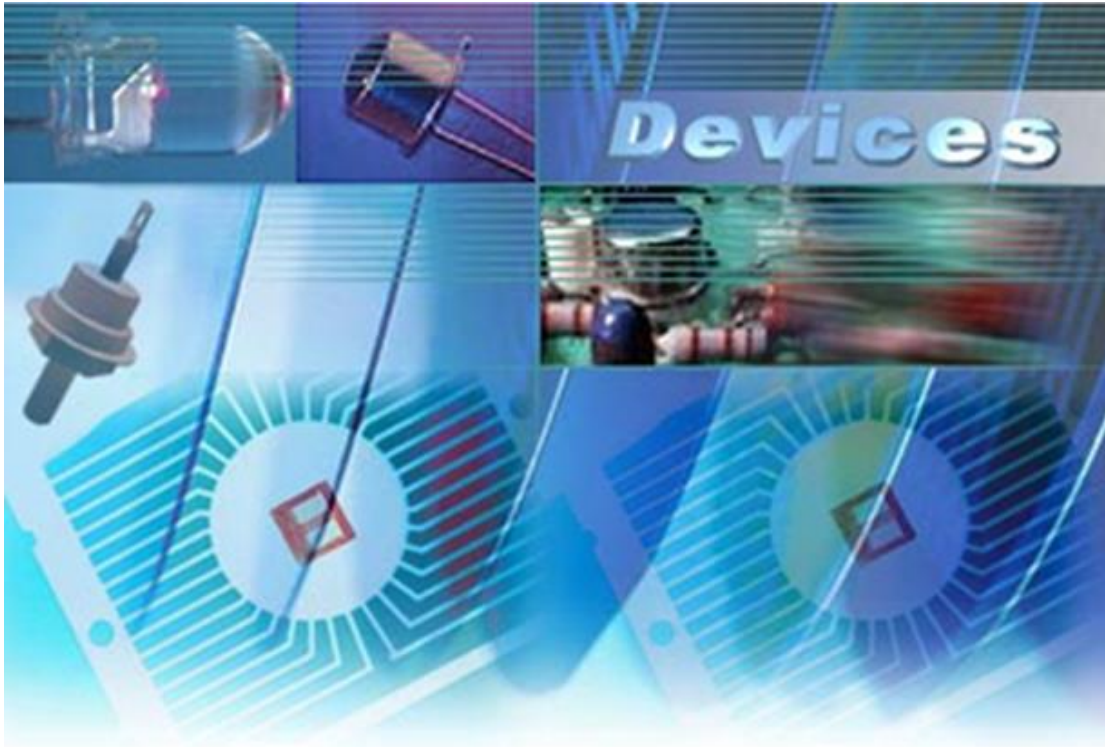




# *Полупроводников диод*

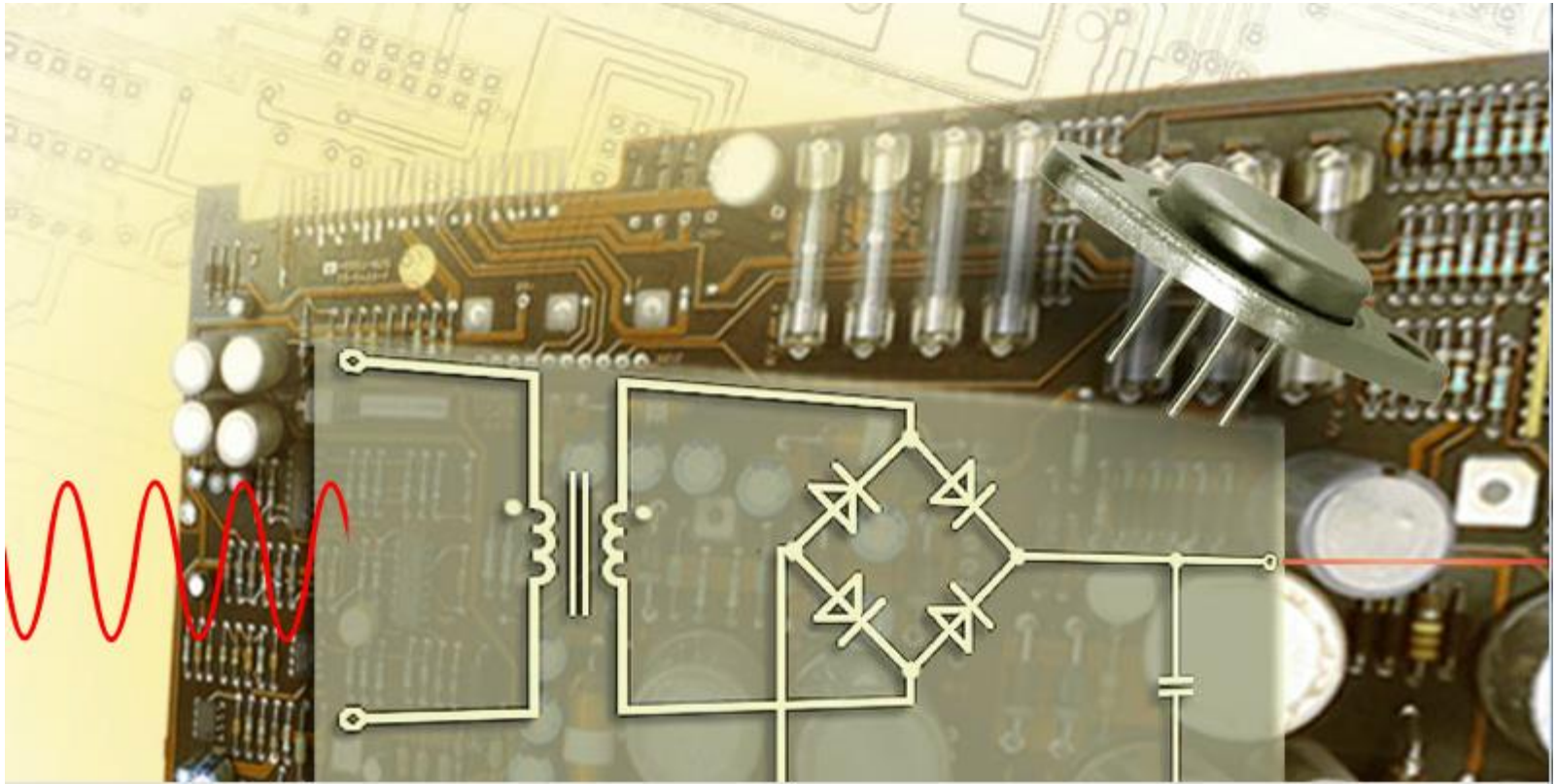
## *Работа по променлив ток*



Полупроводникови  
елементи

# Въведение

Поради едностранната си проводимост диодите са основни градивни елементи в **изправителите**, които преобразуват стандартното променливо напрежение от мрежата (220V, 50 Hz ) в постоянно.



# Цели и предпоставки

Изучава се поведението на диода при работа с променливи сигнали и изменението му при промяна на амплитудата на сигнала и честотата.

**Познавате**

**Разбирате**

**Анализирате**

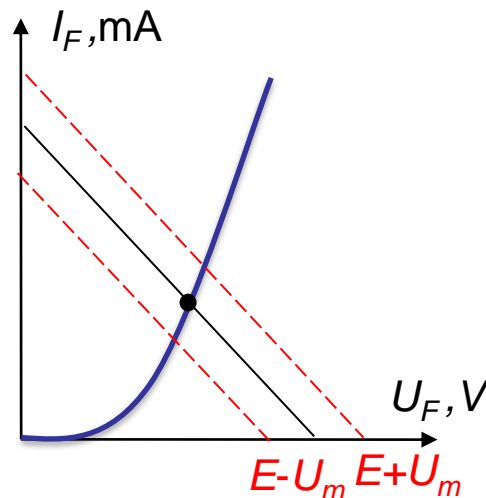
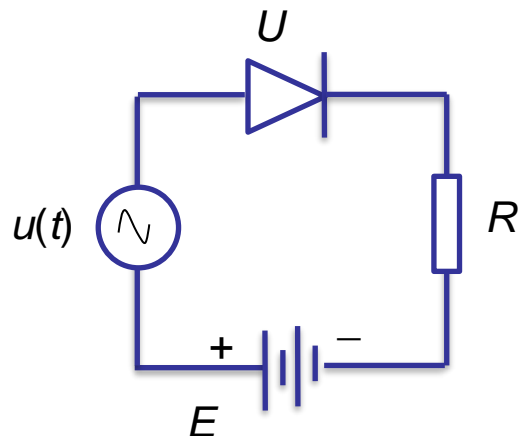
След изучаване на материала вие би трябвало да:

- ✦ Работа на диода при малък променлив сигнал
- ✦ Диференциалното съпротивление на диода
- ✦ Капацитетите на PN прехода
- ✦ Влиянието на честотата на сигнала
- ✦ Процесите при превключване на диода
- ✦ Спецификите на изправителни, високочестотни и импулсни диоди
- ✦ Времедиаграмите на изходния сигнал при различни приложения на диода

**Предпоставки:** работа на диода по постоянен ток

# Работа на диода по ~ ток

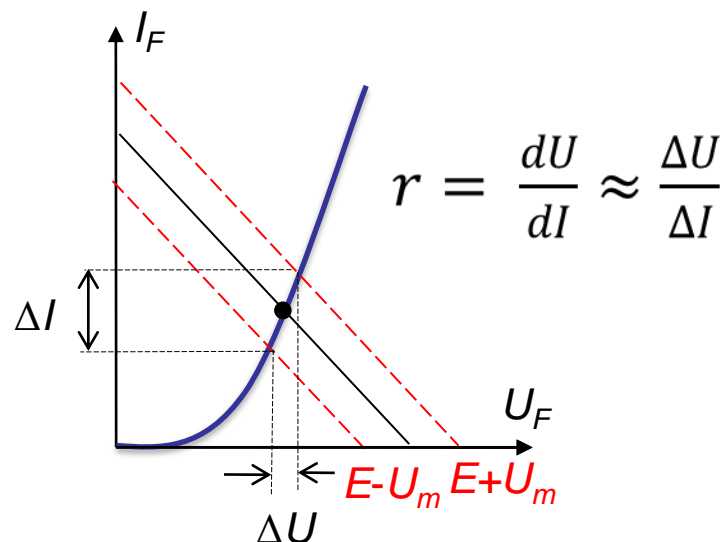
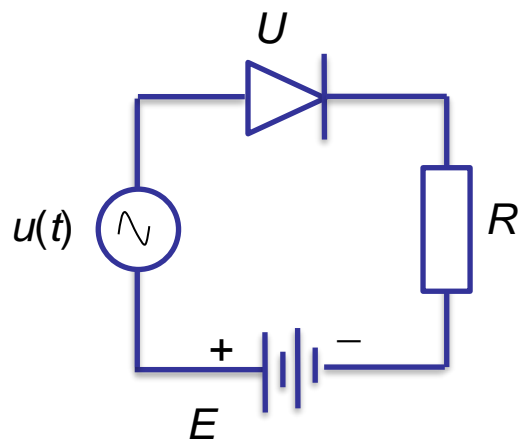
Най-често диодите се използват за изправяне, детектиране и модулация на променлив сигнал.



