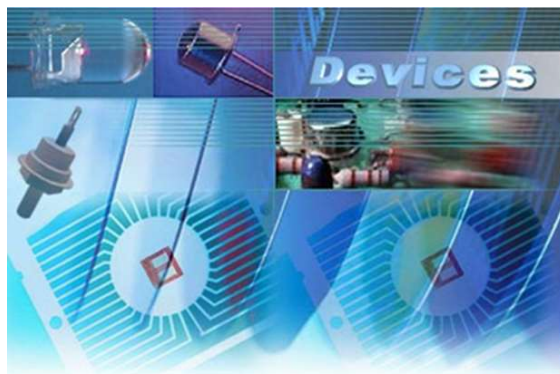




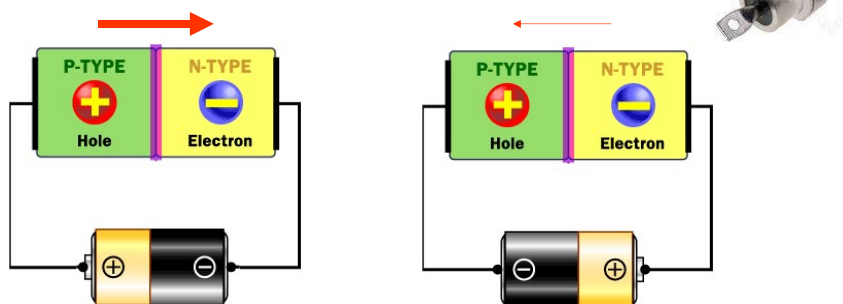
Полупроводников диод

Работа по постоянен ток



Полупроводникови елементи

Въведение



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

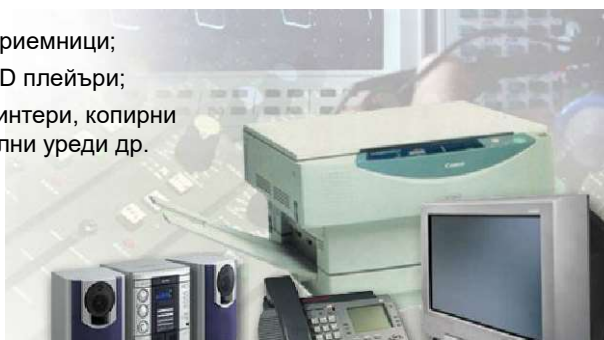
Диодът има **едностранна** проводимост на тока. Това негово свойство се използва в изправителите за преобразуване на променливия в постоянен ток.

Приложение

Постояннотоковото захранване е важна предпоставка за функциониране на всяко електронно оборудване. Диодите са съществен елемент във всеки токоизправител, където едностранната им проводимост се използва за преобразуване на променливия ток от електрическата мрежа в постоянен.

Изправители има във всички уреди, които се захранват от променливотоковата електрическата мрежа:

- ✦ телевизия и радиоприемници;
- ✦ видео рекордери, CD плейъри;
- ✦ компютри, факс, принтери, копирни машини, измервателни уреди др.



Цели и предпоставки

За да се разберат изправителните свойства на полупроводниковите диоди са необходими познания за принципа на действие на диодите при промяна на поляритета на приложеното напрежение.

Познавате

След изучаване на материала вие би трябвало да:

- ✦ Свойствата на диоди с PN преход
- ✦ Характеристиките и параметрите на диода

Разбирате

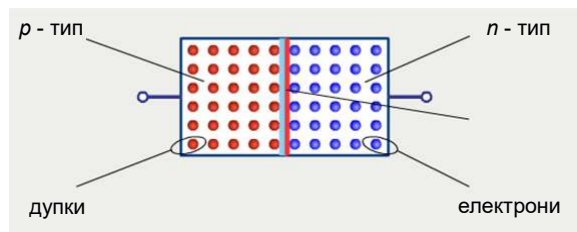
- ✦ Как се формира PN преходът;
- ✦ Процесите при право включване на диода;
- ✦ Процесите при обратно включване на диода

Анализирате

- ✦ Влиянието на температурата
- ✦ Токовете и напреженията в схеми с диоди

Предпоставки: свойства на полупроводниците

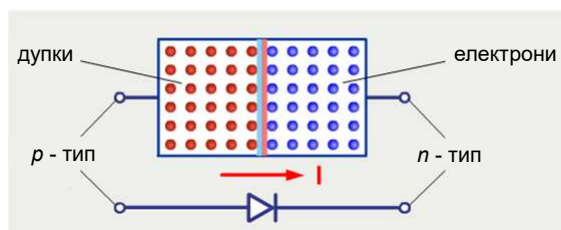
Структура на диода



Идеализираният диод провежда ток само в една посока.

