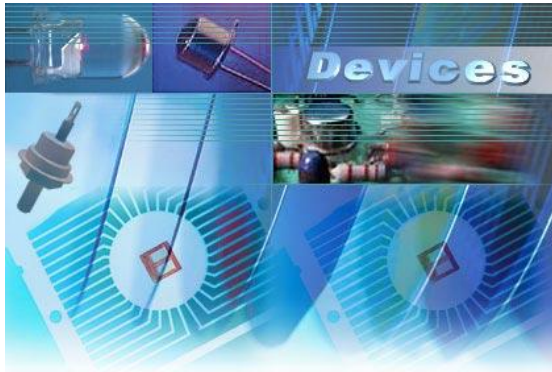




Полупроводников диод

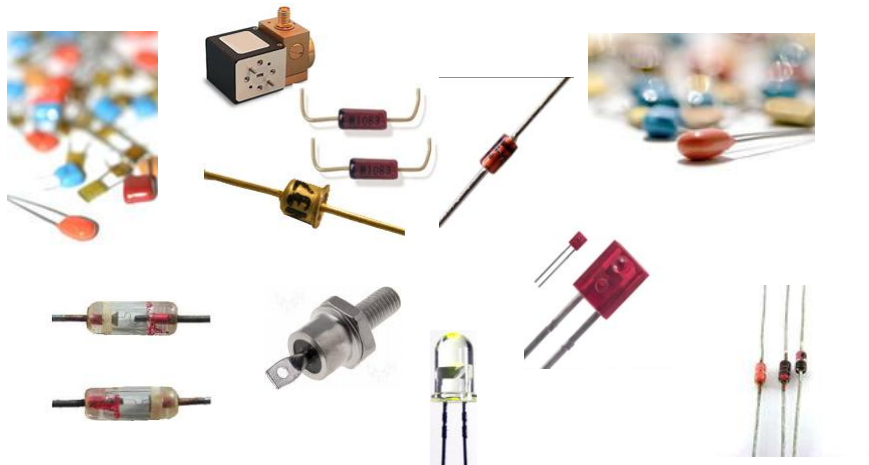


Полупроводникови
елементи

© 2010 доц. д-р. Т.Василева

1

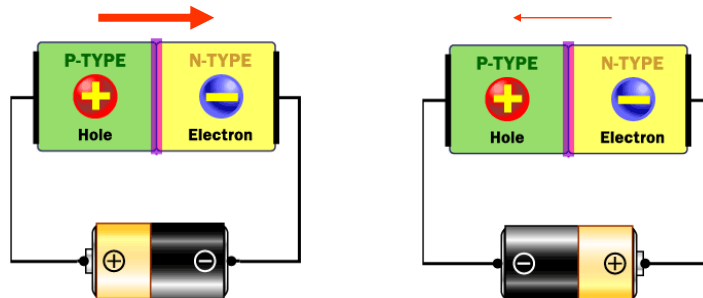
Корпуси на диода



© 2010 доц. д-р. Т.Василева

2

Осовни свойства на диода



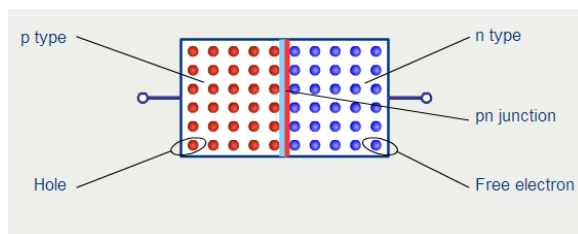
Съществено свойство на диода е, че големината на тока през него съществено зависи от **поляритета на приложеното напрежение**.

Диодът има **едностранна** проводимост на тока. Това негово свойство се използва в изправителите за преобразуване на променливия в постоянен ток.

© 2010 доц. д-р. Т.Василева

3

Структура на диода



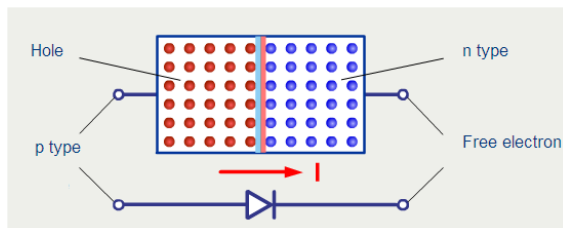
Идеализираният диод провежда ток само в една посока.

Специфичните свойства на диода се определят от неговата структура.

