

# Аналоговая электроника и техника измерений.

Элементы современной теории проводимости.

P-n переход.

Полупроводниковый диод.

Полупроводниковые выпрямители.

# Строение атома

Модель атома предложенная Бором: представляет собой положительно заряженное ядро и электронная оболочка. Электроны расположены на разных уровнях, и имеют различную величину энергии связи с ядром. Каждый уровень разбит на подуровни, на каждом из подуровней, согласно принципу запрета Паули, может находиться не более двух электронов.

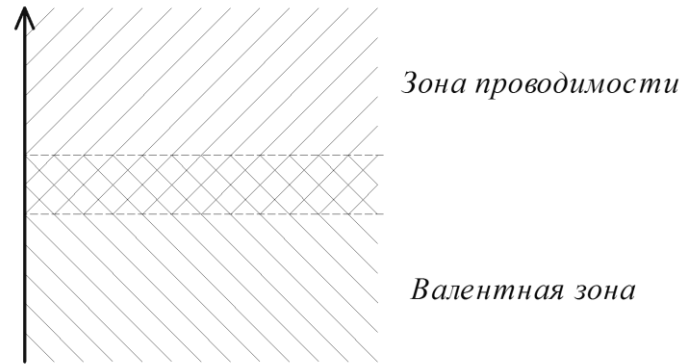
Энергия связи электронов нижних уровней очень велика, оторвать электрон от атома проблематично. На верхних уровнях, энергии ниже и у многих химических элементов присутствуют свободные подуровни, на которые могут перемещаться электроны с более нижних подуровней, или электроны соседних атомов вещества. Верхние уровни электронной оболочки разделяют на валентную зону и зону проводимости.

Перемещение электронов между соседними атомами – электрический ток.

Величина энергии необходимая для перехода электрона из валентной в зону проводимости называется шириной запрещенной зоны.

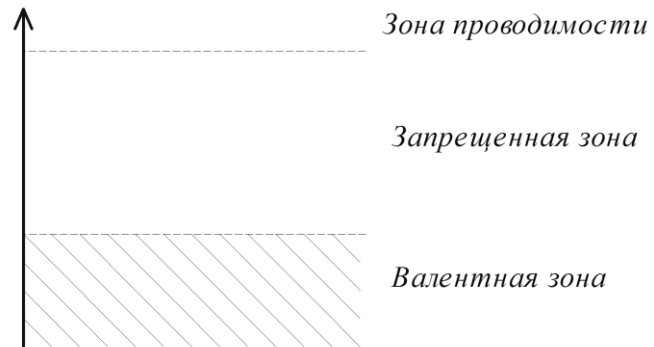
# Классификация материалов по ширине запрещенной зоны

Запрещенная зона отсутствует



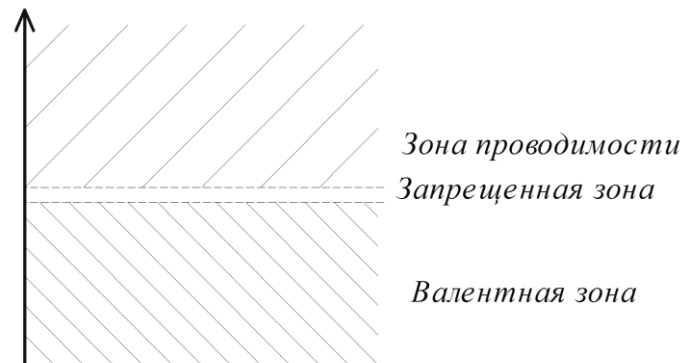
Проводник

Ширина запрещенной  
зоны более 5эВ



Диэлектрик

Ширина запрещенной  
зоны 0,1-4 эВ



Полупроводник

## Полупроводники.

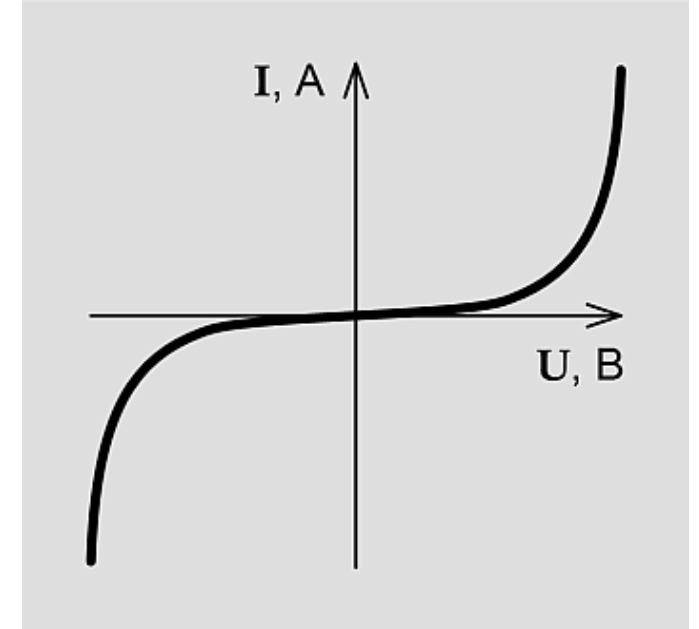
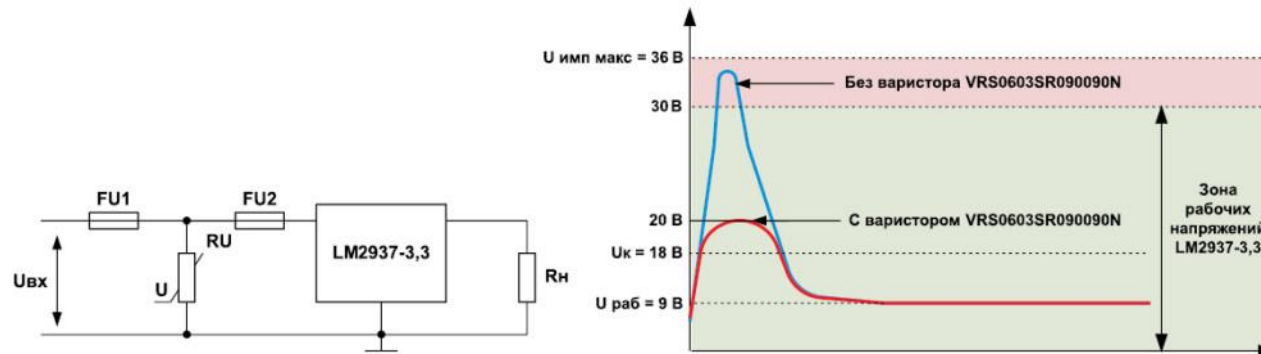
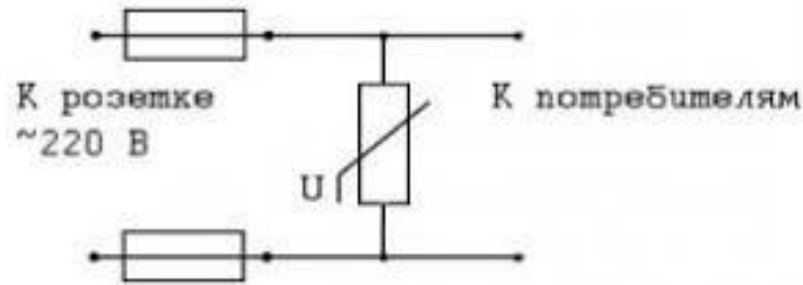
При температуре, отличной от абсолютного нуля, электроны в ковалентных связях могут отделяться от своей пары и участвовать в создании электрического тока при приложении напряжения. При освобождении электрона остаётся незаполненное место в ковалентной паре - «дырка». Последовательное заполнение свободной связи электронами соседних атомов эквивалентно движению «дырки» в направлении, противоположном движению электронов, что равносильно перемещению положительного заряда. Процесс восстановления ковалентной пары называется рекомбинация.