Когато освен постоянното напрежение към диода се приложи и променлив синусоиден сигнал  $u(t) = U_m \sin \omega t$  с амплитуда  $U_m$ , за положителния полупериод максималната резултантна стойност на захранващото напрежение ще бъде  $E + U_m$ , а за отрицателния – съответно  $E - U_m$ .

# Диференциално съпротивление

Около работната точка се образува област, определена от синусоидния сигнал, в която се дефинира **променливотоковото (диференциално) съпротивление** на диода.

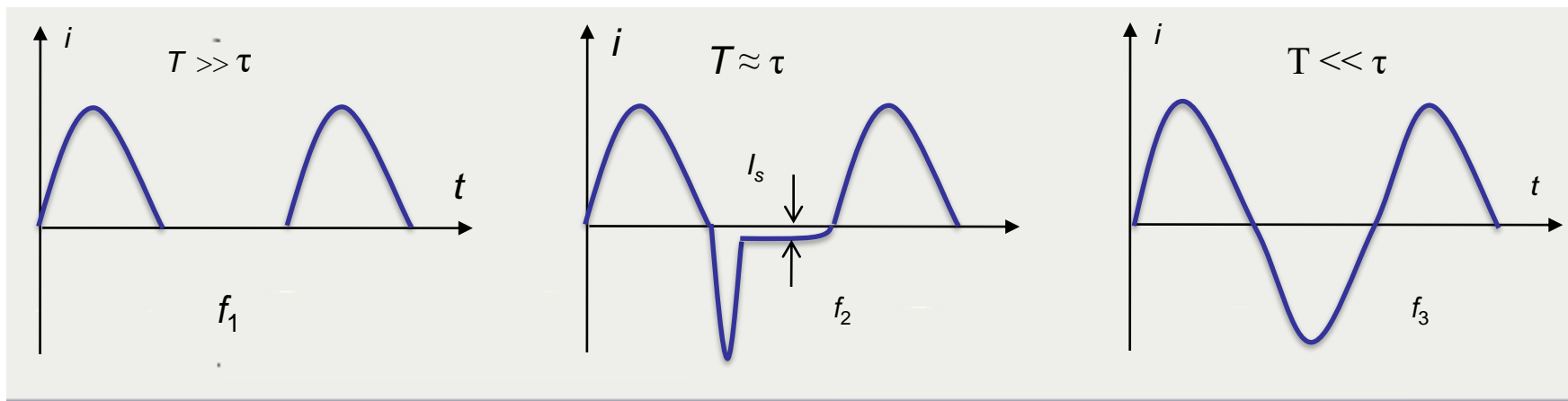


$$r = \frac{dU}{dI} = \frac{\varphi_T}{I + I_s}$$

Аналитичният израз за диференциалното съпротивление се определя чрез диференциране на уравнението на волтамперната характеристика на диода.

# Честотни свойства

Под действие на синусоидни сигнали с различна честота  $u(t) = U_m \sin \omega t$ , където  $\omega = 2\pi f$ , а периодът  $T = 1/f$ , преходните процеси в диода протичат в течение на времето на живот на токоносителите  $\tau$ .



Ниски честоти

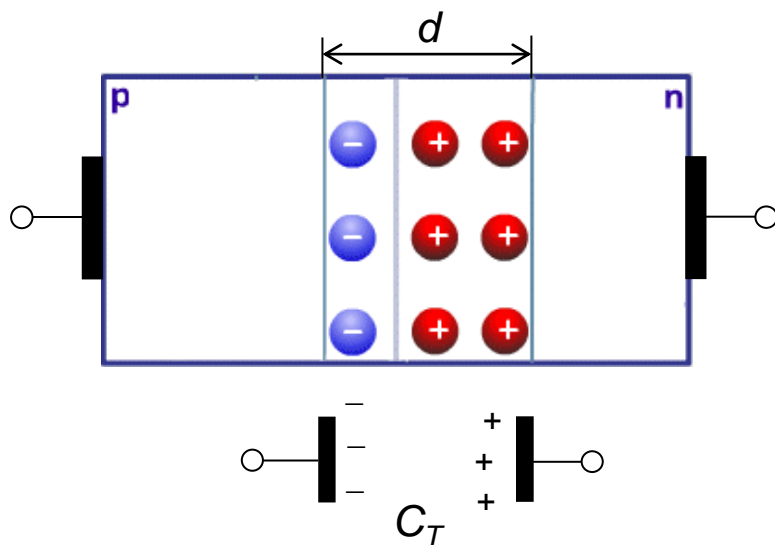
$f_1 \ll f_2 \ll f_3$

При **високи** честоти диодът **губи** **изправителните си свойства**.

Ограничението в честотния обхват на работа е свързано с наличието на капацитети на диода.

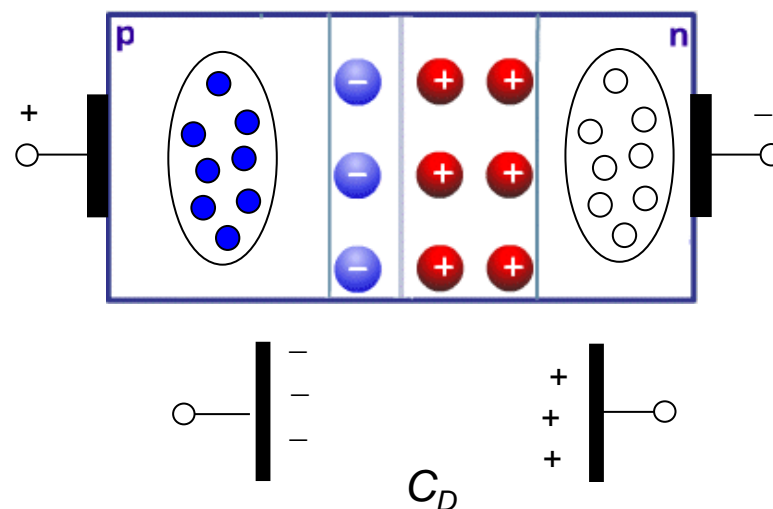
# Капацитети на диода

Полупроводниковият диод притежава капацитивни свойства, защото има способност да натрупва и отдава заряд при промяна на приложеното върху него напрежение – съответно в PN прехода и в неутралните области.



Бариерен капацитет

$$C = C_T + C_D$$

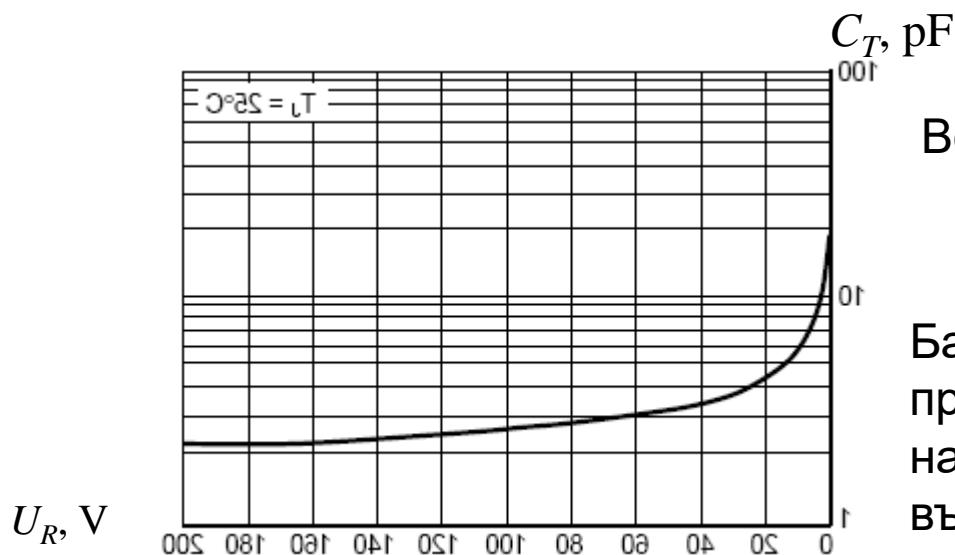


Дифузен капацитет

# Бариерен капацитет

**Бариерният капацитет** характеризира съсредоточения в  $PN$  прехода заряд, създаден от йоните на примесите.

$$C_T = \frac{dQ}{dU} \quad C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d} \quad C_T \sim \frac{SN_D}{\sqrt{U}}$$



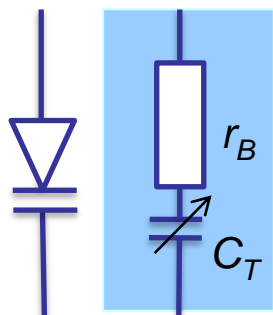
Волт-фарадна характеристика

Бариерният капацитет е по-голям при право включване и намалява с нарастване на обратното напрежение върху диода.

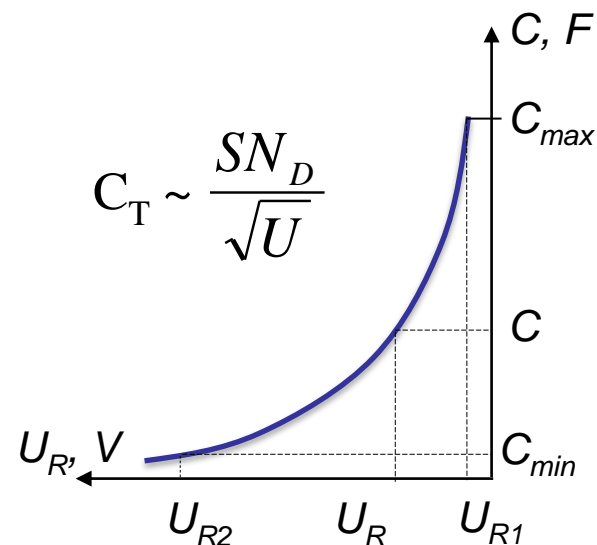
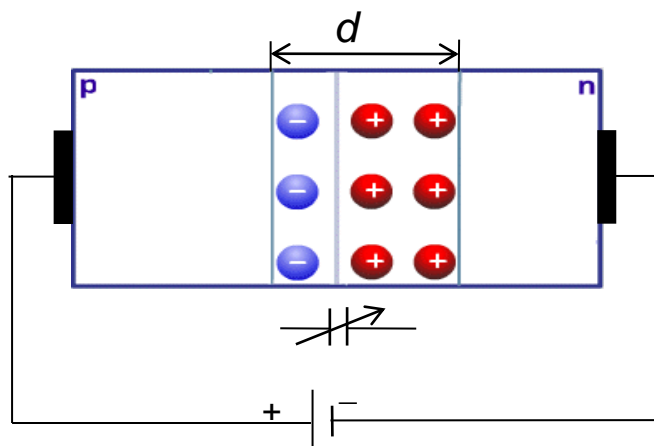


# Варикап (варактор)

**Варикапът** е диод, който се използва като нелинеен, управляван от напрежението кондензатор. Действието му е основано на зависимостта на бариерния капацитет на прехода от обратното напрежение.