Специфичните свойства на диода се определят от неговата структура, която се състои от две области с различен тип проводимост (p и n) в единен монокристал.

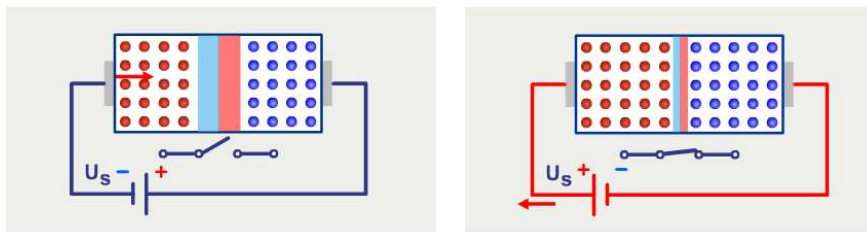
Схемно означение на диода



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

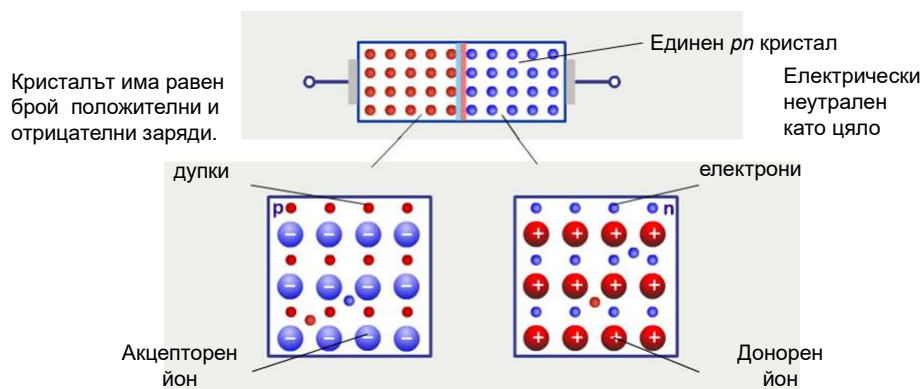
“Стрелката” в символното му означение, сочеща от анода към катода, показва че ток през диода тече лесно именно в тази посока. В обратната посока има бариера, която възпрепятства преминаването на ток.

Принцип на действие на диода

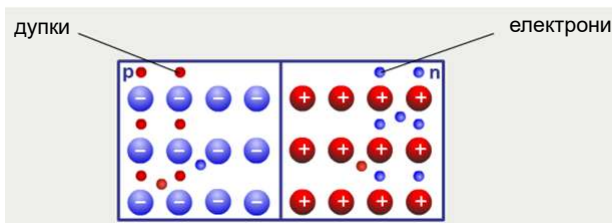


Принципът на действие на диода се дължи на промяна в условията на границата между две области в полупроводника с различен тип проводимост (т.н. *PN* преход) при промяна на поляритета на приложеното напрежение.

Диод без приложено напрежение



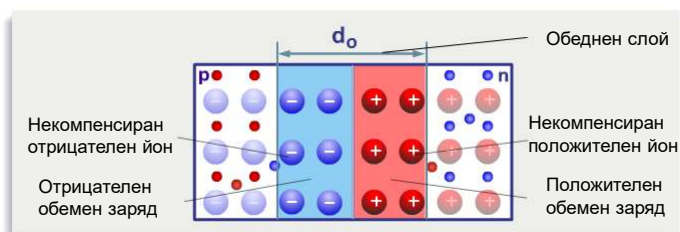
Формиране на PN прехода



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.