Собственная проводимость полупроводника мала – количество возникающих электронно-дырочных пар равно количеству рекомбинаций и количество носителей заряда всегда мало. Его можно увеличить, сообщая полупроводнику дополнительную энергию, на этом основан принцип действия термо- и фото-резисторов, варисторов.

Для увеличения проводимости применяют легирование – добавление примеси.

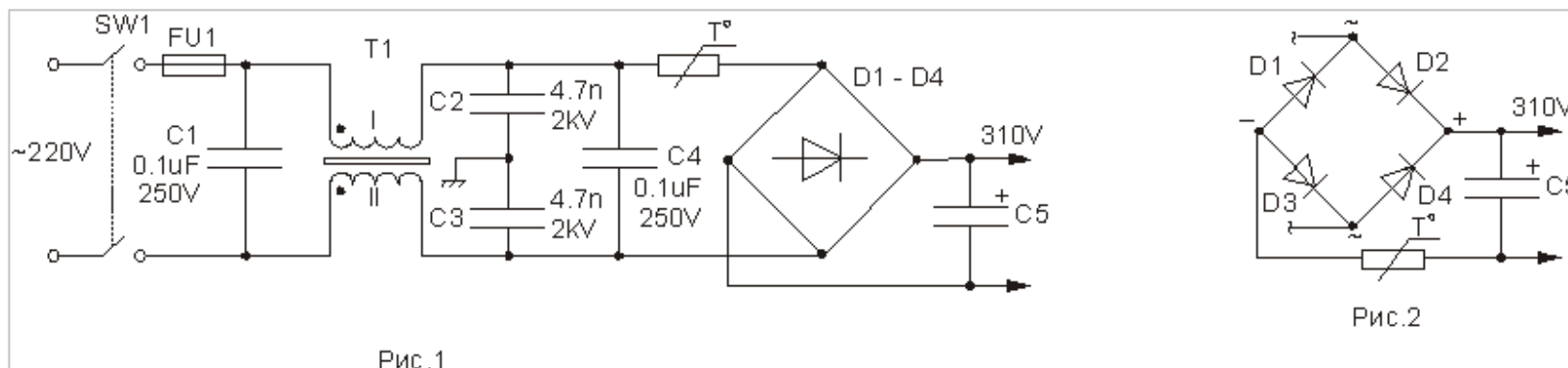
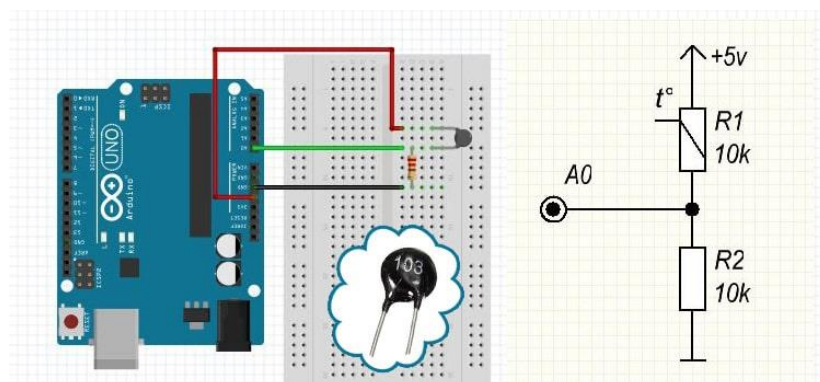
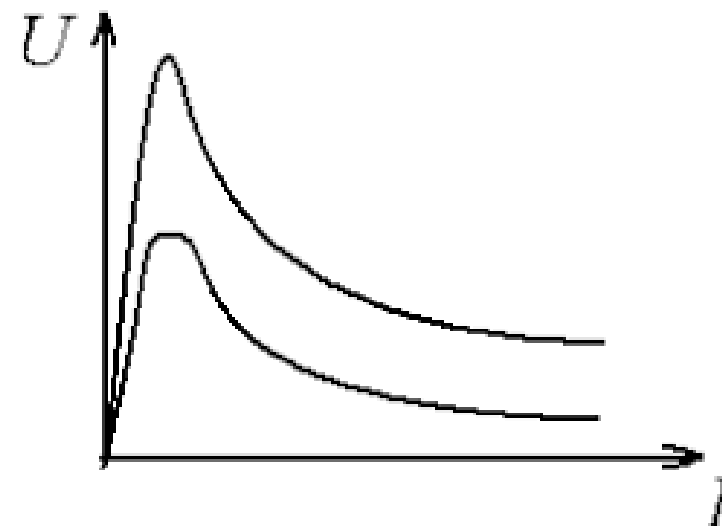
# Варистор.