Символ и  
еквивалентна схема



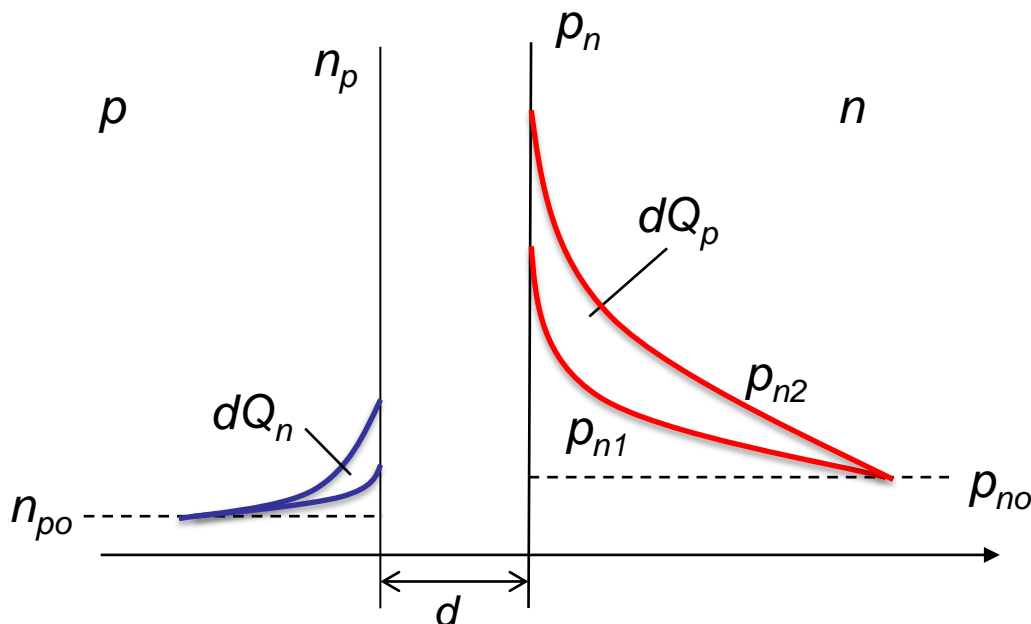
Волт-фарадна характеристика

Варикапите се използват като умножители на честота и в схеми за електронна настройка в телевизионните, радио и други приемници.

# Дифузен капацитет

**Дифузият капацитет**  $C_D$  отразява преразпределението на зарядите в неутралните области на диода извън обемния заряд при промяна на напрежението.

Тъй като тези заряди се образуват при инжекция на токоносители през прехода,  $C_D$  се отчита **само при право включване на диода**.



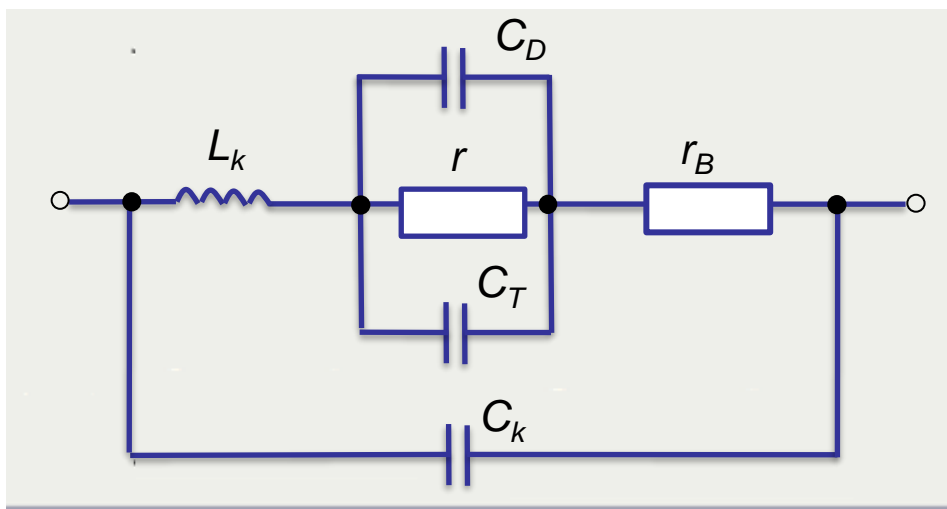
$$C_D = \frac{dQ_p}{dU} + \frac{dQ_n}{dU}$$

$$C_D = \frac{\tau I}{\varphi_T}$$

$$C_D \gg C_T$$

# Еквивалентна схема по ~ ток

Еквивалентната схема на диода за малък променлив сигнал позволява да се анализира работата на диода при промяна на честотата.



$r_B$  - обемно съпротивление на базата на диода

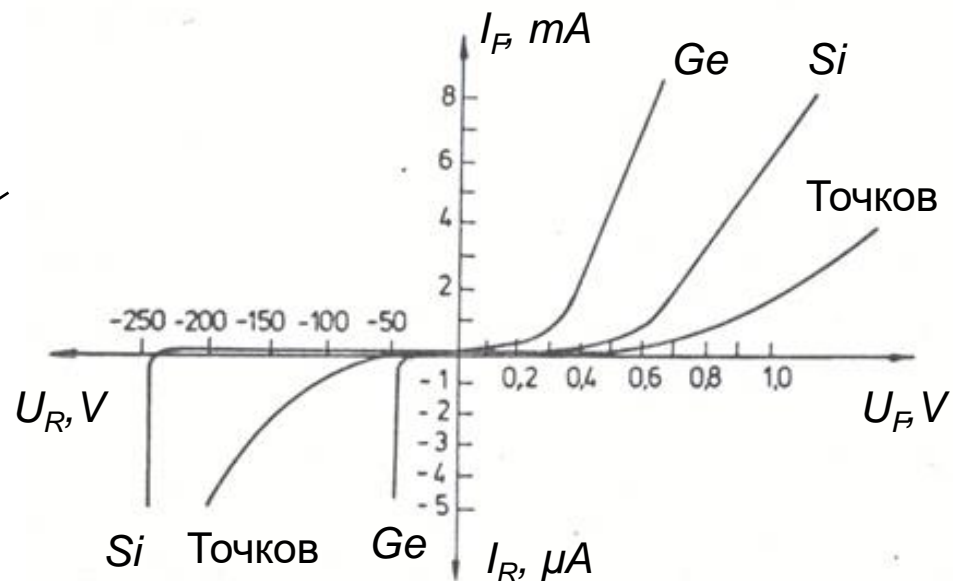
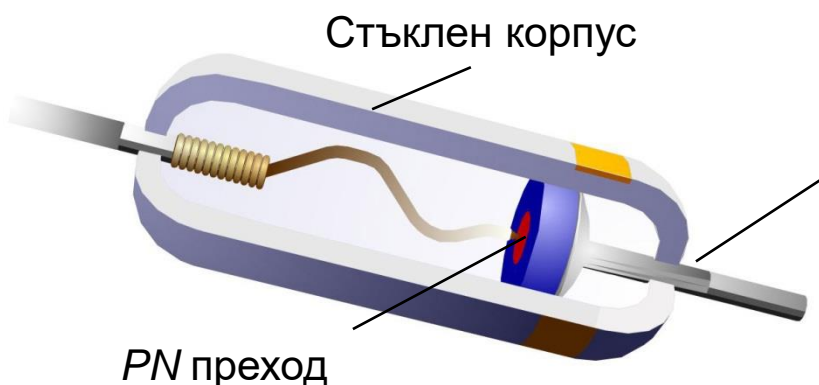
$L_k$  – индуктивност на изводите

$C_k$  – капацитет на корпуса

При работа при ниски честоти реактивните компоненти не оказват влияние и диодът се заменя с диференциалното си съпротивление  $r$  (за нормалния случай, когато  $r < r_B$ ). С повишаване на честотата при право включване оказват влияние малкото  $r$  и  $C_D$ , а при обратно – голямото и  $C_T$ .  $L_k$  и  $C_k$  влияят при свръх високи честоти.

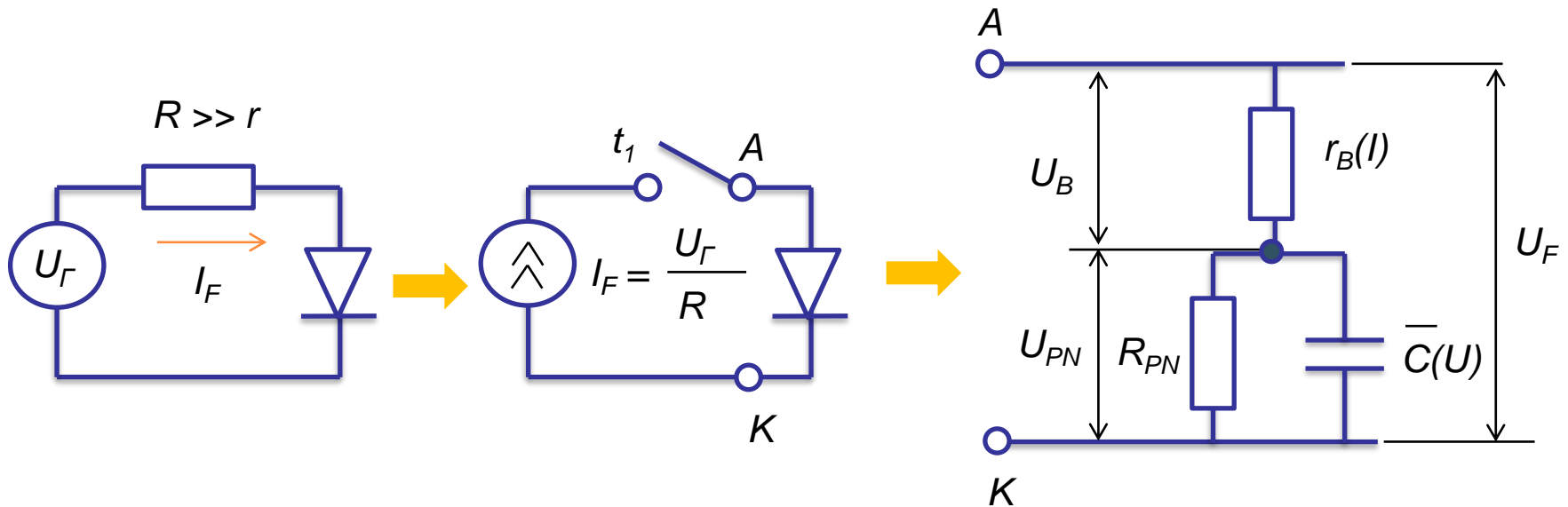
# Високочестотни диоди

За работа при високи честоти се използват диоди с малки площи на преходите, за да се намалят техните капацитети. **Високочестотните диоди** са предназначени за изправяне на токове и напрежения с честота до 150 MHz.



За увеличаване на граничната работна честота на диодите капацитетите и времето на живот на неосновните токоносители трябва да са малки.

# Работа в импулсен режим



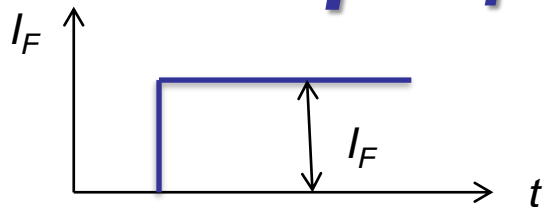
Режим на генератор на ток

Еквивалентна схема за голям сигнал

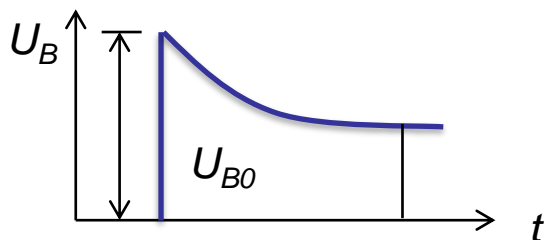
При работа на диода като ключ бързодействието при превключване се определя от продължителността на преходните процеси. Инертността на диода се дължи на необходимостта от:

- ⊕ време за натрупване и разнасяне на неосновните токоносители;
- ⊕ време за презареждане на бариерния капацитет.