© 2010 доц. д-р. Т.Василева

4

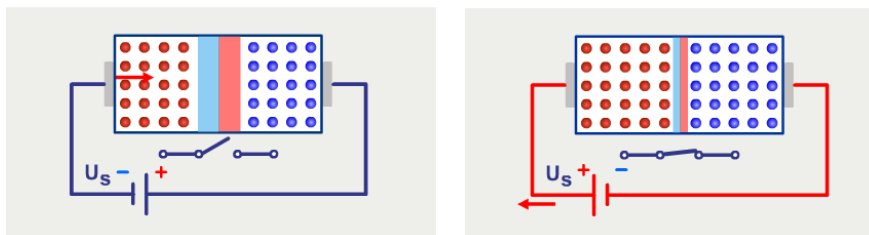
Схемно означение на диода



Диодът е нелинеен полупроводников елемент с два електрода – анод и катод.

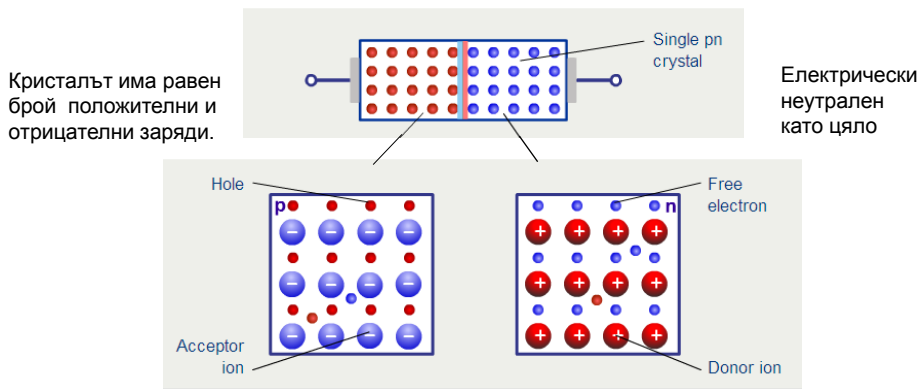
“Стрелката” в символното му означение, сочеца от анода към катода, показва че ток през диода тече лесно именно в тази посока. В обратната посока има бариера, която възпрепятства преминаването на ток.

Принцип на работа на диода



Принципът на действие на диода се дължи на промяна в условията на границата между две области в полупроводника с различен тип проводимост (т.н. PN преход) при промяна на поляритета на приложеното напрежение.

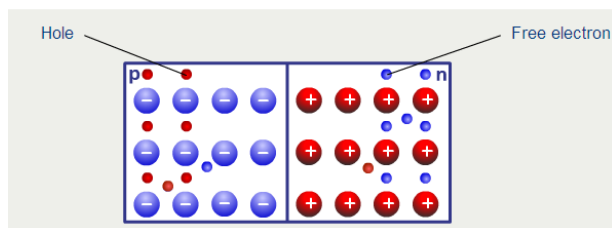
Диод без приложено напрежение



© 2010 доц. д-р. Т.Василева

7

Формиране на PN прехода



Основни токоносители – свободни електрони и дупки, дифундират през прехода поради разликата в концентрациите им от двете страни на прехода.

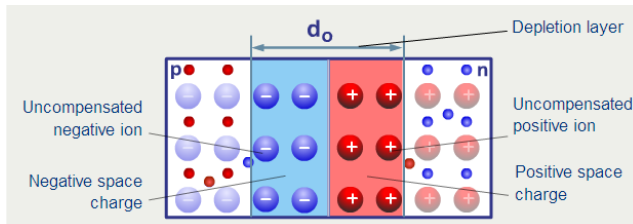
Обратно на свободните токоносители, **йоните никога не се движат**. Те остават фиксирани във възлите на кристалната решетка поради ковалентни връзки в полупроводниковата структура.

© 2010 доц. д-р. Т.Василева

8

Обеднен слой

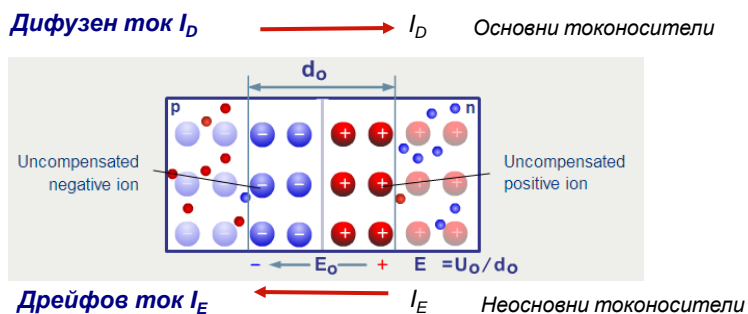
Почти напълно обеднен от подвижни токоносители



Когато електрон напусне n областта, той оставя след себе си некомпенсиран положителен йон. При това се създава **положителен обменен заряд** от дясно на прехода в n -областта.

Аналогично, при напускане на дупки, от лявата страна на прехода в p -областта ще се създаде **отрицателен обменен заряд**.

