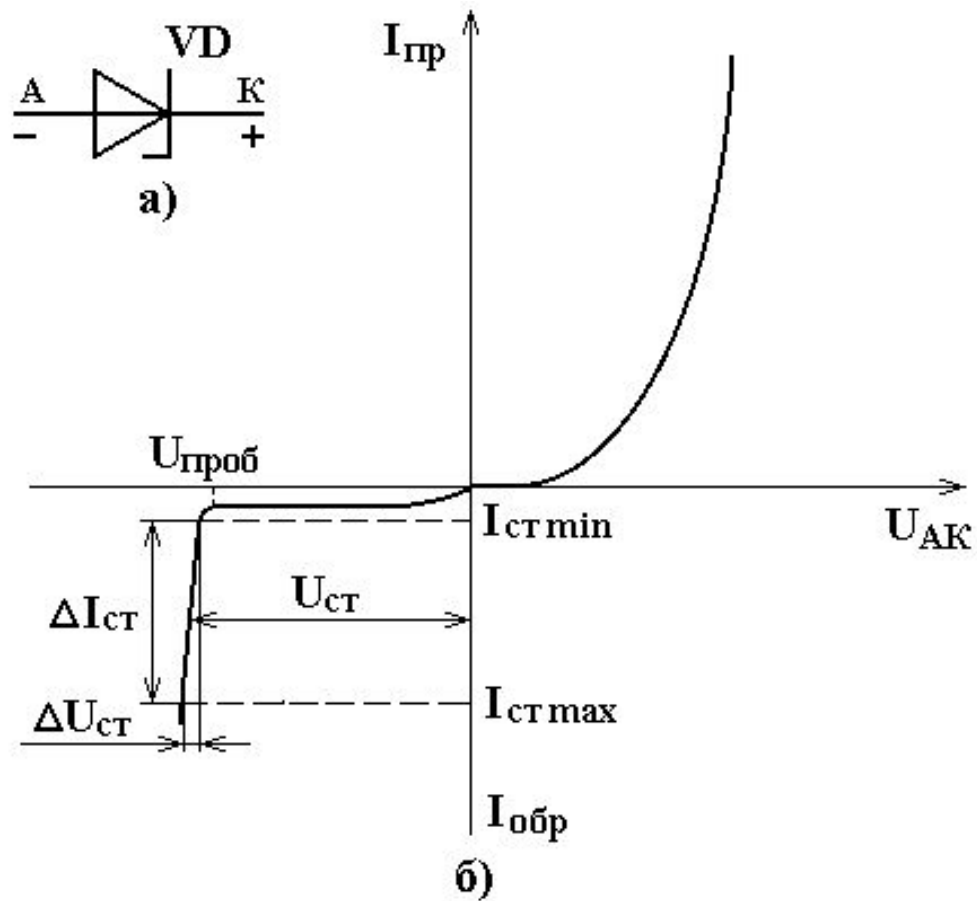
**Основные параметры полупроводникового диода (вентиля):**

- предельная мощность  $P_{пред}$ ;
- допустимый прямой ток  $I_{пр доп}$ ;
- средняя величина выпрямленного тока  $I_{пр ср}$ ;
- падение напряжения  $U_{пр ср}$ ;
- рабочее обратное напряжение  $U_{раб}$ , как правило, не превышает половины напряжения, при котором происходит пробой;
- обратный ток при рабочих обратных напряжениях  $I_{обр н}$ .

## ***Стабилитрон –***

это полупроводниковый прибор, рабочий участок вольт-амперной характеристики которого находится в узкой области обратных напряжений, соответствующих электрическому пробое его *p-n*-перехода. Стабилитроны предназначены для стабилизации напряжения на заданном участке. Условное графическое обозначение стабилитрона и его вольт-амперная характеристика приведены на рисунке ниже

**Условное графическое обозначение (а)  
и вольт-амперная характеристика (б)  
стабилитрона**



## Основные параметры стабилитронов :

- напряжение стабилизации  $U_{ст}$  (от 3,3 до 96 В),  $U_{ст} \approx U_{проб}$ ;
- максимальный ток стабилизации  $I_{ст\ max}$  ограничивается максимально допустимой мощностью ( $I_{ст\ max} = P_{max}/U_{ст}$ );
- минимальный ток стабилизации  $I_{ст\ min}$  определяется гарантированной устойчивостью состояния пробоя;
- дифференциальное сопротивление  $r_{диф} = \Delta U_{ст}/\Delta I_{ст}$ .

Стабилитроны применяются в стабилизаторах напряжения, различных импульсных устройствах, ограничителях уровня напряжения и т.д.