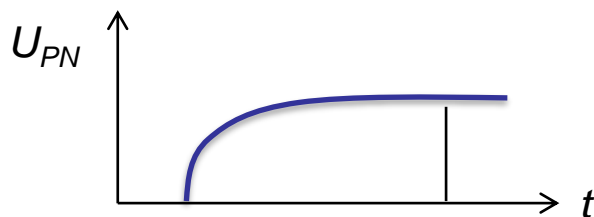
# Процеси при включване



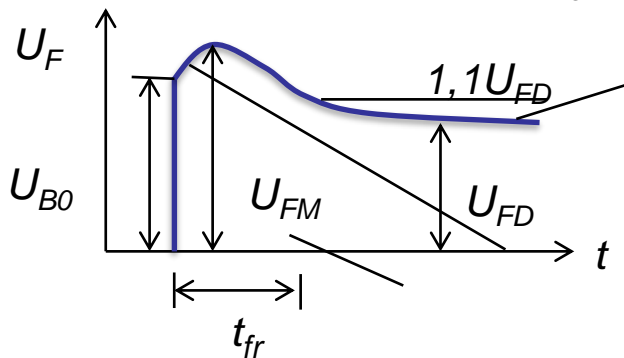
Отпушващ токов импулс



Напрежение върху базата на диода



Напрежение върху  $PN$  прехода



Напрежение върху диода

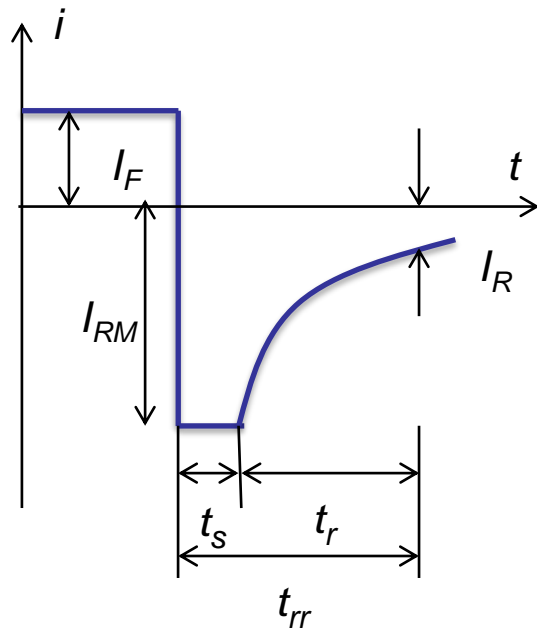
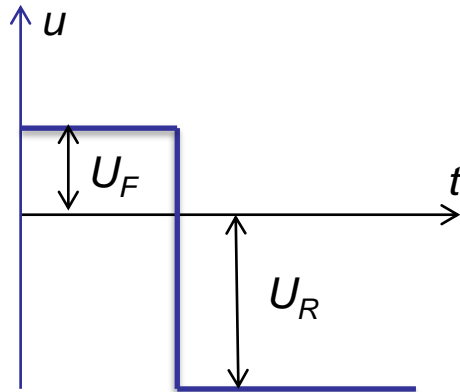
$U_{FD}$  - Установена стойност на напрежението

## Импулсни параметри

$U_{FM}$  - Импулсно напрежение в права посока

$t_{fr}$  - време за установяване на напрежението

# Процеси при изключване



## Импульсни параметри

- ✚  $I_{RM}$  – импулсна стойност на тока при обратно включване
- ✚  $t_{rr}$  – време за възстановяване на обратното съпротивление на диода
- ✚  $t_s$  – време на разнасяне на неосновните токоносители
- ✚  $t_r$  – време за нарастване на обратното съпротивление

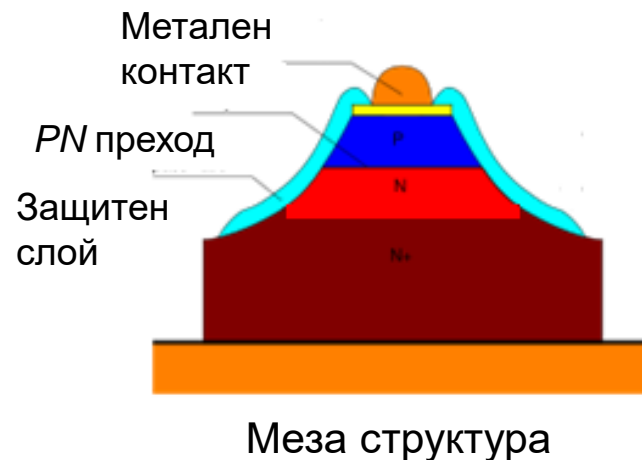
$$t_{rr} \gg t_{fr}$$

# Импулсни диоди

**Импулсните диоди** работят в режим на бързи изменения на сигналите и се характеризират с малка продължителност на преходните процеси –  $t_{rr}$  по-малко от 1  $\mu$ s. Различават се:

- ✱ свръхбързи диоди с  $t_{rr} = 0,1 - 1$  ns.
- ✱ импулсни диоди с голямо бързодействие  $t_{rr} < 10$  ns,
- ✱ средно бързодействие  $10$  ns  $< t_{rr} < 100$  ns,
- ✱ ниско бързодействие  $t_{rr} > 100$  ns.

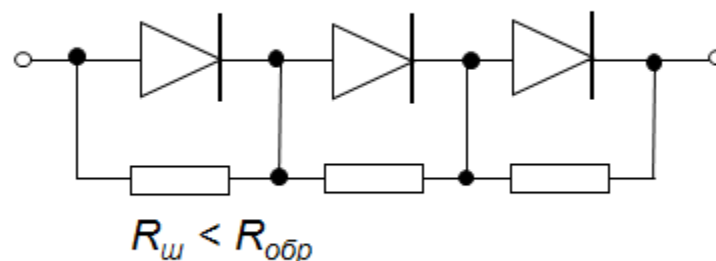
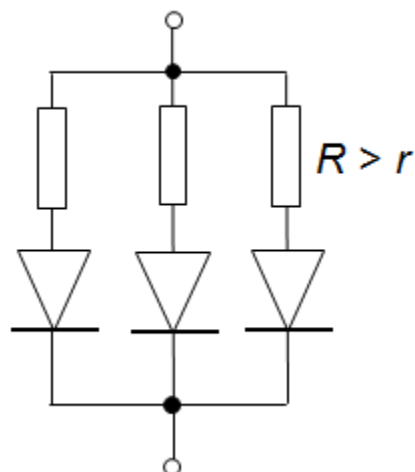
Импулсните диоди трябва да имат малки капацитети и малки стойности на времето на живот. За намаляване площта на *PN* прехода се използват меза структури със специфично скосяване, получено чрез ецване.





# Исправителни диоди

**Исправителните диоди** са полупроводникови диоди, предназначени за преобразуване на променливи токове и напрежения с *ниска честота* в постоянни. За осигуряване протичането на голям ток е необходима голяма площ, което ограничава честотния диапазон на работа.

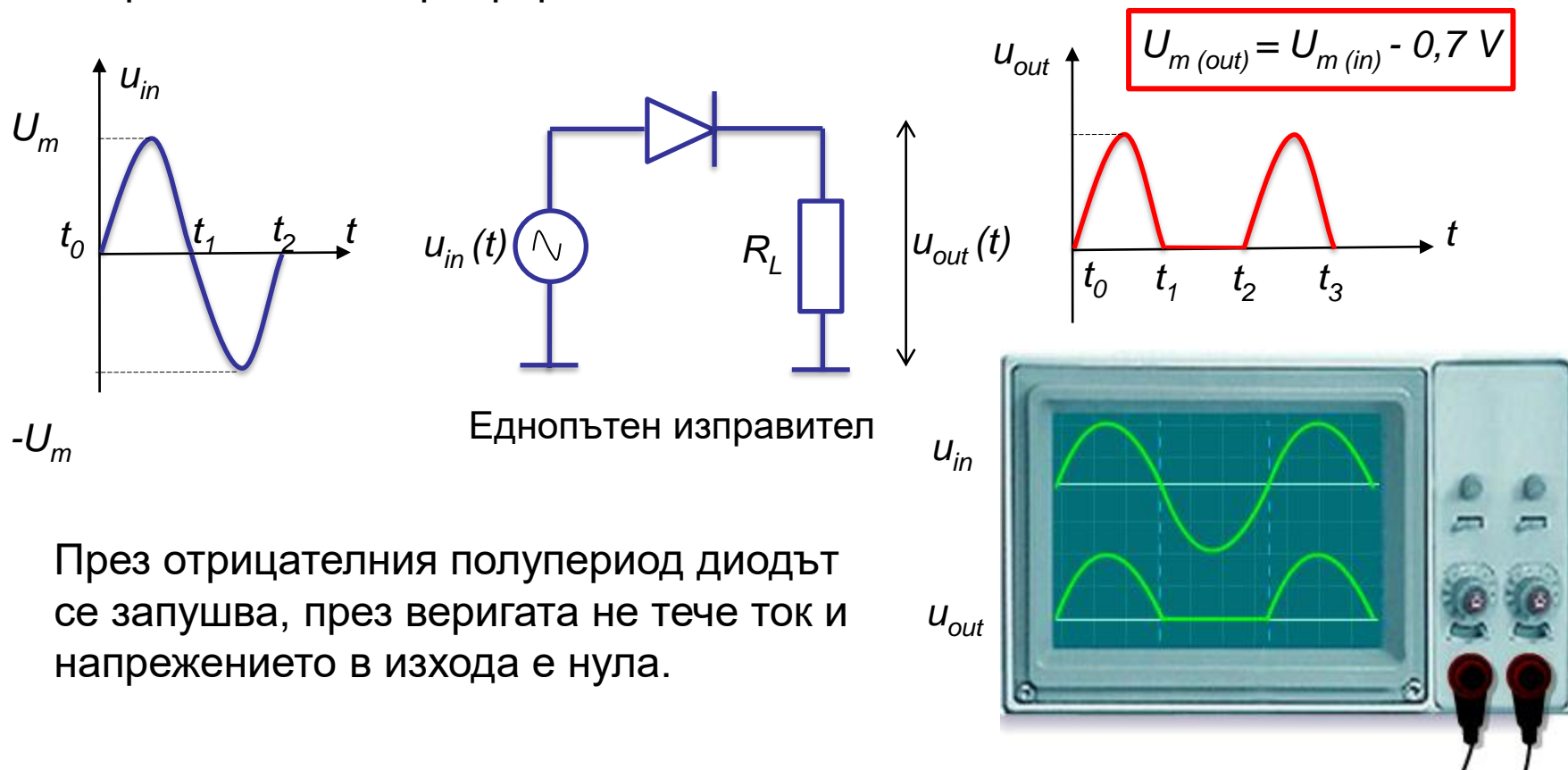


При необходимост от изправяне на ток, надвишаващ номиналния среден изправен ток, се използва **паралелно свързване** на няколко диода.