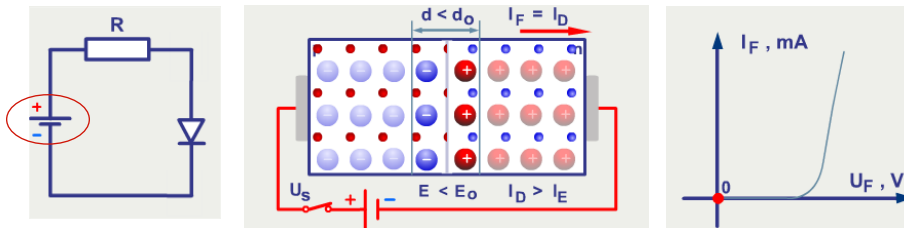
Бариерен потенциал & Ел. поле



Некомпенсираните положително- и отрицателно-заредени йони в обеднения слой формират **електрическо поле E_0** и **бариерен потенциал U_0** .

При стайна температура (25 °C) бариерният потенциал за Si диоди е приблизително 0.7V, а за Ge диоди е около 0.3V.

Право включване

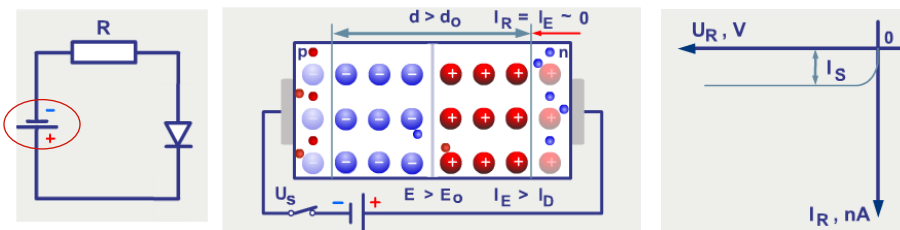


Барьерният потенциал ще се намали до $U_0 - U_s$ и електрическото поле $E < E_0$.

Токът при право включване се формира от **основните токоносители**, които имат достатъчна енергия, за да преодолеят потенциалната бариера.

При право включване токът винаги ще протича лесно.

Обратно включване

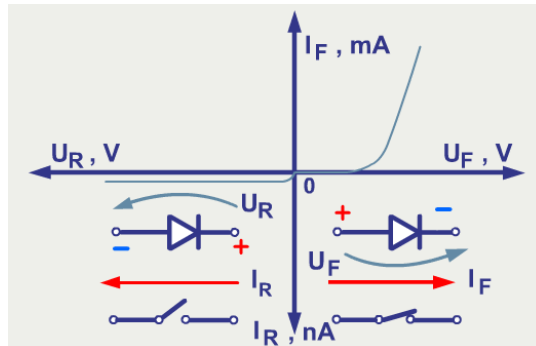


Потенциалната бариера се повишава до $U_0 + U_s$ и електрическото поле $E > E_0$.

Дифузията на основни токоносители през прехода сериозно се затруднява.

Много малък обратен ток I_R , съставен от топлинно генерирани **неосновни токоносители** ще преминава през прехода, тъй като за тях полето на прехода е ускоряващо. Това прави обратният ток I_R независим от поляритета на напрежението и от височината на потенциалната бариера.

VA характеристика на диода



Диодът е **нелинеен** елемент с **едностранна** проводимост на тока.

Идеалният диод действа като **ключ – отворен и затворен**.

При право включване токът рязко нараства с увеличаване на напрежението. Обратният ток е много малък.

Уравнение на идеализиран диод

$$I = I_s \left(e^{\frac{U}{\varphi_T}} - 1 \right)$$

$$I_s = S J_s$$

I_s – Ток на насищане

J_s – Плътност на тока

S - Площ на прехода

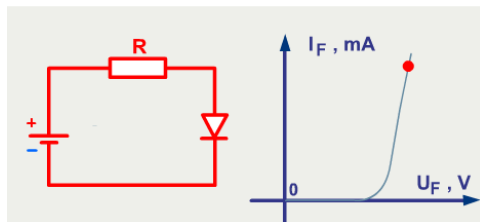
φ_T - Топлинен потенциал

$$\varphi_T = \frac{kT}{q} \quad \varphi_T = \frac{T(K)}{11600}$$

$$\varphi_T = 0.0258 \text{ V for } T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

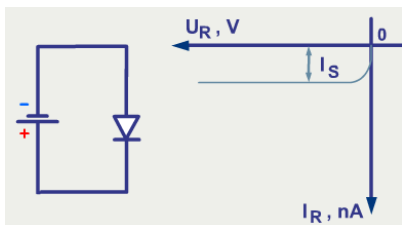
$$U = \varphi_T \ln \left(\frac{I}{I_s} + 1 \right)$$