Варистор – прибор с симметричной ВАХ. Варисторы применяются в цепях постоянного и переменного тока для защиты от импульсных перенапряжений.



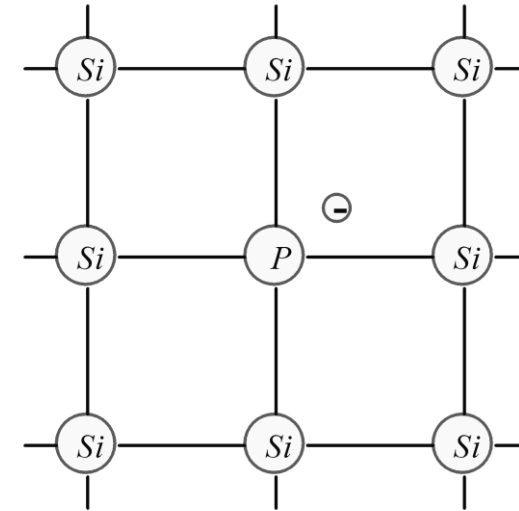
# Термистор.

Термисторы применяются для ограничения пусковых (начальных) токов в цепи и в электронных измерителях температуры.

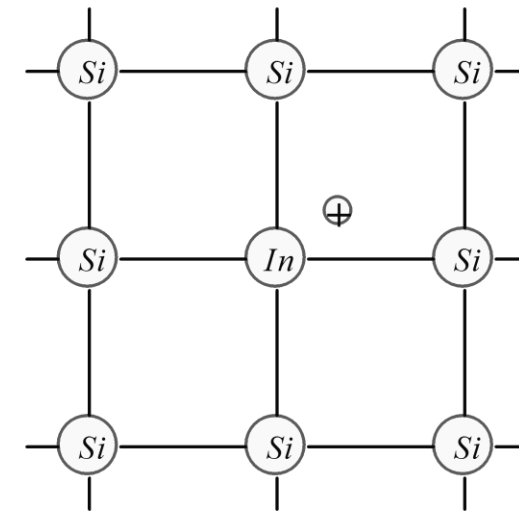


# Легирование полупроводника

Легирование кремния пятивалентной  
примесью - донором (фосфор)  
Полупроводник n-типа (основные носители  
электроны)



Легирование кремния трехвалентной  
примесью - акцептором (индий)  
Полупроводник p-типа (основные носители  
«дырки»)



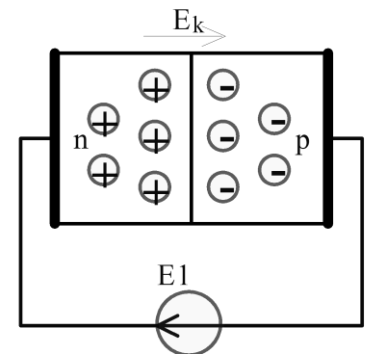
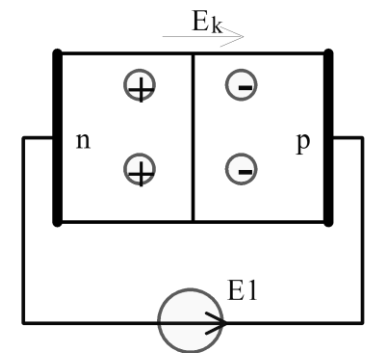
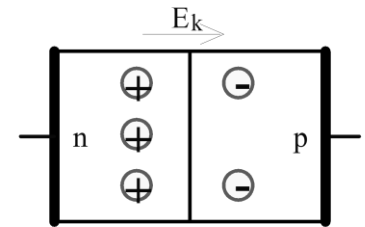
## ***P-n-переход***

*P-n-переход.* За счет смещения (диффузионный ток) и последующей рекомбинации основных носителей в зоне перехода, возникает поле смещения. Поле препятствует дальнейшему движению основных носителей.

n-область катод, p-область анод.

При прямом смещении величина барьера вызванного полем смещения снижается, при достижении величины напряжения  $\sim 0,7$  В, через диод начинает протекать ток, обусловлен движением основных носителей. Величина тока экспоненциально связана с приложенным напряжением.

При обратном смещении основные носители «оттягиваются» от зоны перехода, величина барьера растет, ток называемый током утечки очень мал, обусловлен движением неосновных носителей.





## Вольт-амперная характеристика диода

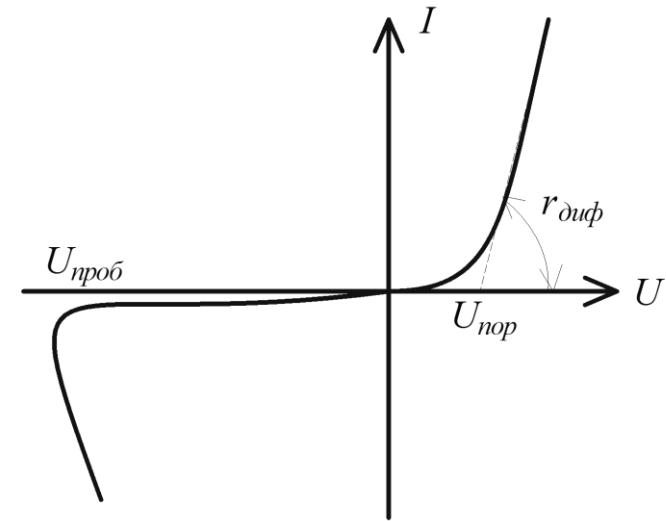
На вольт-амперной характеристике диода можно выделить три основных участка: прямой участок при смещении большем 0,7 В, обратный участок при смещении меньшем напряжения пробоя, область пробоя.

Пробой  $p$ - $n$ -перехода определяется несколькими процессами:

Туннельный пробой (эффект Зенера) – возникает при достижении величин энергии, когда становится возможным переход электронов между валентными зонами двух атомов.