**Последователно свързване** на диодите се използва за увеличаване на сумарното обратно напрежение.

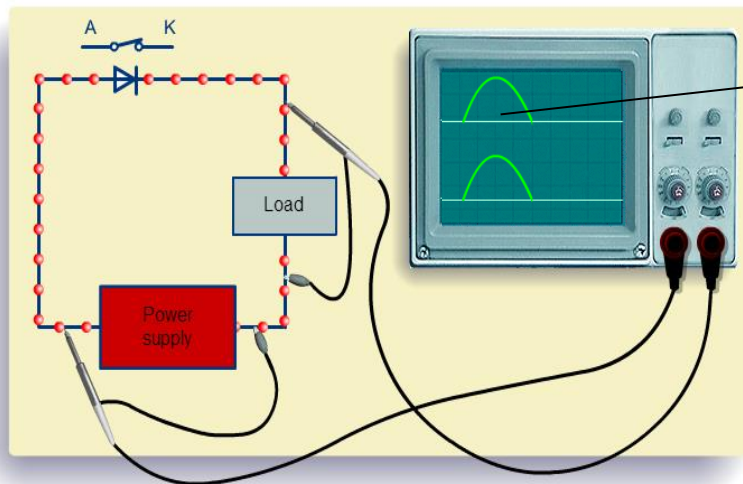
# Приложения – изправител

През положителния полупериод диодът е отпушен. Протичащият през него ток създава пад върху товарното съпротивление  $R_L$ . Полученото в изхода напрежение повтаря формата на входния сигнал.



През отрицателния полупериод диодът се запушва, през веригата не тече ток и напрежението в изхода е нула.

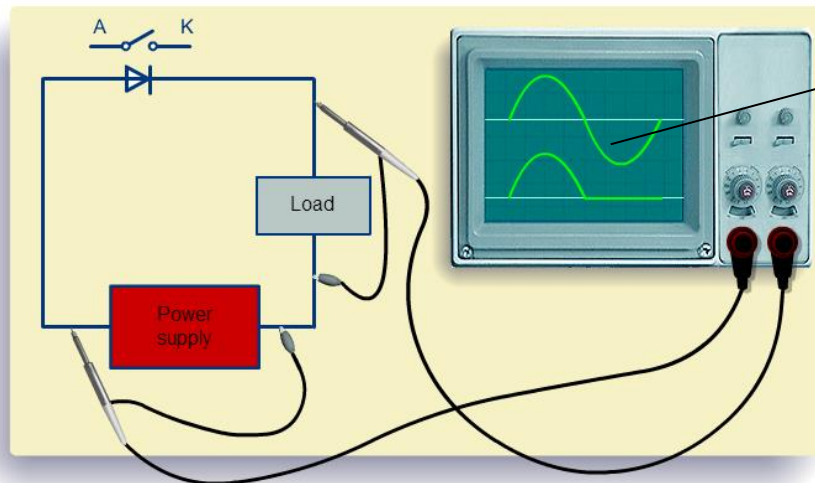
# Принцип на работа – илюстрация



Входно напрежение

Изходно напрежение

Положителен полупериод на  
входното напрежение



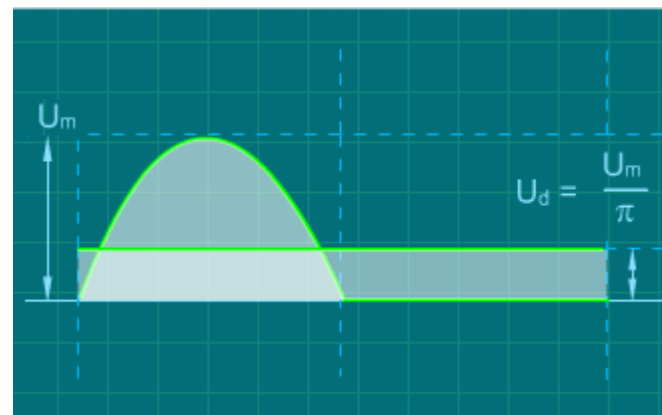
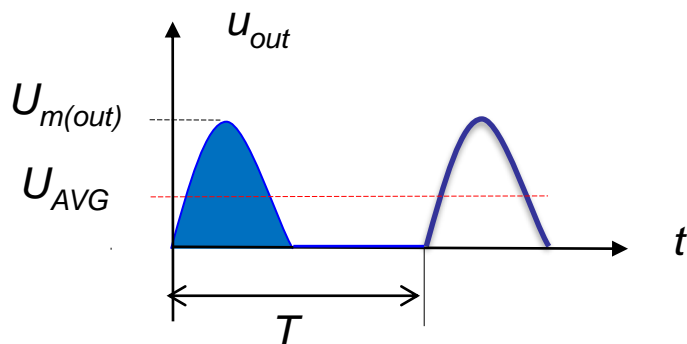
Входно напрежение

Изходно напрежение

Отрицателен полупериод  
на входното напрежение

# Средна стойност на $U_{изх}$

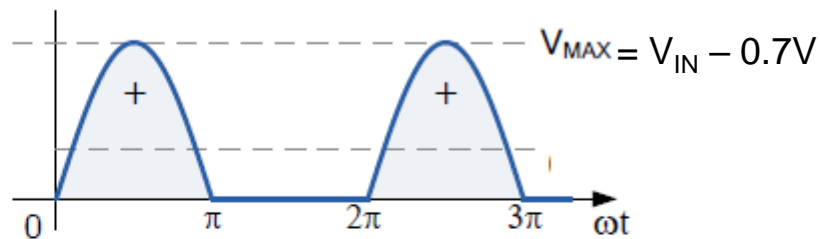
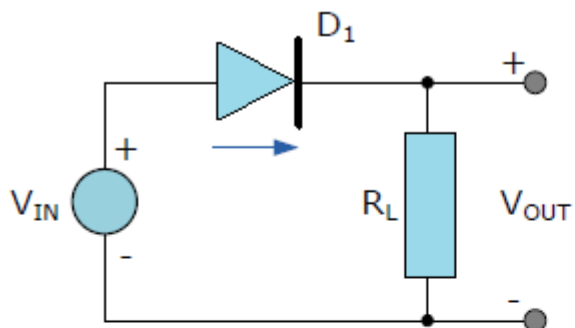
Диодът пропуска само положителната полувървна на променливото напрежение и в изхода се получава пулсиращо постоянно напрежение.



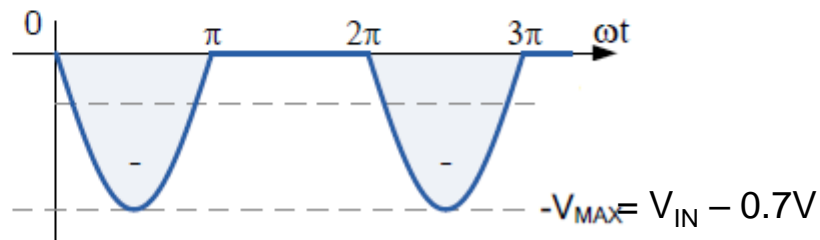
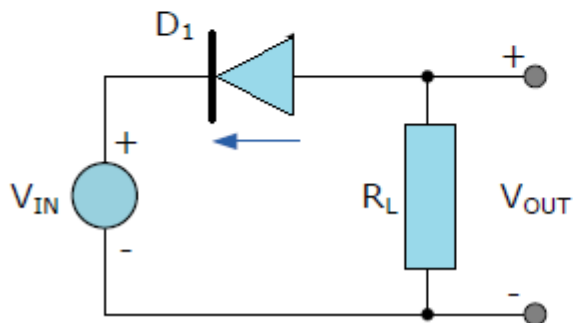
**Средната стойност** на напрежението на изходната полувървна  $U_{AVR}$  може да се измери с мултиметър.

# Примери

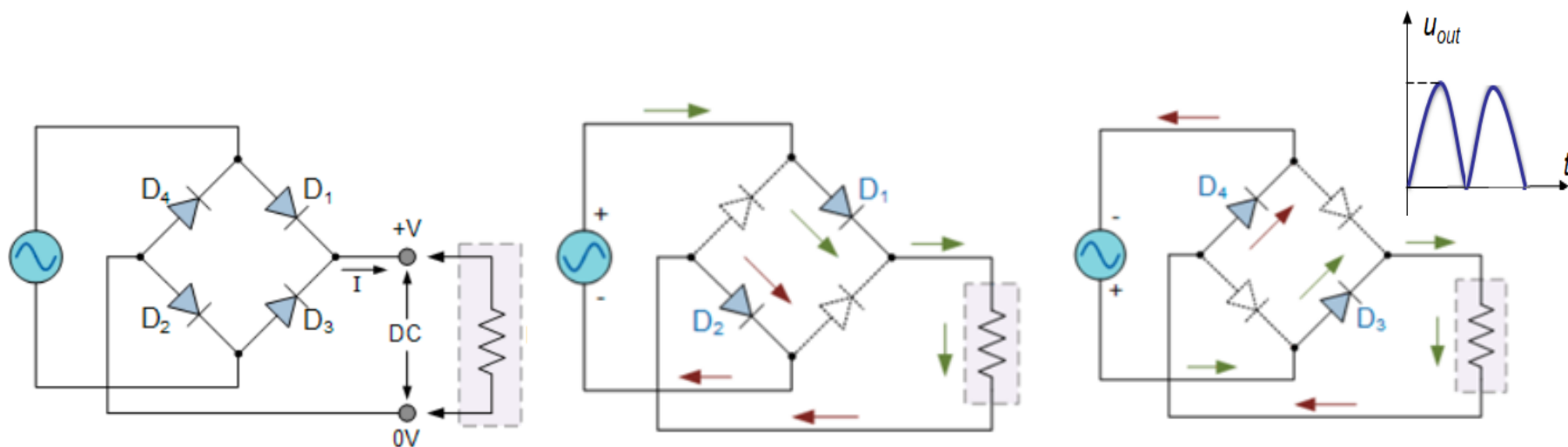
Изправител – положителна полувървна



Изправител – отрицателна полувървна



# Примери – мостов изправител

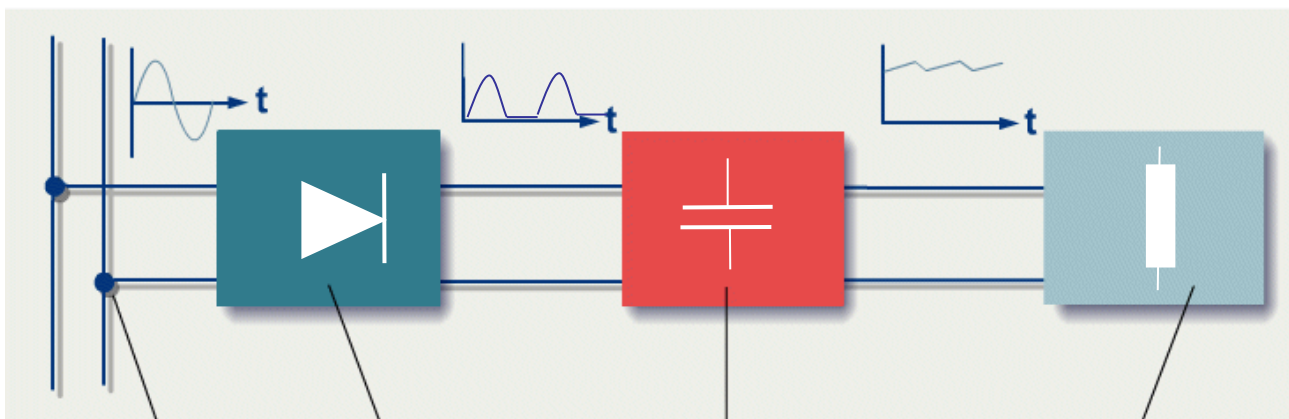


Четирите диода,  $D_1 - D_4$ , са свързани последователно по двойки като само два диода провеждат ток за всеки полупериод.