Уравнение на идеализиран диод



$$I = I_s e^{\frac{U}{\varphi_T}}$$

Право включване

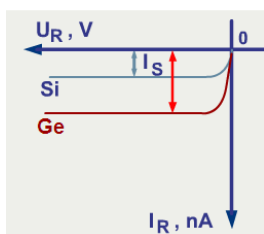


$$I = -I_s$$

Обратно включване

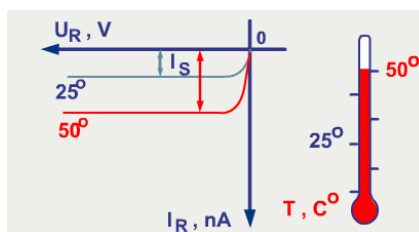
Ток на насищане

$$I_s = f(\Delta W, T, S)$$



Si диод има много по-малък ток на насищане I_s от Ge диод.

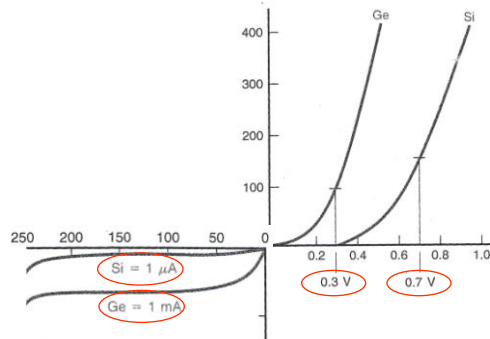
Si диоди имат много по-малко неосновни токоносителни спрямо Ge диоди за същата температура поради по-широката си забранена зона.



I_s се удвоява на всеки 10°C увеличение на температурата.

Тъй като обратният ток се формира от топлинно генерирани неосновни токоносителни, той силно зависи от изменението на температурата.

VA характеристики на Si и Ge диод

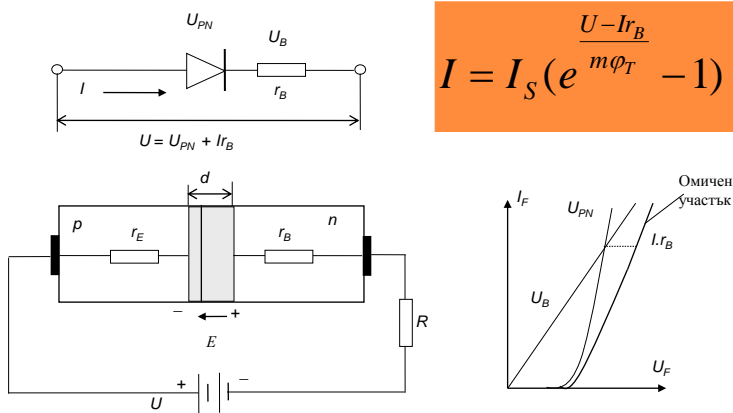


© 2010 доц. д-р. Т.Василева

17

Реален диод – право включване

Отчитат се ток на рекомбинация, омичното съпротивление на базата и модуляция на това съпротивление от тока $r_B = f(I)$.



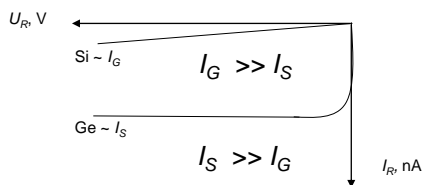
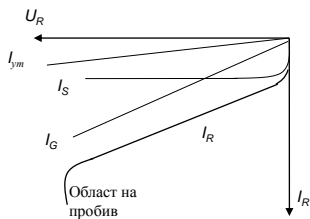
© 2010 доц. д-р. Т.Василева

18

Реален диод – Обратно включване

Отчитат се ток на генерация, ток на утечка и явленията на пробив.

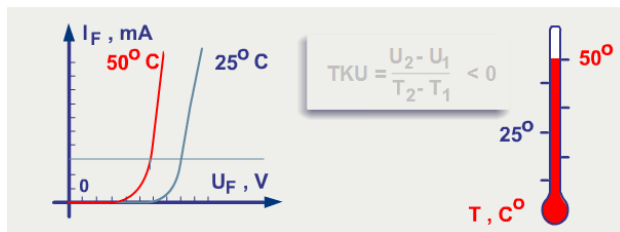
$$I_R = I_S + I_G + I_{ym} + I_{BR} \quad I_G \approx \sqrt{U}$$



Si диод $I_R = I_G + I_{ym} (I_G \gg I_S)$,

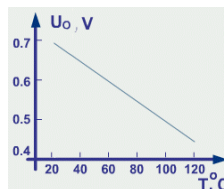
Ge диод $I_R = I_S + I_{ym} (I_S \gg I_G)$