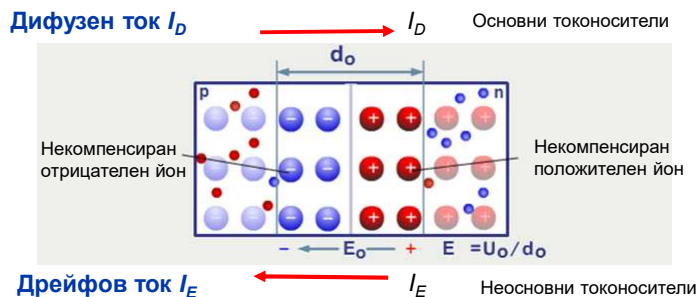
Обеднен слой



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**.

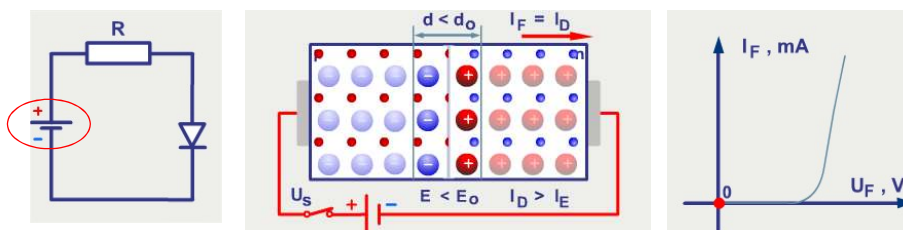
Барьерен потенциал и ел. поле



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

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

Право включване

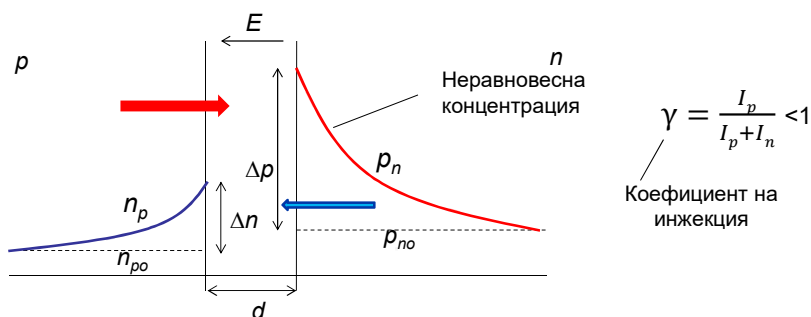


Барьерният потенциал ще се намали до $U_0 - U_s$ и електрическото поле $E < E_0$.

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.

Инжекция на токоносителите

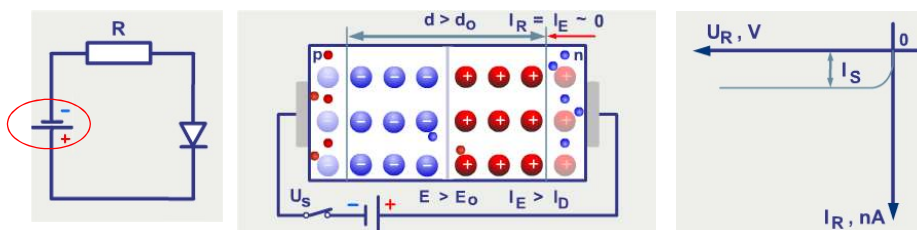


Увеличение на концентрацията на неосновните токоносителите над равновесната на границата на PN прехода при право включване се нарича **инжекция**.

Инжекция има само при право включване.

В **несиметричен** преход ($N_A > N_D$) инжекцията има **едностранен** характер. Инжектират се предимно токоносителите от областта с по-голяма концентрация.

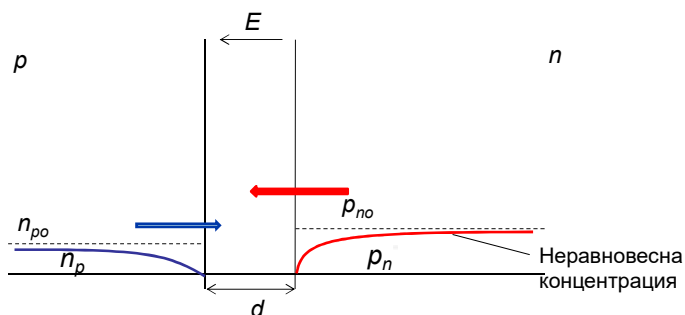
Обратно включване



Потенциалната бариера се повишава до $U_o + U_s$ и електрическото поле $E > E_o$. Дифузията на основни токоносителите през прехода сериозно се затруднява.