По време на положителния полупериод на входното напрежение,  $D_1$  и  $D_2$  са в право включване и токът протича през товара, докато  $D_3$  и  $D_4$  са свързани обратно.

По време на отрицателния полупериод, диодите  $D_3$  и  $D_4$  са в право включване, а  $D_1$  и  $D_2$  – в обратно. Токът, протича през товара в същата посока.

# Капацитивен филтър



Ел. мрежа

Изправител

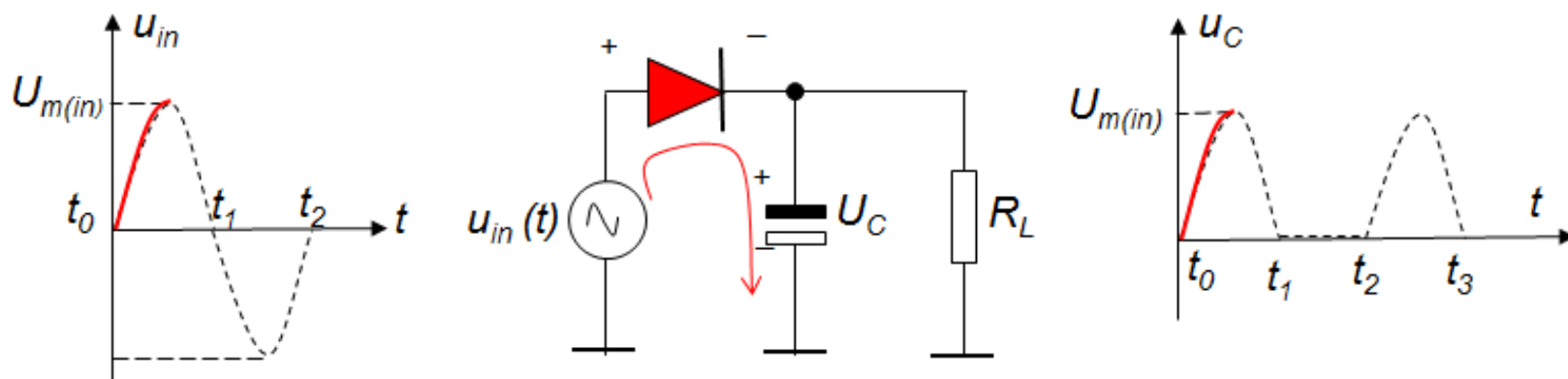
Филтър

Товар

За правилното функциониране на електронните схеми се изисква захранващ източник на постоянно напрежение и ток. За да се намалят пулсациите в изходното напрежение на изправителя се използва капацитивен филтър.

# Принцип на филтриране

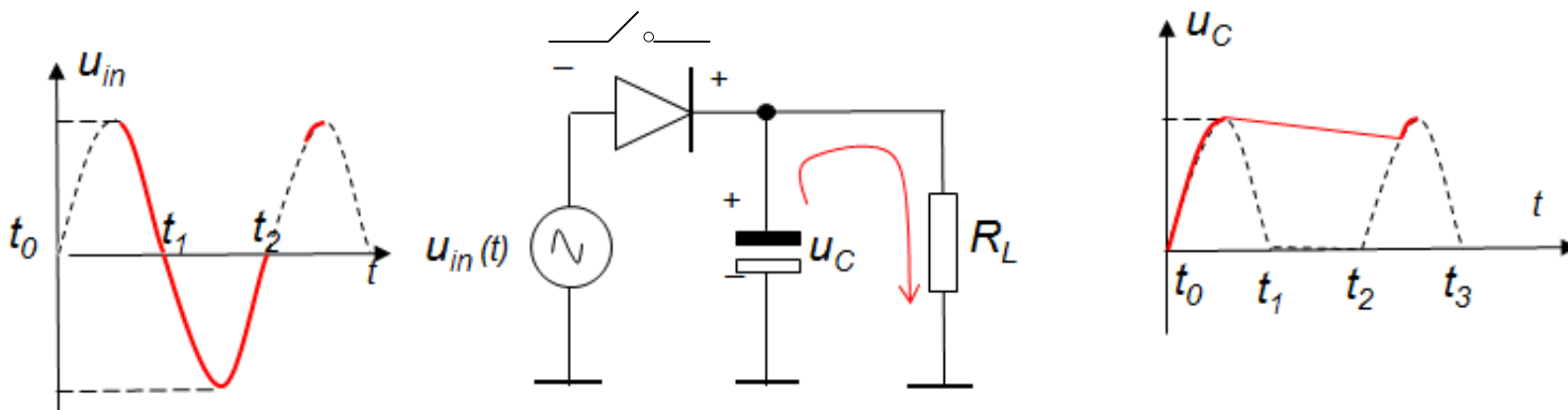
През положителният полупериод диодът се отпушва и протичащият през него ток зарежда кондензатора приблизително до върховата стойност на входното напрежение (ако се пренебрегне падът върху диода).





# Принцип на филтриране

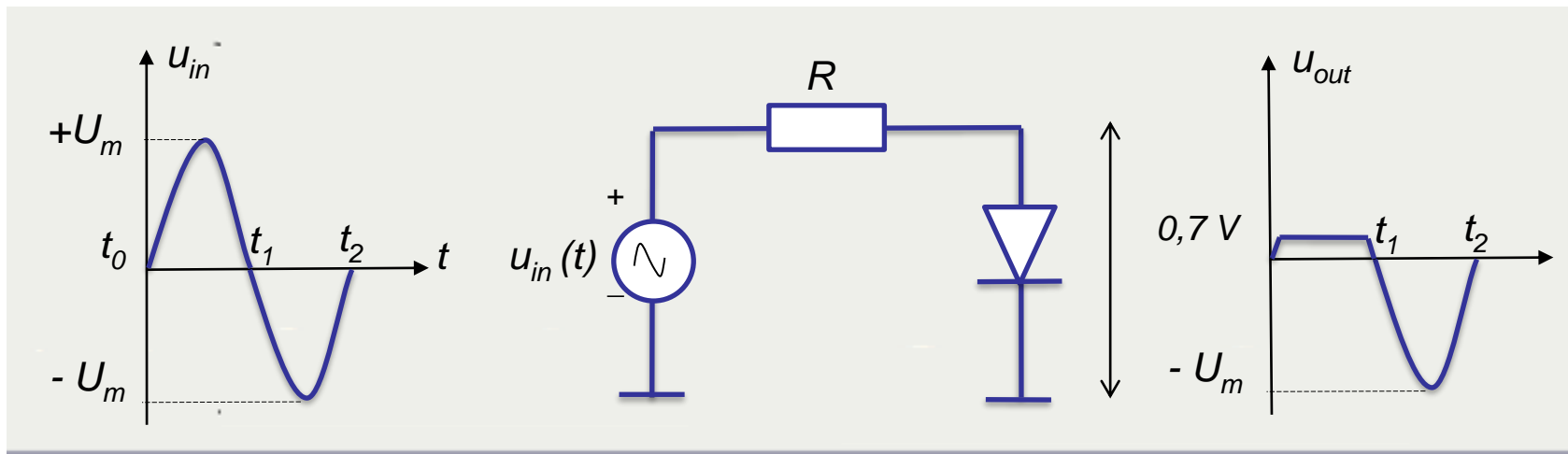
Когато входното напрежение започне да спада под върховата си стойност, кондензаторът запазва заряда си и диодът се включва в обратна посока като прекъсва веригата към входния източник.



През останалата част от цикъла кондензаторът може да се разрежда само през товарното съпротивление със скорост, определена от времеконстантата  $R_L C$ .

Колкото по-голяма е времеконстантата, толкова по-бавно ще се разрежи кондензаторът. В резултат се осигурява относително постоянно напрежение със слаби флуктуации.

# Амплитудни ограничители

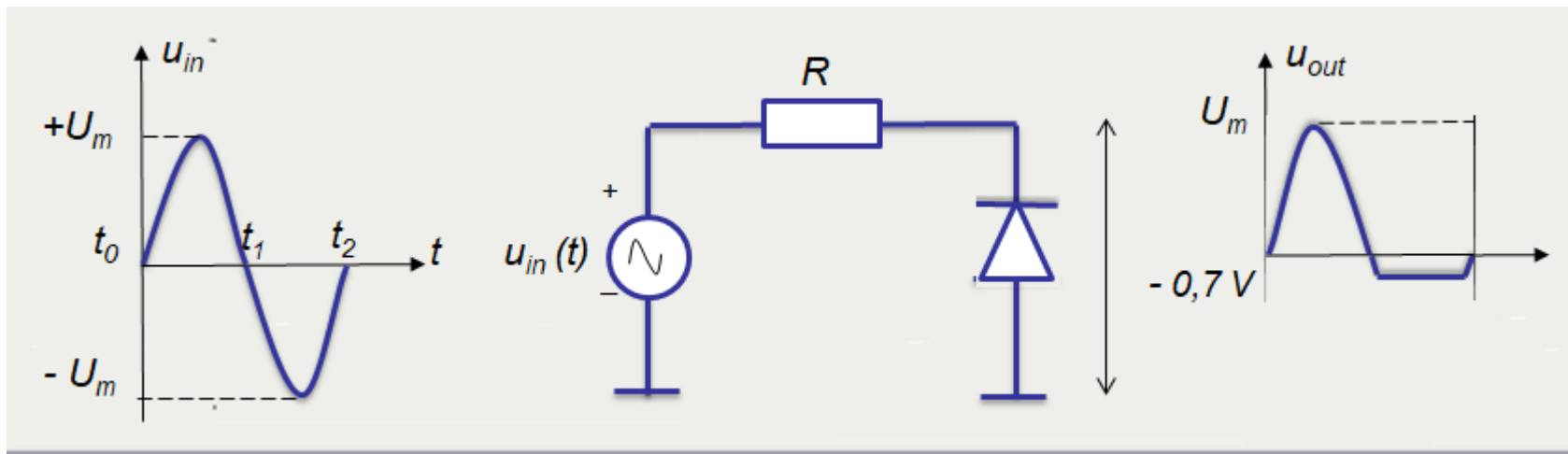


Диодите често се използват да отрежат части от даден сигнал над или под определено ниво.

През положителния полупериод диодът е отпушен, напрежението върху него е  $0,7\text{ V}$ . Тогава изходното напрежение се ограничава на ниво  $+0,7\text{ V}$  за случаите, когато входното напрежение превиши тази стойност.

През отрицателния полупериод диодът е запушен – действа като отворен ключ и напрежението в изхода повтаря формата на входното напрежение.