Влияние на температурата



$$TKU_F = \frac{dU}{dT} \approx \frac{\Delta U}{\Delta T} \Big|_{I = const}$$

$$TKU_F \approx -2 \text{ mV/}^\circ\text{C}$$



Мах допустими параметри

- Мах температура на прехода $T_{j\max} < T_j$, където $n=p=n_i$
- Максимална мощност $P_{j\max}$

$$P = UI \quad \text{Мощност в прехода} \quad P = \frac{T_j - T_a}{R_{th}} \quad \text{Мощност отделена в околното пространство}$$

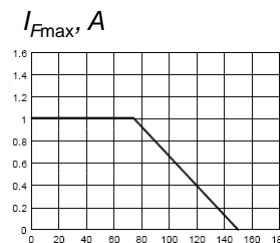
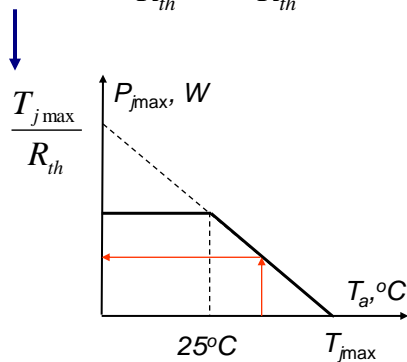
$$UI = \frac{T_j - T_a}{R_{th}}$$

$$P_{\max} = \frac{T_{i\max} - T_a}{R_{th}}$$

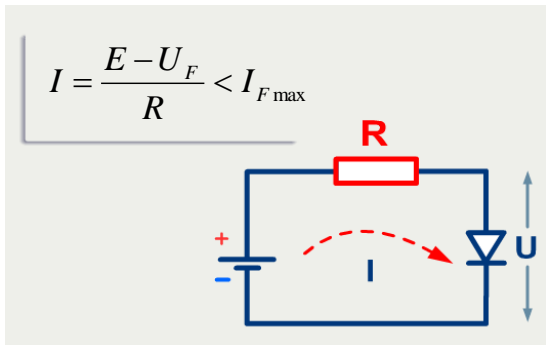
$$P_{\max} = -\frac{1}{R_{th}}T_a + \frac{1}{R_{th}}T_{j\max}$$

Мах мощност & Мах ток

$$P_{\max} = -\frac{1}{R_{th}}T_a + \frac{1}{R_{th}}T_{j\max} \quad U_F I_{F\max} = P_{\max} = \frac{T_{j\max} - T_a}{R_{th}}$$

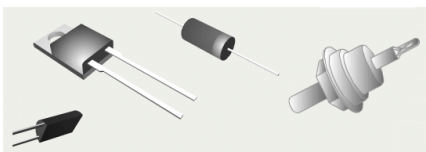


Токоограничаващ резистор



Предназначението на токоограничаващия резистор е да поддържа тока през диода по-малък от максимално допустимия.

Отвеждане на топлината



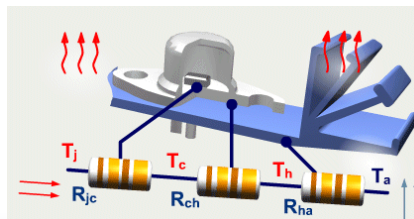
R_{th} показва ефективността на отвеждане топлината от прехода в дименсии $^{\circ}K/W$.

$$R_{th} = R_{th_{jc}} + R_{th_{ca}} \quad R_{th_{ca}} \gg R_{th_{jc}}$$

Колкото по-малко е топлинното съпротивление, толкова по-голяма е максималната мощност.

$$R_{th} = R_{th_{jc}} + R_{th_{ch}} + R_{th_{ha}}$$

Радиатор

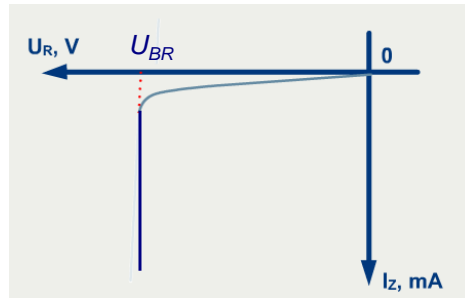


Пробив

Пробивът е явление, при което рязко нараства обратният ток при оставащо почти постоянно обратно напрежение U_{BR} .

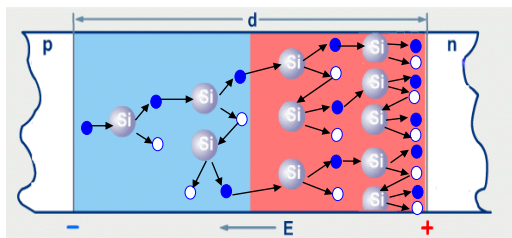
Според механизма на пробив се различават:

- Топлинен пробив
- Електрически пробив
- Лавинен пробив
- Ценеров пробив



Електрическият пробив е обратим, докато топлиният е **необратим** и довежда до разрушаване на диода.