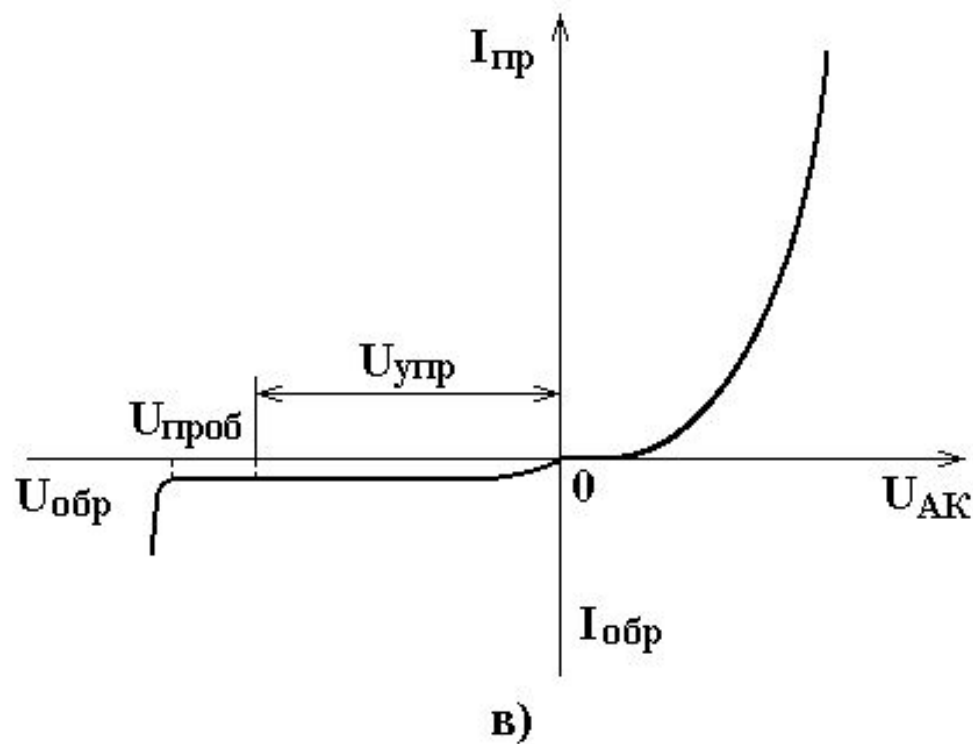
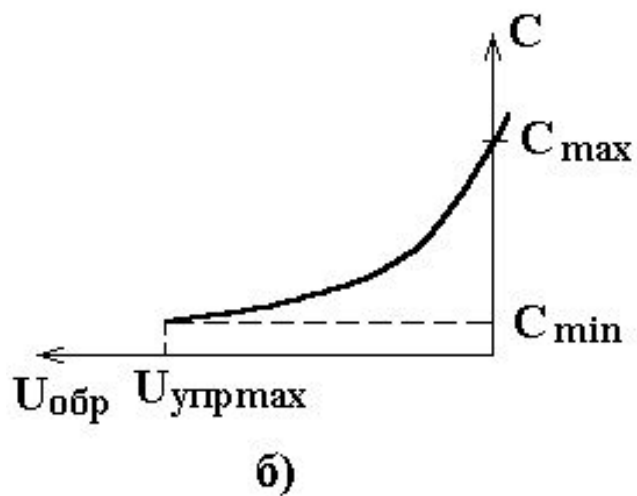
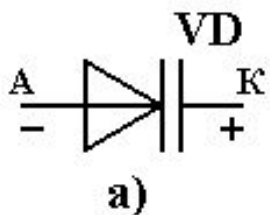
## **Варикап –**

это полупроводниковый диод, в котором используется зависимость емкости  $p$ - $n$ -перехода от значения обратного напряжения. Варикапы применяют в качестве элементов с электрически управляемой емкостью. Основной характеристикой варикапа является вольт-фарадная:

$$C = f(u_{обр}).$$

Условное графическое обозначение варикапа и его вольт-фарадная и вольт-амперная характеристики приведены на рисунке ниже