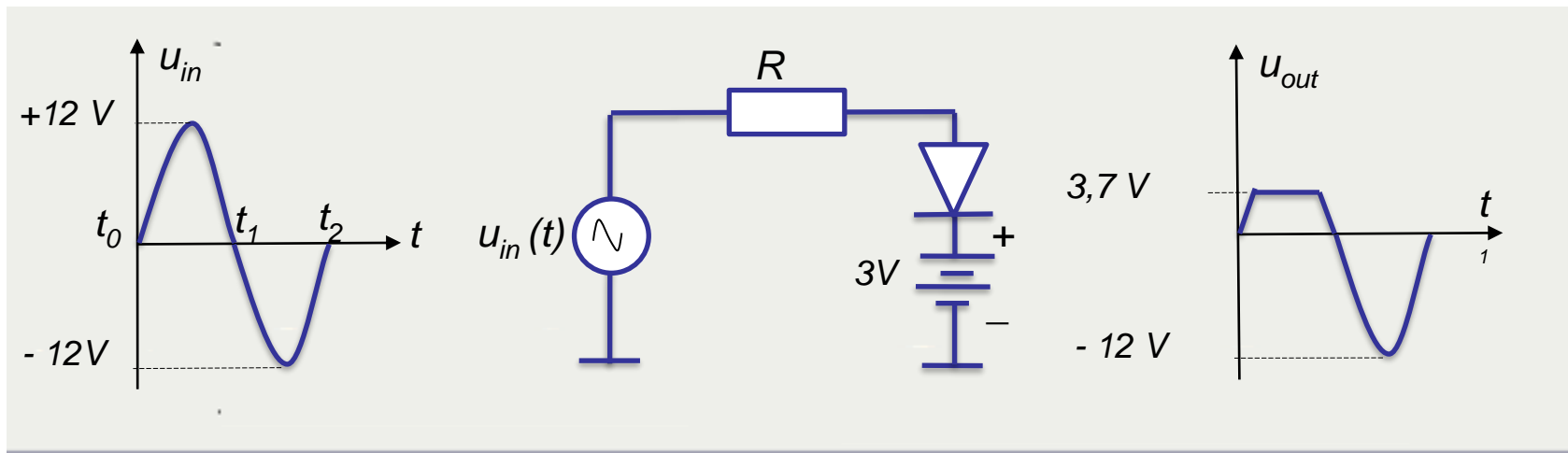
# Примери на ограничители



Диодът в право включване през отрицателния полупериод и ограничава изходния сигнал на ниво  $-0.7$  волта.

През положителния полупериод диодът е запушен – действа като отворен ключ и напрежението в изхода повтаря формата на входното.

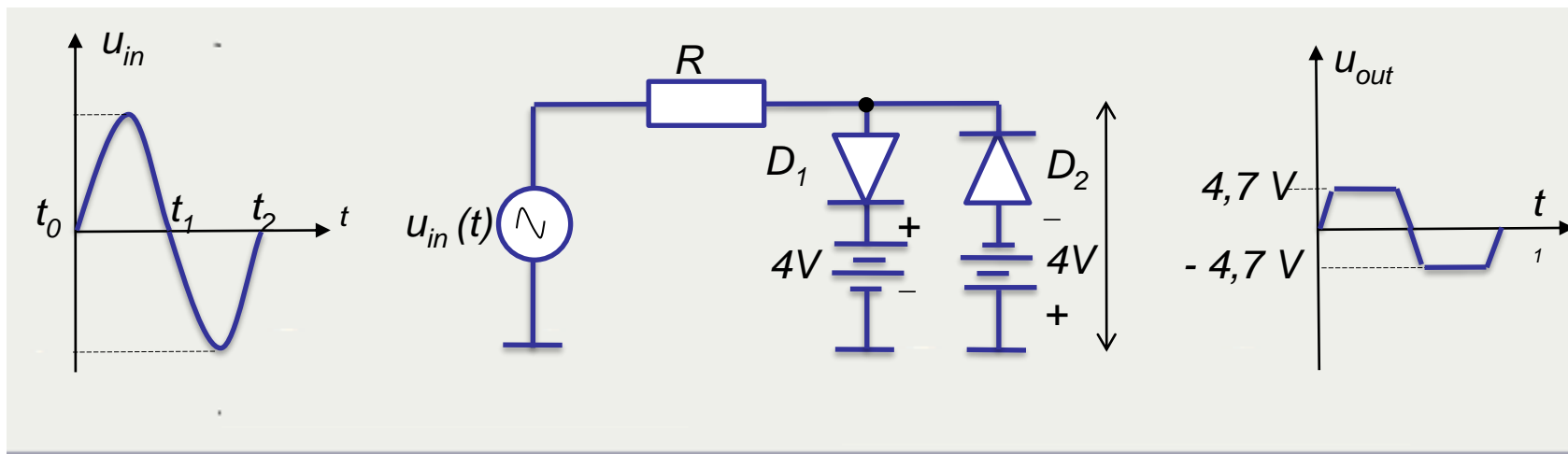
# Примери на ограничители



Диодът ще се отпуши, когато напрежението върху анода му надвиши сумата от стойността на напрежението на батериата и пада  $0,7\text{ V}$  върху диода. Тогава изходното напрежение се ограничава до тази стойност ( $3,7\text{ V}$  в случая) и всички по-високи входни напрежения се отрязват.

През отрицателния полупериод диодът е запушен – действа като отворен ключ и напрежението в изхода повтаря формата на входното.

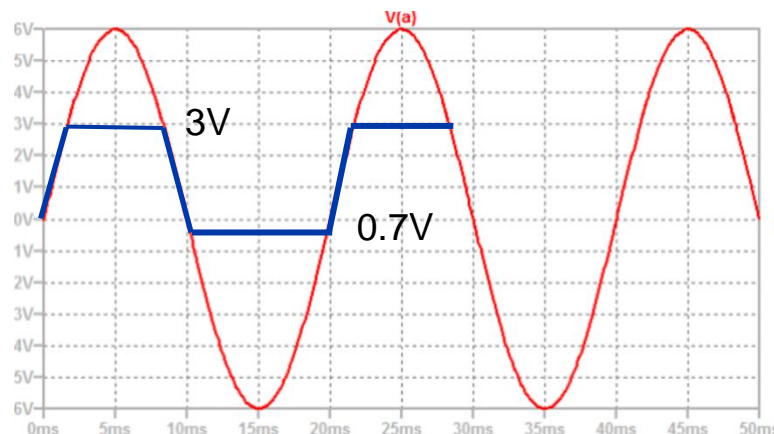
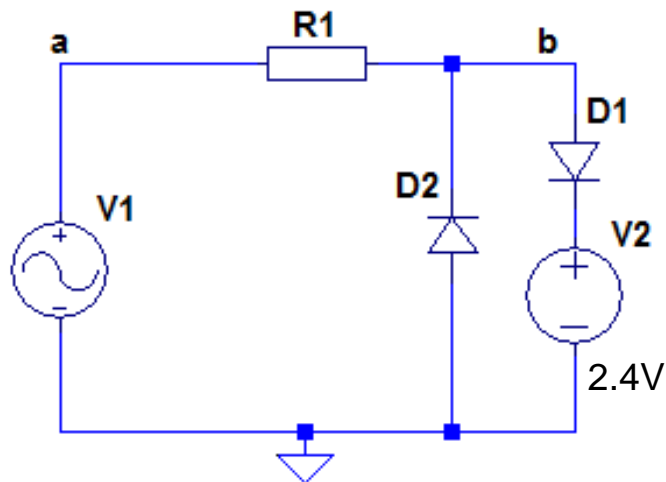
# Примери на ограничители



Когато входното напрежение надвиши +4,7 V диодът  $D_1$  се отпушва и ограничава входното напрежение до + 4,7 V.

Диодът  $D_2$  се отпушва когато напрежението достигне – 4,7 V. Следователно положителни напрежения над 4,7 V и отрицателни под – 4,7 V се отрязват.

# Примери на ограничители



Входен сигнал

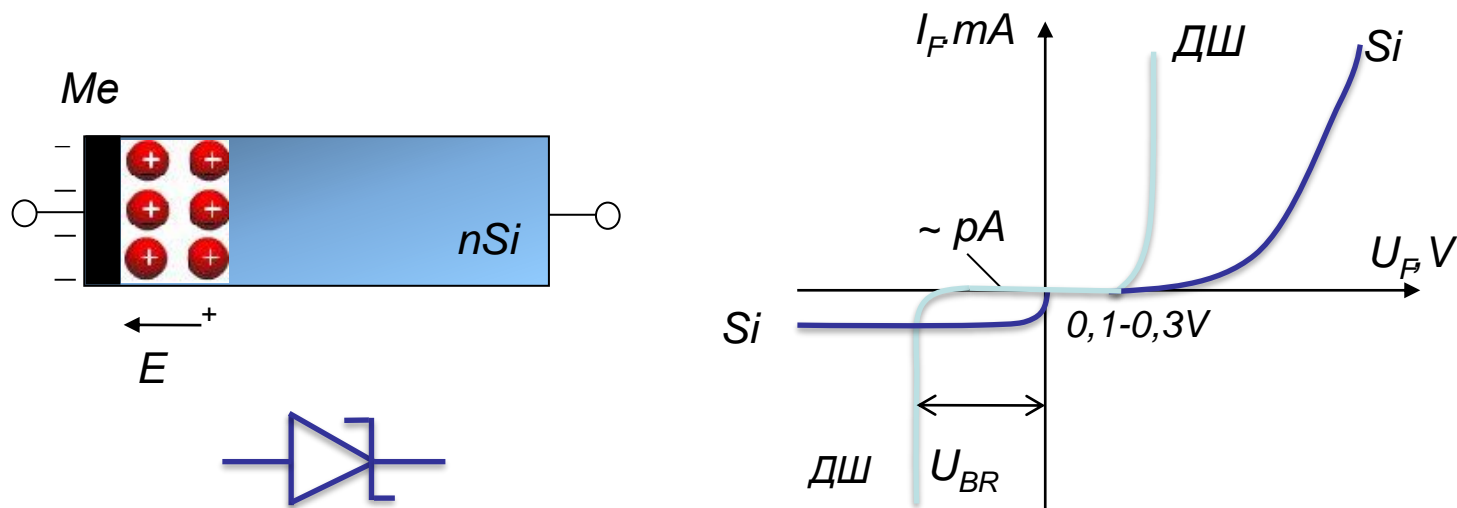
Изходен сигнал

$D1$  има  $U_0=0.6$  V.  $V2$  е батерия с напрежение 2.4 V. Входният сигнал  $V1$  е синусоидален с амплитуда 6V.

През положителния полупериод  $D1$  е в право свързване и изходният сигнал се ограничава на ниво  $2.4+0.6 = 3$  V. През отрицателния полупериод  $D2$  е в право включване и изходният сигнал се ограничава на ниво -0.6 V.

За напрежения, по-малки от 3V,  $D1$  е обратно свързан, действа като отворен ключ и изходният сигнал следва входния.