Лавинен пробив

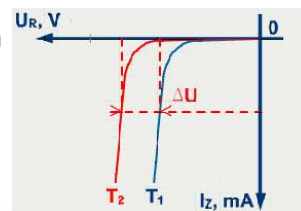


$$M = \frac{I_{BR}}{I_R} = \frac{1}{1 - \left(\frac{U_R}{U_{BR}}\right)^n}$$

Неосновните токоносители, ускорени от полето, при сблъсък с атомите ги йонизират и се създават електрон и дупка. Процесът продължава лавинообразно, причинявайки рязко нарастване на тока.

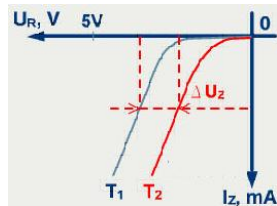
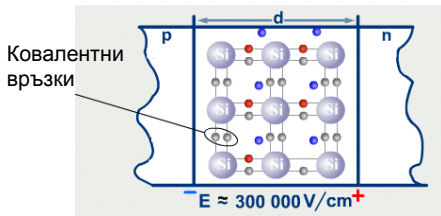
$$U_{BR} > 7V$$

Лавинният пробив настъпва в широки PN преходи при обратни напрежения над $7V$.



Влияние на температурата

Ценеров пробив



Влияние на температурата

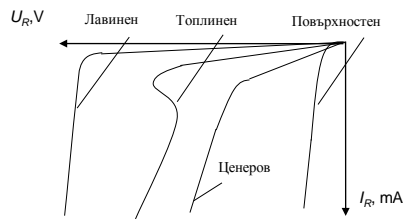
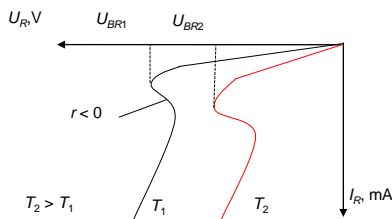
При достатъчно голямо електрическо поле се разкъсват ковалентни връзки и се създават допълнителни електрони и дупки – Ценеров ефект. Изискват се стойности на полето от порядъка на 300 000 V/cm.

Ценеров пробив настъпва при много тесни PN преходи при обратни напрежения под **5V**.

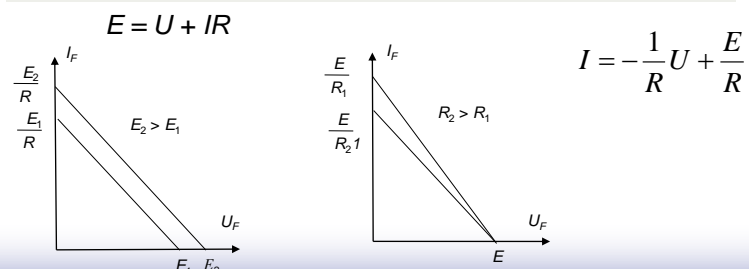
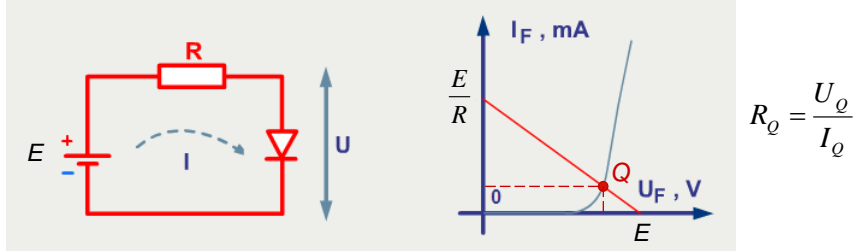
Топлинен пробив