**Условное графическое обозначение (а)  
и вольт-амперная характеристика (б)  
варикапа**



## Основные параметры варикапов :

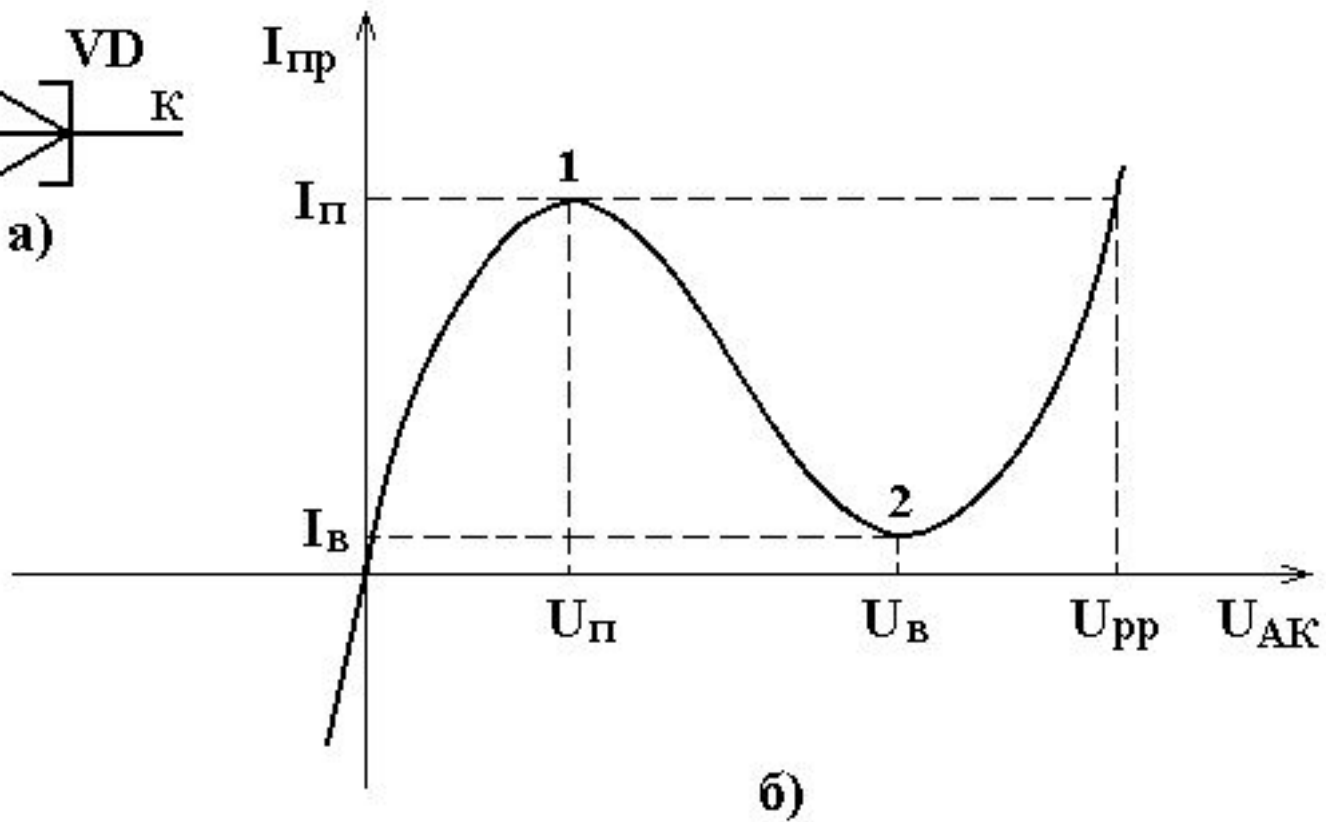
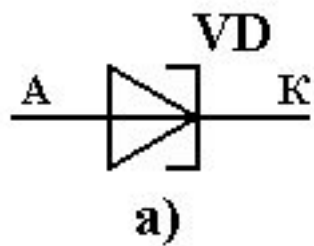
- емкость варикапа  $C_v$  – емкость, измеренная между выводами варикапа при заданном значении обратного напряжения (для разных типов варикапов от нескольких единиц до нескольких сотен пФ);
- управляющее напряжение  $U_{упр}$ , которое не должно превышать напряжение, при котором происходит пробой;
- коэффициент перекрытия по емкости  $K_C = C_{max}/C_{min}$ .