Лавинный пробой – энергия электронов достигает значений при которых возможна ударная ионизация атомов полупроводника. Количество носителей растет лавинообразно, соответственно также растет обратный ток диода.

Тепловой пробой – при нагреве растет число носителей, и как следствие растет ток. Т.к. охладить быстро не получится, ток нарастает лавинообразно и кристалл диода разрушается.



## Модель диода

В модели Эбберса –Молла:

На прямом участке падение напряжения на диоде определяется через величину дифференциального сопротивления:

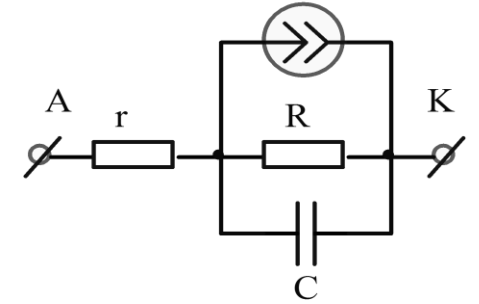
$$r_{\text{диф}} = \frac{dU}{dI}$$

Прямой ток определяется источником с экспоненциальной зависимостью от напряжения.

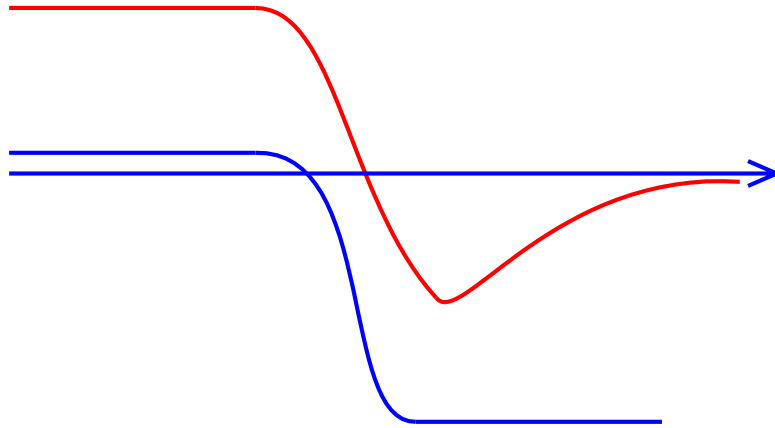
На обратном участке ток определяется резистором  $R$ .

Область пробоя данной моделью не описывается.

$C$  – емкость перехода (барьерная + диффузионная), определяет частотные свойства диода.

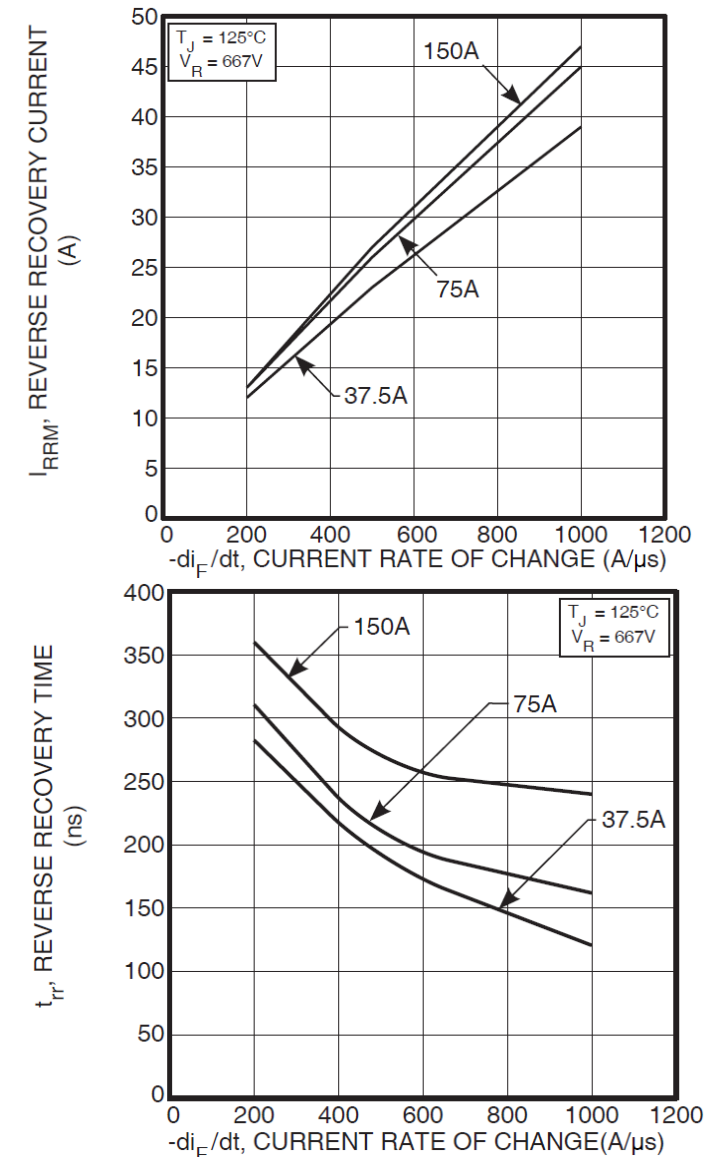


# Эффект обратного восстановления



При работе диода за счет диффузионных процессов в соответствующих областях перехода накапливаются неосновные носители заряда. При быстром изменении полярности приложенного к диоду напряжения эти носители формируют импульс обратного тока р-п перехода большой величины (ток обратного восстановления).

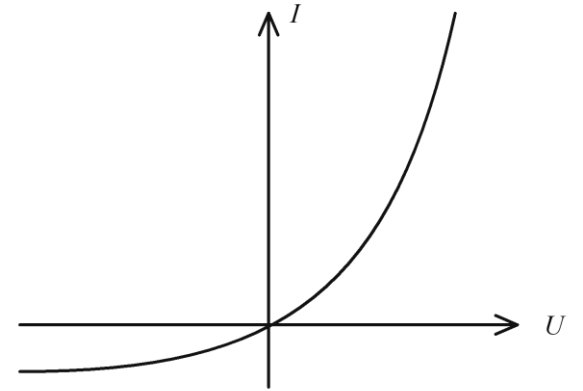
Эффект обратного восстановления увеличивает тепловые потери диода, ограничивая рабочий диапазон.