Този пробив настъпва, ако

$$U_R I_R > \frac{T_j - T_a}{R_{th}}$$

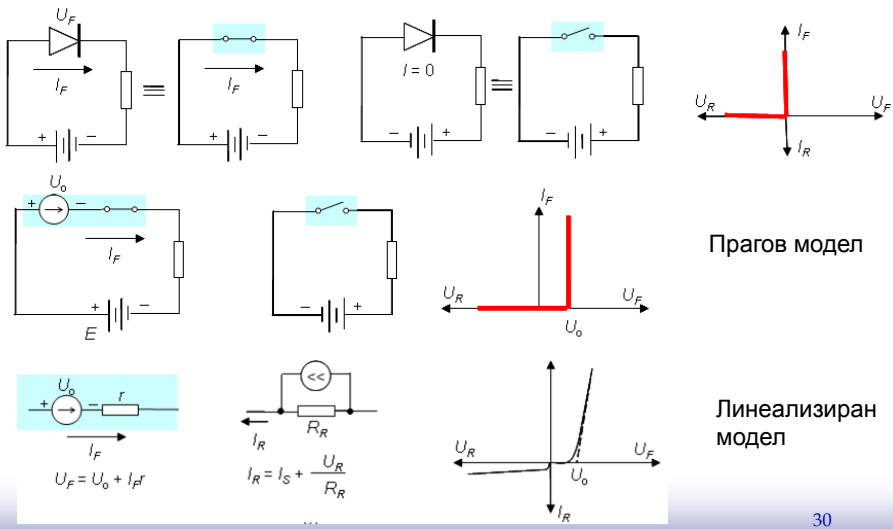


Товарна права и работна точка



© 2010 доц. д-р. Т.Василева

Еквивалентни схеми по ток



Прагов модел

Линеализиран модел

© 2010 доц. д-р. Т.Василева

Тестване на диода

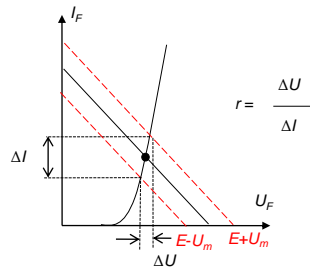
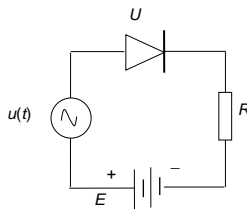


© 2010 доц. д-р. Т.Василева

31

Работа на диода при малък ~ сигнал

- Диференциално съпротивление

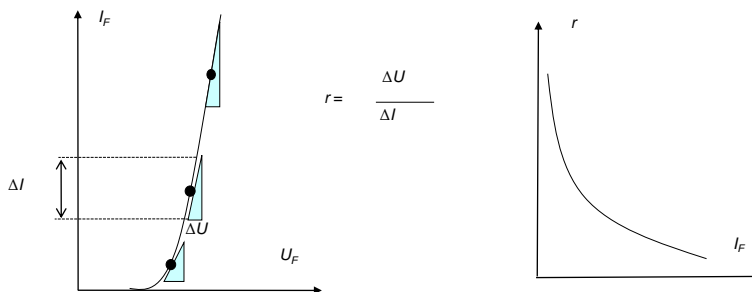


$$r = \frac{dU}{dI} = \frac{\varphi_T}{I + I_s}$$

© 2010 доц. д-р. Т.Василева

32

Графично определяне на r_V

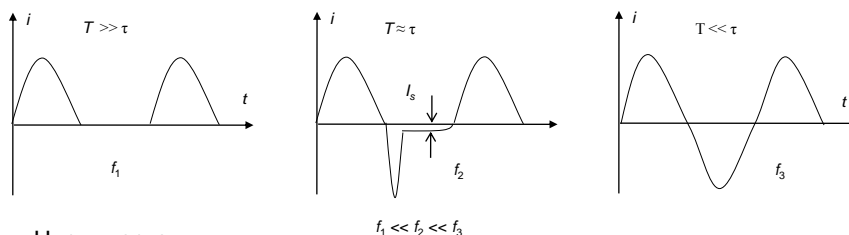


$$r = \frac{\Delta U}{\Delta I}$$

Диференциалните параметри характеризират елемента **само в зададена работна точка**.

При изменение на постоянно токовия режим стойността им съществено се променя.

Честотни свойства



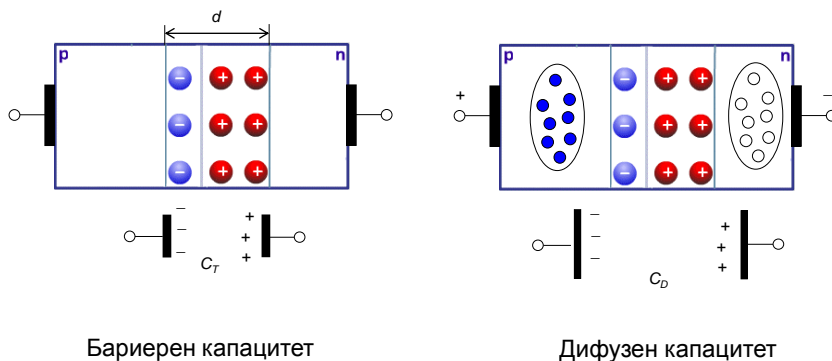
Ниски честоти

При високи честоти диодът губи изправителните си свойства.