# Контакт метал – полупроводник

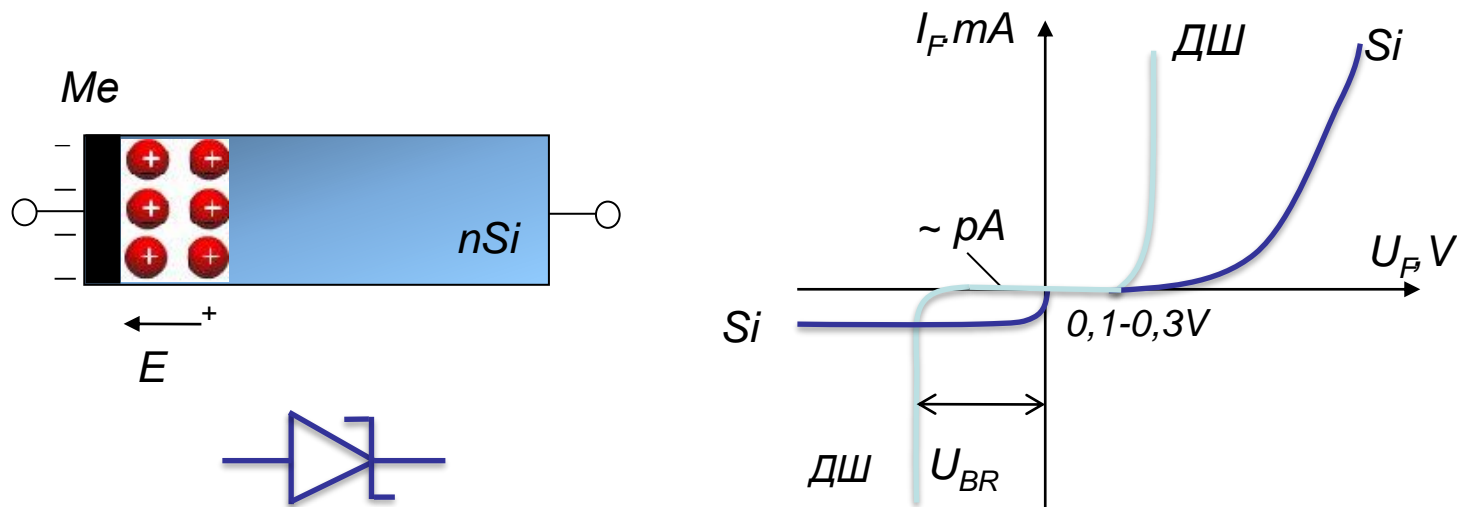


При преход **метал-полупроводник** в зависимост от типа на контакта са възможни **изправлящи преходи на Шотки** и неизправлящи (омични) преходи.

При изправлящия преход метал -  $N$  полупроводник се създава **обеднен слой** в полупроводника с потенциална разлика, известна като **бариера на Шотки**.

Обедненият слой има високо специфично съпротивление и при прилагане на напрежение се изменят условията на контакта в зависимост от поляритета му.

# Диод на Шотки

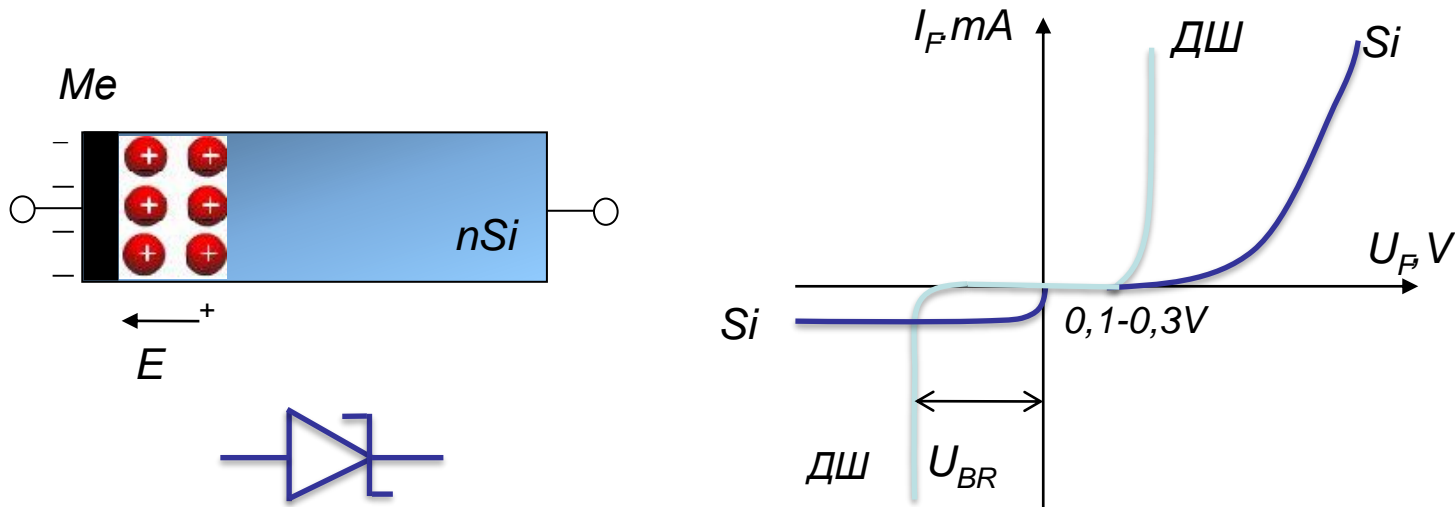


При **право свързване** (отрицателният полюс на токоизточника към n Si) се намалява височината на потенциалната бариера и токът нараства.

При **обратно свързване** (към n силиция се подаде положително напрежение спрямо метала) се повишава височината на потенциалната бариера и през прехода протича нищожен обратен ток ( $\sim pA$ ).



# Шотки диоди – свойства



- ❖ При Шотки диодите **липсват** явленията **инжекция** ( $C_D = 0$ ), **натрупване** и **разнасяне** на неосновни токоносители – имат голямо бързодействие.
- ❖ Те имат **малък пад** в права посока (**0,1- 0,3 V**). Това позволява токове в права посока до няколкостотин ампера при честоти до 200 kHz (мощните диоди с PN преход могат да изправят до честота няколко kHz).
- ❖ Имат малко **пробивно напрежение** ( $U_{BR} < 50V$ ) спрямо това на Si изправителни диоди.

# Процеси при производството

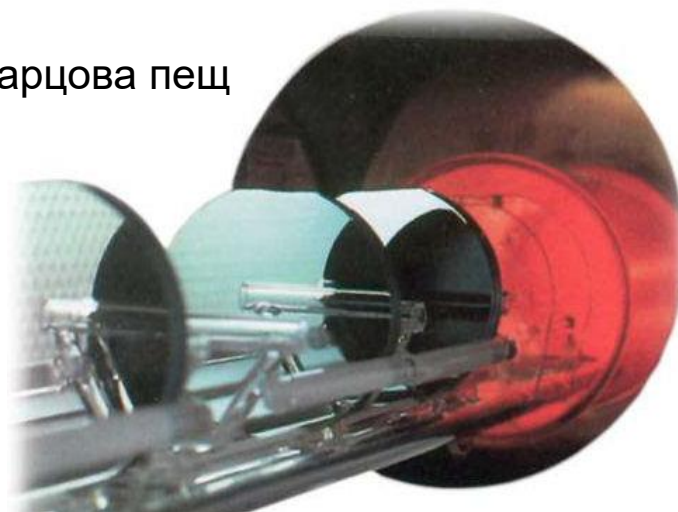
Полупроводниковите елементи се изготвят в единен технологичен цикъл, като едновременно се осъществяват различни операции над множество структури, разположени върху изходната монокристална пластина (подложка).

Силициев кристали и пластини



Едновременно обработване

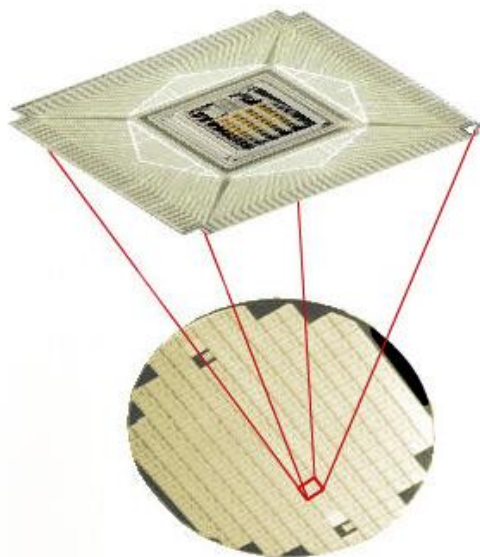
Кварцова пещ



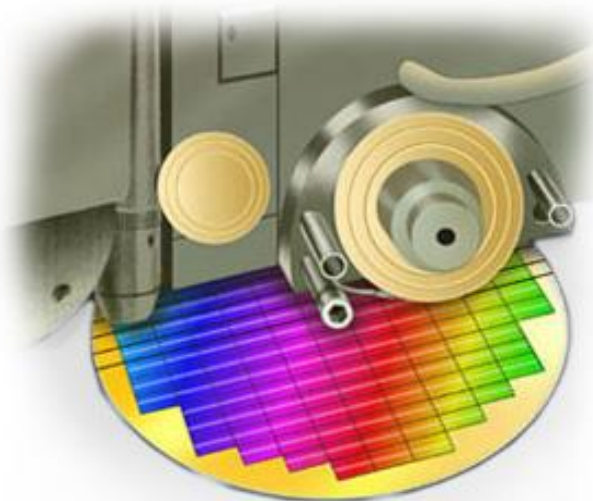
# Процеси при производството

Върху пластината посредством различни технологични операции се изготвят едновременно множество еднакви полупроводникови елементи и интегрални схеми. След това се осъществява нарязване (отделяне) на отделните елементи и всеки от тях се монтира в отделен корпус.

Пластина с много чипове



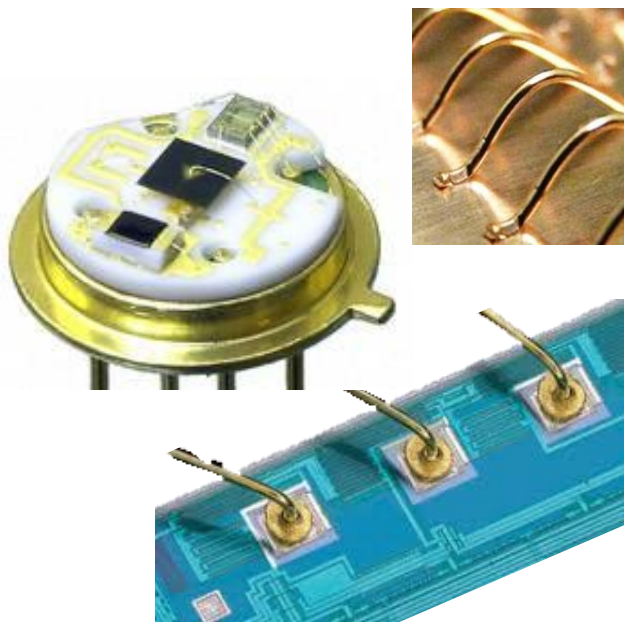
Нарязване с диамант



# Процеси при производството

Вътрешните изводи на чипа (метализирани контактни площадки) се свързват електрически с външните изводи на корпуса чрез операцията бондиране (термокомпресия). След монтиране на изводите елементър се затваря в херметичен метален или пластмасов корпус.

Бондиране на изводите



Затваряне в корпус