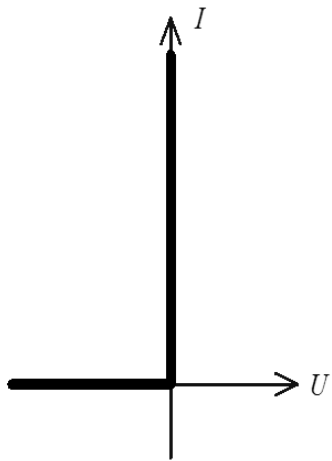
## Упрощенные модели диода

Экспоненциальная модель диода:

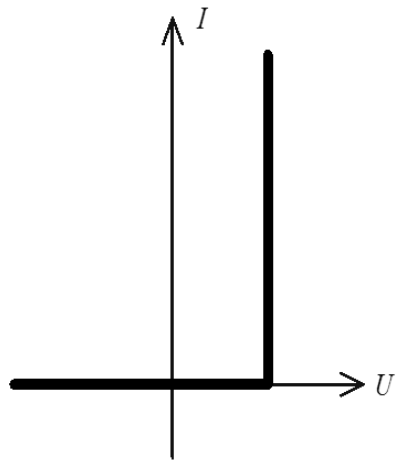
$$I_d = I_0 \left[ \exp \frac{U_d}{\varphi_T} - 1 \right], \quad \varphi_T = \frac{kT}{e}, T = 300K, \varphi_T = 25mV$$



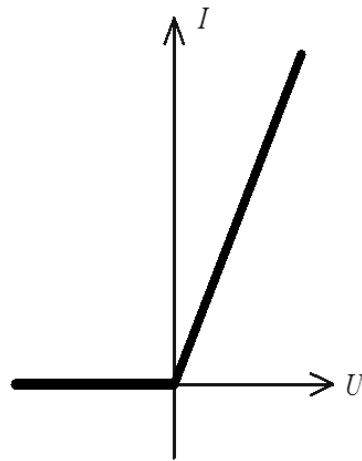
Кусочно-линейные модели диода



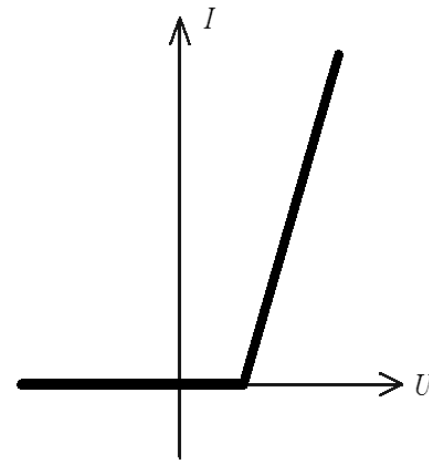
$$U_d = 0,$$



$$U_d = U_{\text{пор}},$$



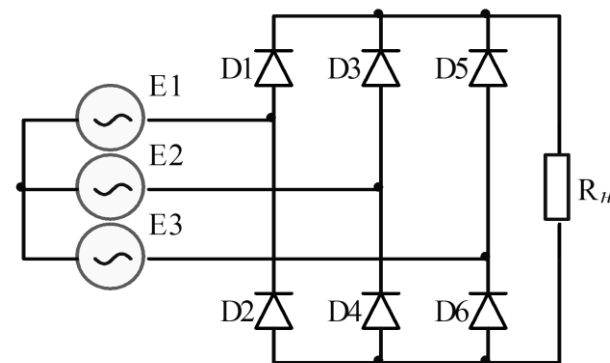
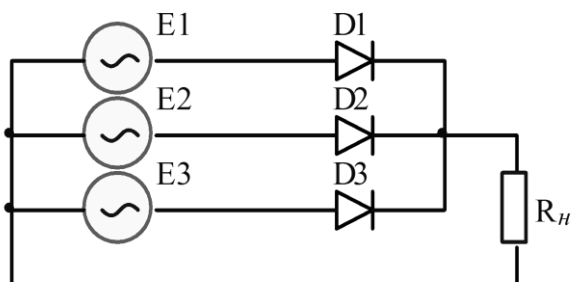
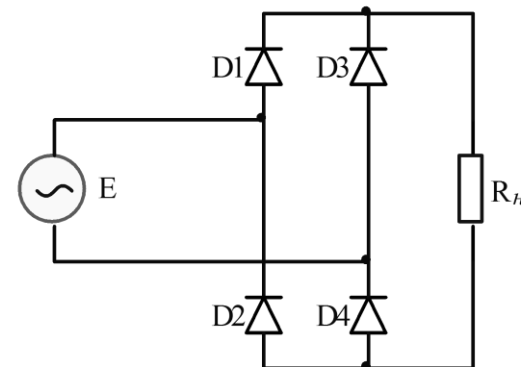
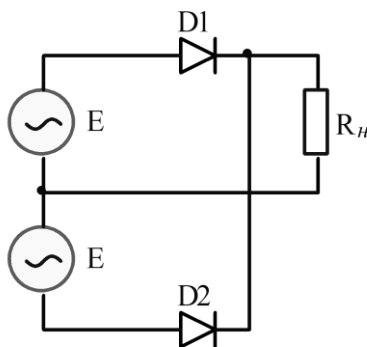
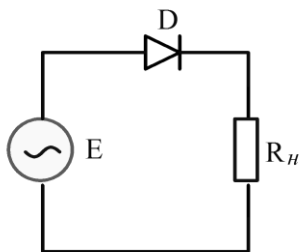
$$U_d = r_{\text{диф}} I_d,$$



$$U_d = U_{\text{пор}} + r_{\text{диф}} I_d$$

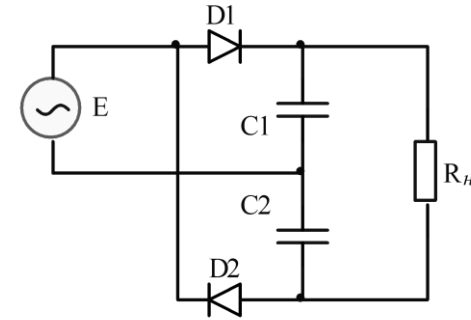
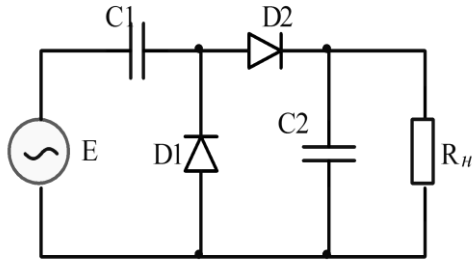
# Полупроводниковые выпрямители