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

Капацитети на диода

$$C = C_T + C_D$$



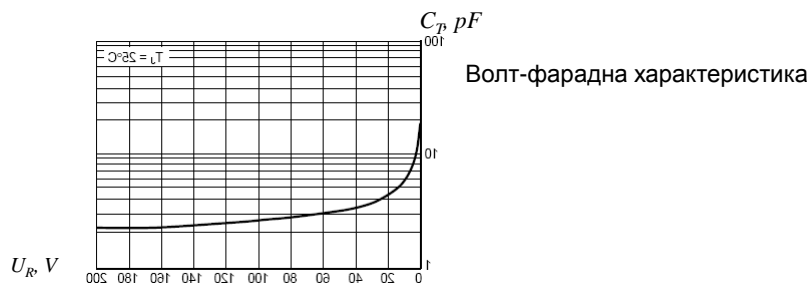
Бариерен капацитет

Дифузен капацитет

Бариерен капацитет

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

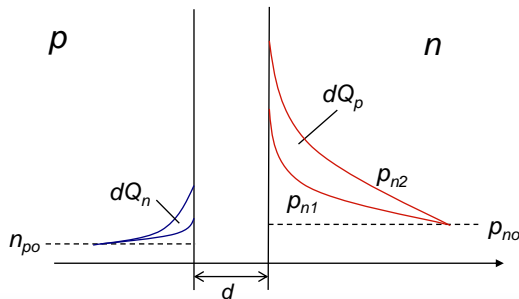
$$C_T = \frac{dQ}{dU} \quad C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d} \quad C_T \sim \frac{SN_D}{\sqrt{U}}$$



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 токоносителни през прехода, C_D се отчита **само при право включване на диода**.



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

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

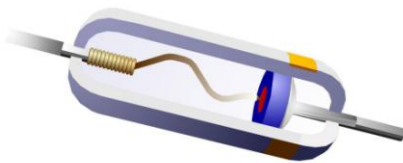
$$C_D \gg C_T$$

© 2010 доц. д-р. Т.Василева

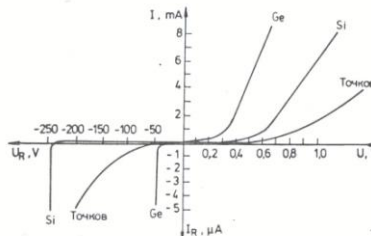
37

Високочестотни диоди

Високочестотните диоди са предназначени за изправяне на токове и напрежения с честота до 150 MHz.



Конструкция на точков диод



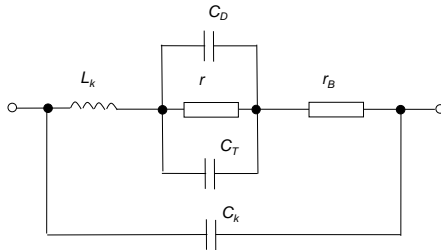
За увеличаване на граничната работна честота на диодите капацитетите (респективно площта на диода) и времето на живот трябва да са малки.

© 2010 доц. д-р. Т.Василева

38

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

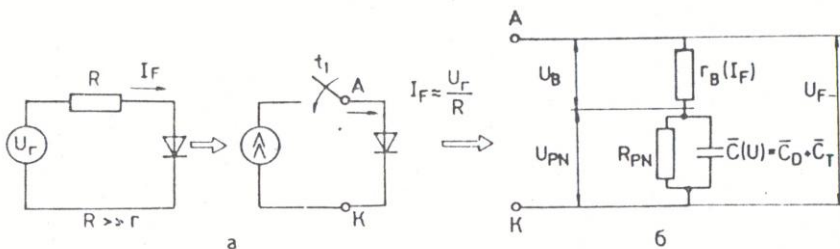
L_k - индуктивност на изводите

C_k - капацитет на корпуса

С увеличаване на честотата капацитетите шунтират прехода и влошават едностранната му проводимост.

Влиянието на капацитетите зависи от полярността на напрежението.

Работа в импулсен режим



Режим на генератор на ток

Еквивалентна схема за голям сигнал

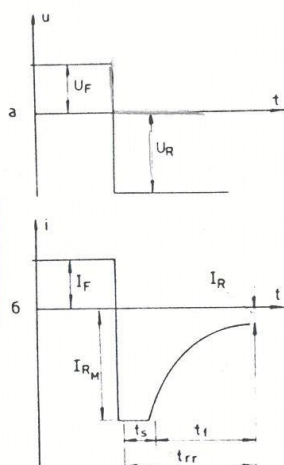
При работа на диода като ключ бърздействието при превключване се определя от продължителността на преходните процеси. Инертността на диода се дължи на необходимостта от:

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

Процеси при включване



Процеси при изключване



Импулсни параметри

I_{RM} - Импулсна стойност на тока при обратно включване

t_{rr} - време за възстановяване на обратното съпротивление на диода

$$t_{rr} = t_s + t_f \quad t_s > t_f$$

t_s - време на разнасяне на неосновните токоносители

t_f - 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 μ s.

- 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.