Много малък обратен ток I_R , съставен от топлинно генерирани **неосновни токоносителите** 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.

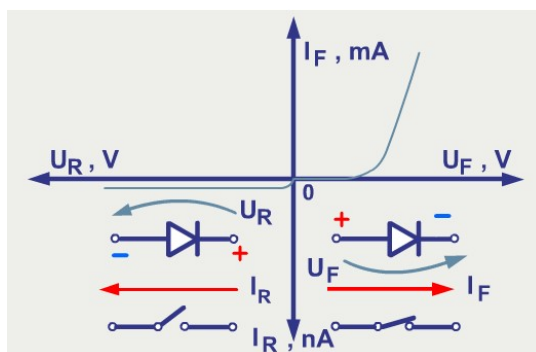
Екстракция на токоносители



Намаление на концентрацията на неосновните токоносители под равновесната на границата на PN прехода при обратно включване се нарича **екстракция**.

Екстракция има само при обратно включване.

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

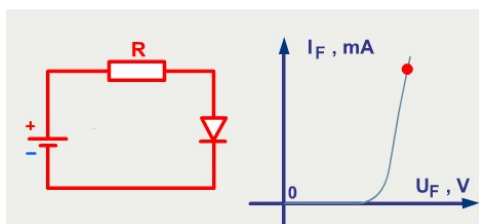
S – Площ на прехода

φ_T – Топлинен потенциал

$$\varphi_T = \frac{kT}{q} \quad \varphi_T = \frac{T(K)}{11600} \quad \varphi_T = 0.0258V \text{ за } T = 25^\circ C$$

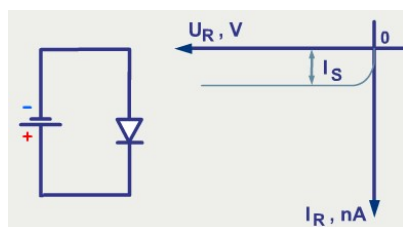
$$U = \varphi_T \ln \left(\frac{I}{I_s} + 1 \right)$$

Уравнение на идеализиран диод



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

Право включване

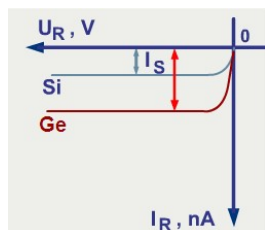


$$I = -I_s$$

Обратно включване

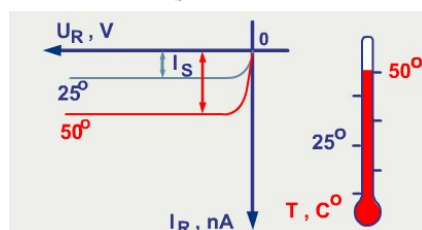
Ток на насищане

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



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

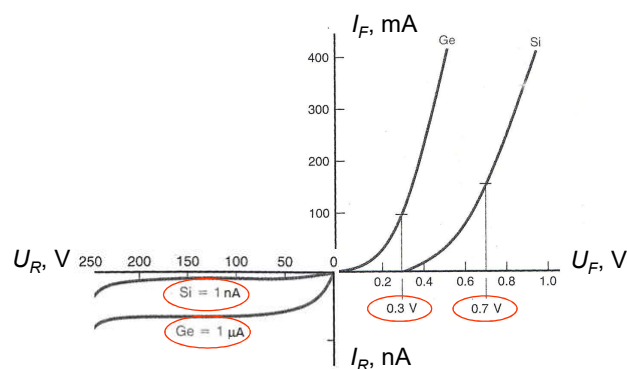
Si диоди имат много по-малко неосновни токоносителни спрямо Ge диоди за същата температура поради по-широката си забранена зона.



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.