Выпрямитель – электрическая цепь преобразующая переменное напряжение в однополярное пульсирующее. Виды выпрямительных схем:

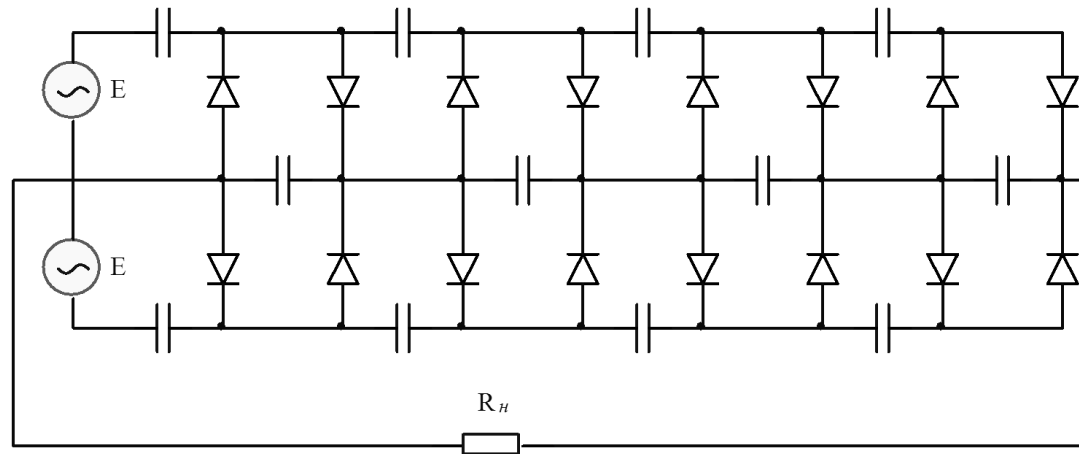


## Умножители напряжения

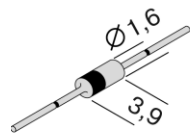
Удвоители напряжения (одно- и двухполупериодный  $U_H \approx 2E$ ):



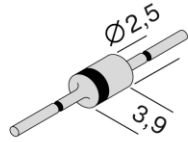
Четырехкаскадный двухполупериодный умножитель напряжения ( $U_H \approx 8E$ ):



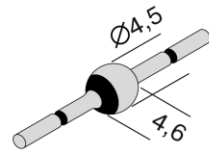
# Диоды



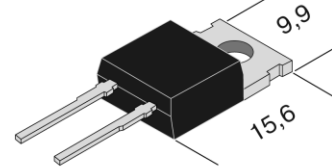
DO-35



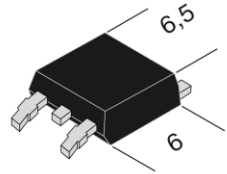
DO-41



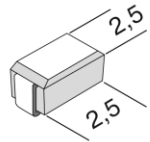
DO-204



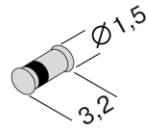
DO-220



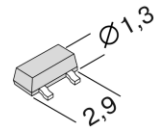
D-PAK



SMA



MELF



SOT-23



## Специальные виды диодов. Диод Шоттки.

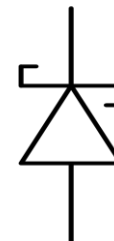
Если соединить полупроводник n-типа и металлический электрод, при том что работа выхода для полупроводника должна быть меньше чем для металла, электроны из полупроводника перейдут в металл и возникнет поле смещения. Такая структура работает как диод. Называется такой диод – **диодом с барьером Шоттки или диодом Шоттки**.

Достоинства:

- нет диффузии,
- малая величина заряда обратного восстановления,
- относительно низкая величина барьера (0,2 – 0,4 В)

Недостатки:

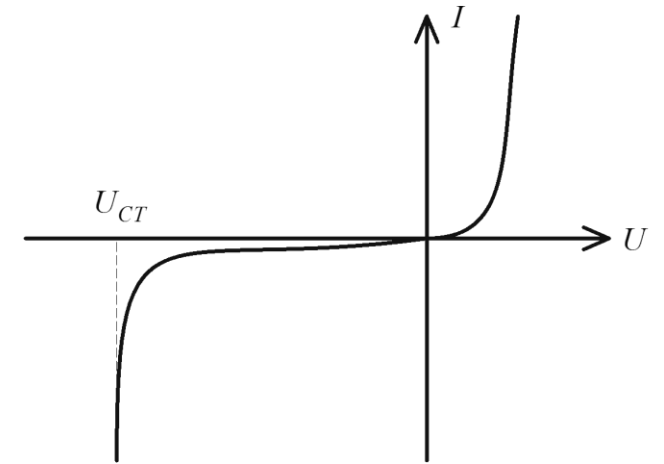
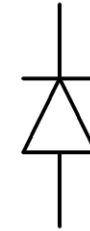
- малая величина обратного напряжения для стандартных диодов Шоттки,
- нет зоны лавинного пробоя,
- величина прямого падения 0,8В для высоковольтных диодов Шоттки (SiC)



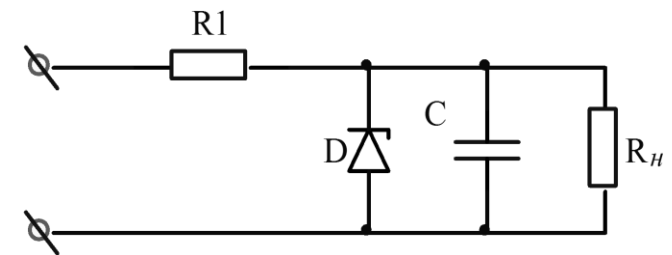


## Специальные виды диодов

**Стабилитрон (диод Зенера)** работает на обратной части характеристики в области пробоя. Работа возможна при соблюдении ограничения по рассеиваемой мощности.