## Туннельный диод –

это полупроводниковый диод, содержащий  $p$ - $n$ -переход с очень малой толщиной запирающего слоя. Его вольт-амперная характеристика при прямом напряжении имеет падающий участок 1-2 (см. схему). Наличие такого участка объясняется возникновением **туннельного эффекта**, то есть когда ток начинает проходить через переход при напряжении, значительно меньшем, чем контактная разность потенциалов. Условное графическое обозначение туннельного диода приведено на рисунке ниже

**Условное графическое обозначение (а)  
и вольт-амперная характеристика (б)  
туннельного диода**



## Основные параметры туннельного диода:

- *пиковый ток  $I_p$  – прямой ток в точке максимума вольт-амперной характеристики (от десятых долей до сотен мА);*
- *ток впадины  $I_v$  – прямой ток в точке максимума вольт-амперной характеристики;*
- *отношение токов  $I_p/I_v$ ;*
- *напряжение пика  $U_p$  – прямое напряжение, соответствующее пиковому току;*
- *напряжение впадины  $U_v$  – прямое напряжение, соответствующее току впадины;*  
*напряжение раствора  $U_{pp}$  – прямое напряжение, большее напряжения впадины, при котором ток равен пиковому*

Туннельные диоды находят применение в схемах усилителей и генераторов СВЧ диапазона, в быстродействующих переключающих устройствах, устройствах памяти с двоичным кодом и т.д.

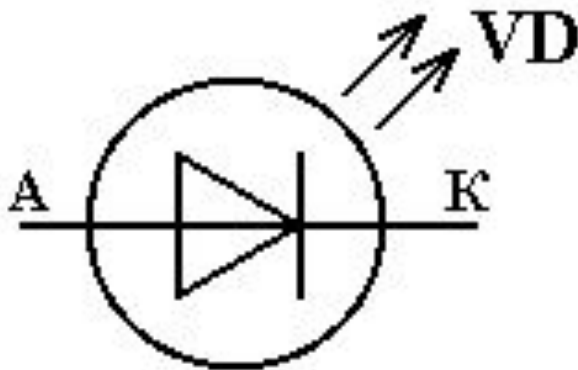
## **Светоизлучающие диоды –**

это полупроводниковые диоды,  
в которых осуществляется преобразование электрической  
энергии в энергию светового излучения.

Условное графическое обозначение  
светоизлучающего диода

приведено на рисунке ниже

## *Условное графическое обозначение светоизлучающего диода*



Светоизлучающие диоды применяют  
в качестве индикаторов.

Широкое применение находят буквенно-цифровые  
индикаторы в виде матриц.

Кроме *p-n*-перехода часто используется переход между металлом и *n*-проводником.

В зависимости от используемых материалов этот переход может:

1) обладать односторонней проводимостью

ИЛИ

2) иметь малое сопротивление

В первом случае выпрямляющий переход называют ***переходом Шоттки***

Во втором случае переход металл-полупроводник, имеющий малое сопротивление, называют ***омическим***.

Его используют для создания электрических выводов из полупроводниковых областей.

Диоды,  
использующие выпрямляющий переход металл-полупроводник,  
называются  
**диодами Шоттки.**

В этих диодах, как и в диодах с  $p-n$ -переходом, возникает объемный заряд. В связи с тем, что в металле объемный заряд не накапливается, его величина в два раза меньше, чем в  $p-n$ -переходе. Таким образом, диод Шоттки характеризуют малое прямое падение напряжения и малое время восстановления обратного напряжения.



*Эти диоды обладают увеличенным быстродействием и широко используются при изготовлении интегральных схем. Технология их изготовления хорошо совмещается с современной технологией изготовления микросхем средней и большой степени интеграции.*

# Рекомендуемая литература

---

- 1. Алтунин Б.Ю., Панкова Н.Г. Теоретические основы электротехники:** Комплекс учебно - методических материалов: Часть 1 / Б.Ю. Алтунин, Н.Г. Панкова; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Н.Новгород, 2007.-130 с.
- 2. Алтунин Б.Ю., Кралин А.А. Электротехника и электроника:** комплекс учебно-методических материалов: Ч.1/ Б.Ю. Алтунин, А.А. Кралин; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Н.Новгород, 2007.-98 с.
- 3. Алтунин Б.Ю., Кралин А.А. Электротехника и электроника:** комплекс учебно-методических материалов: Ч.2/ Б.Ю. Алтунин, А.А. Кралин; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Н.Новгород, 2008.-98 с
- 4. Касаткин, А.С. Электротехника** /А.С. Касаткин, М.В. Немцов.-М.: Энергоатомиздат, 2000.
- 5. Справочное пособие по основам электротехники и электроники** /под. ред. А.В. Нетушила.-М.: Энергоатомиздат, 1995.
- 6. Манаев Е.И. Основы радиоэлектроники.**-3-е изд., перераб. И доп.-М.: Радио и связь, 1990.-512 с.: ил.
- 7. Новожилов, О. П. Электротехника и электроника:** учебник / О. П. Новожилов. – М.: Гардарики, 2008. – 653 с.



# Тема 7 Закончена

Благодарю за внимание