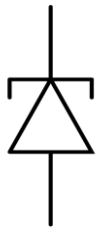
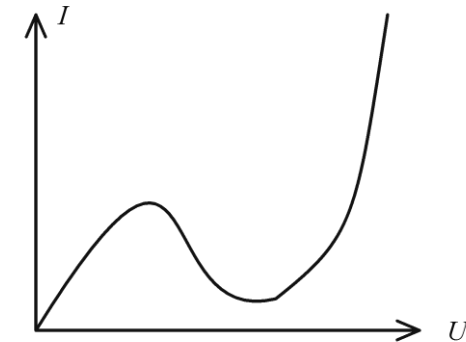
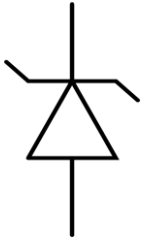


Применение – параметрический стабилизатор напряжения, защитные ограничители напряжения.

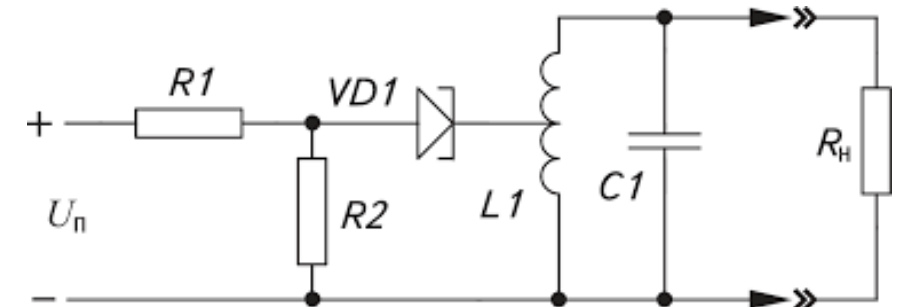


## Специальные виды диодов

**Лавинный диод.** Применение – защитные ограничители напряжения. Еще один тип - саппрессор (Transient Voltage Suppressor). ВАХ соответствует диоду Зенера, но наклон обратной части меньше.

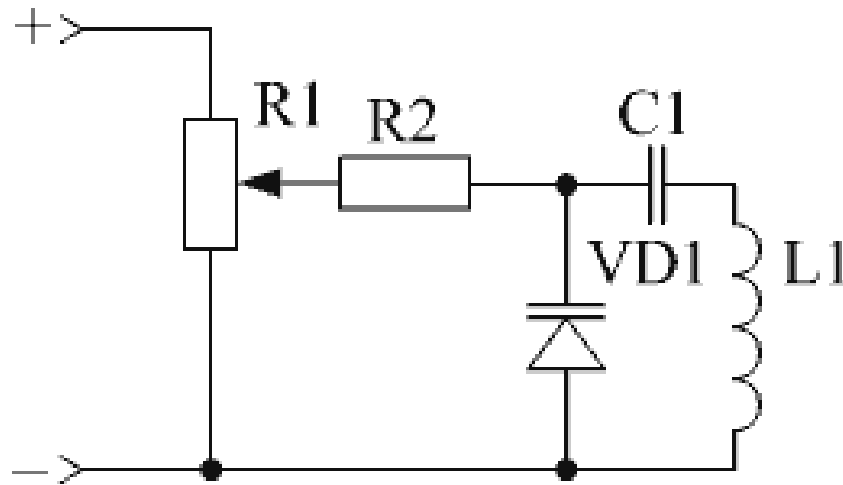
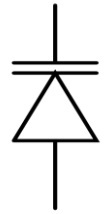


**Туннельный диод.** Изготовлен на основе вырожденного полупроводника – сверхвысокая концентрация примеси. Туннельный эффект наблюдается на прямой части характеристики. Используются в СВЧ усилителях.



## Специальные виды диодов

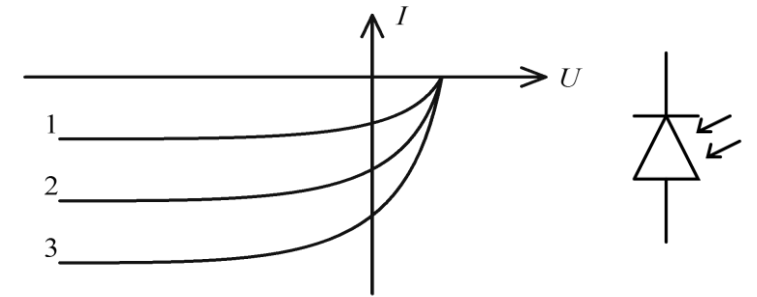
**Варикап.** Принцип работы основан на наличии барьерной емкости р-n-перехода, в области обратных напряжений. При увеличении обратного напряжения емкость уменьшается. Используется в качестве перестраиваемого элемента в СВЧ усилителях, генераторах, схемах автоподстройки и фильтрах.



## Специальные виды диодов

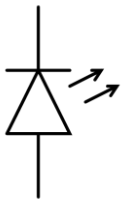
**Фотодиод.** За счет изменения количества носителей вызванного изменением освещенности, меняется обратный ток диода.

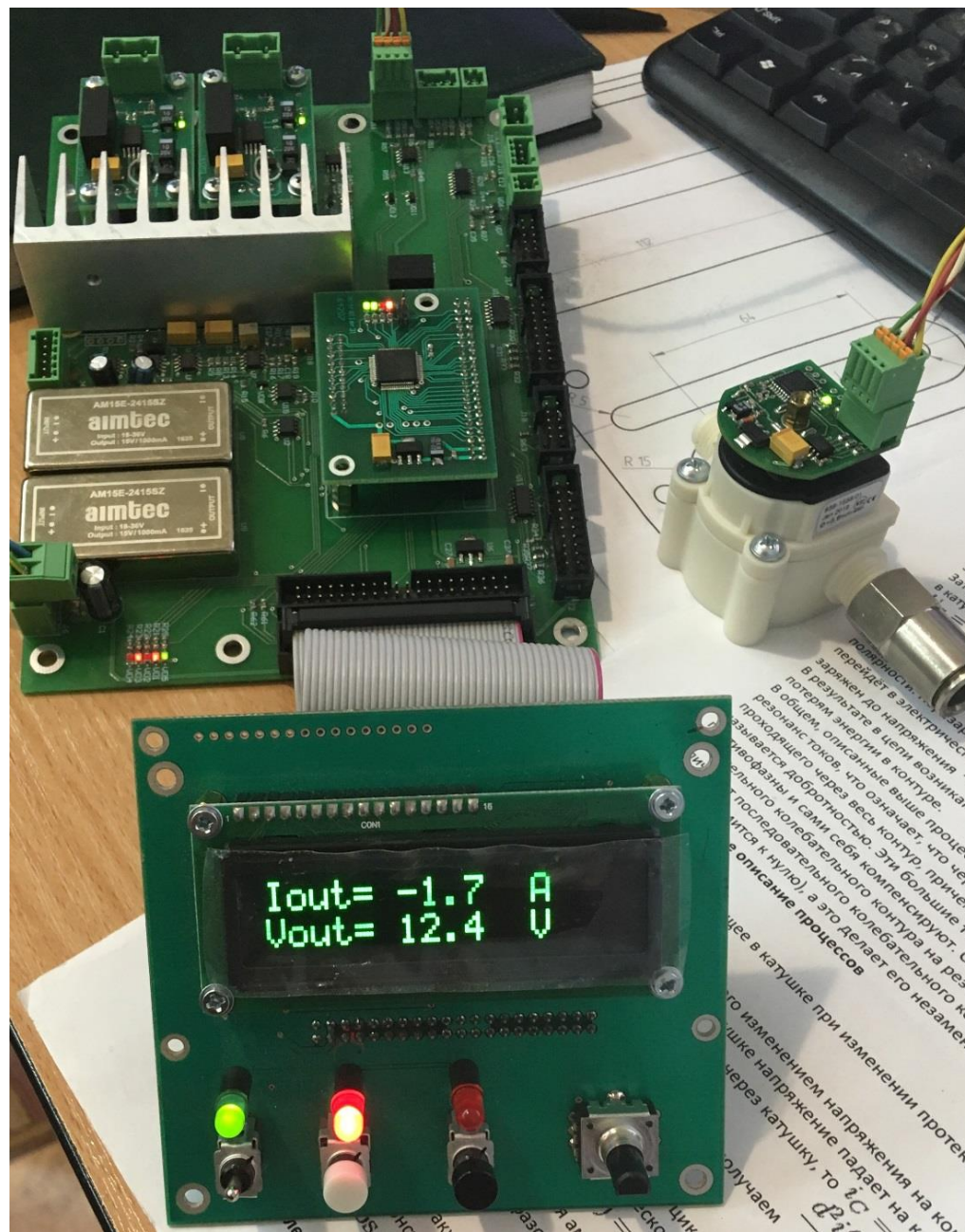
Использование – системы управления и передачи информации.



**Светодиод.** Некоторые виды полупроводниковых кристаллов излучают свет при прохождении через них прямого тока.

Использование - системы управления и передачи информации, системы бытового и промышленного освещения, п/п лазеры.





Горчаков К.М. Аналоговая электроника

## Схема Миткевича.

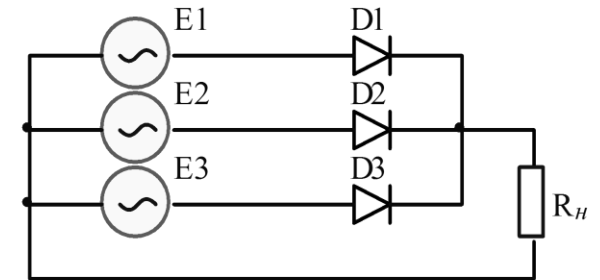
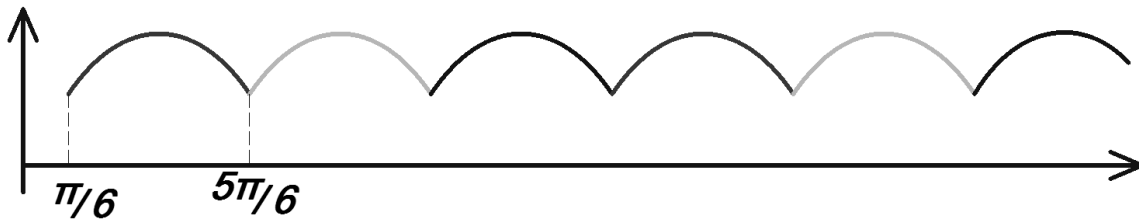
Чтобы определить пределы интегрирования:  $\sin x = \sin(x + 120^\circ)$ . Тогда  $x = \frac{\pi}{6} + n \frac{2\pi}{3}$

$$U_{\text{нсп}} = \frac{1}{T} \int_0^T U_m \sin \omega t dt = \frac{3}{2\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} U_m \sin t dt = U_m \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} = 1,17 U_{\text{rms}}$$

Средний ток каждого диода составляет треть от тока нагрузки:

$$I_{\text{дсп}} = \frac{I_{\text{нсп}}}{3}$$

Максимальное обратное напряжение на диоде  $U_{\text{обр}} = \sqrt{3} U_m = 2,09 U_{\text{нсп}}$



## Схема Ларионова.

$$U_{\text{нсп}} = \frac{1}{T} \int_0^T \sqrt{3} U_m \sin \omega t dt = \frac{6}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} \sqrt{3} U_m \sin \omega t dt = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} U_m = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_{rms} = 2,34 U_{rms}$$

Средние и действующие токи вентиля и фазы, обратное напряжение вентилей:

$$I_{dcp} = \frac{I_{\text{нсп}}}{3}, \quad I_{\phi rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \frac{I_{\text{нсп}}^2}{3} dt} = I_{\text{нсп}} \sqrt{\frac{2}{3}} = 0,816 I_{\text{нсп}}, \quad U_{\text{добр}} = \sqrt{3} U_m = \sqrt{6} U_{rms}$$