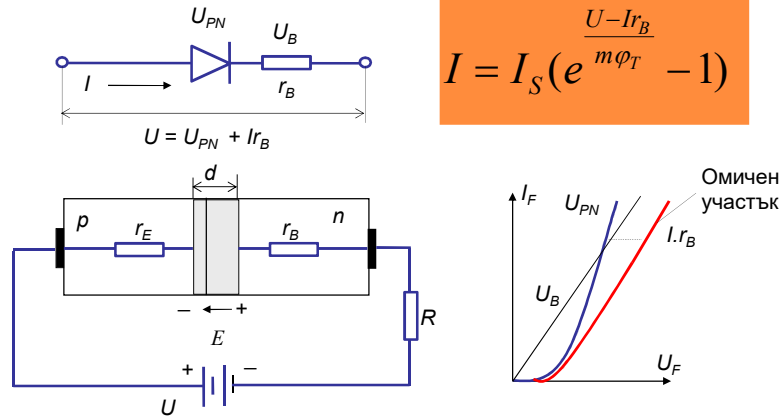
VA характеристики на Si и Ge диод



На значително по-малкия топлинен ток за силициев диоди съответства по-голям пад в права посока. Падът на напрежение в права посока за Ge диоди е $0,3 - 0,4\text{ V}$, докато за Si е $0,5 - 0,7\text{ V}$.

Реален диод – право включване

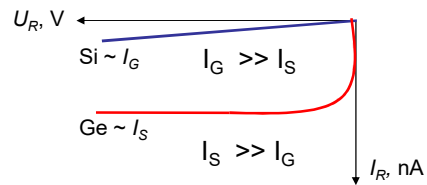
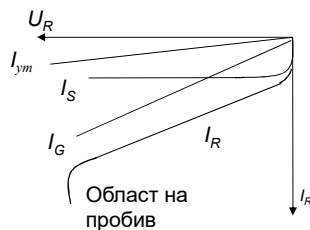
Отчитат се ток на рекомбинация, омичното съпротивление на базата и модулация на това съпротивление от тока $r_B = f(I)$.



Реален диод – обратно включване

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

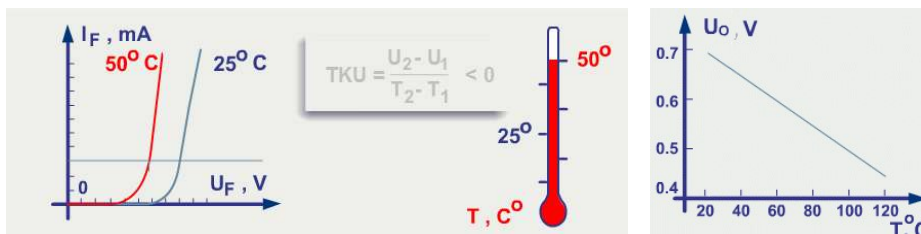
$$I_R = I_S + I_G + I_{ym} + I_{BR} \quad I_G \approx \sqrt{U}$$



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

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

Влияние на температурата



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

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

Диодът има **отрицателен температурен коефициент** на напрежението U_F . Това позволява диодите да се използват като датчици за температура, както и за температурна компенсация.

Максимално допусими параметри

- ✦ Максимална температура на прехода $T_{jmax} < T_i$, където $n = p = n_i$
- ✦ Максимална мощност P_{jmax}

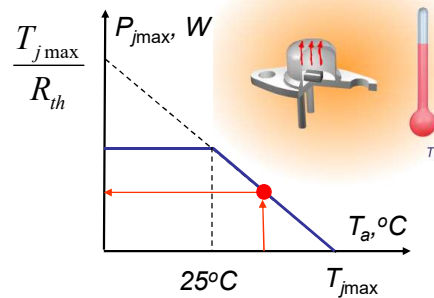
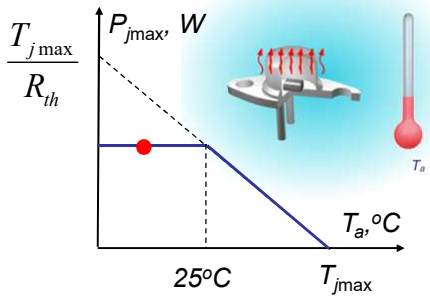
$$P = UI \quad \text{Мощност в прехода} \quad P = \frac{T_j - T_a}{R_{th}} \quad \text{Мощност отделена в околното пространство}$$

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

$$P_{max} = \frac{T_{imax} - T_a}{R_{th}} \quad P_{max} = -\frac{1}{R_{th}} T_a + \frac{1}{R_{th}} T_{jmax}$$

Max мощность & Температура

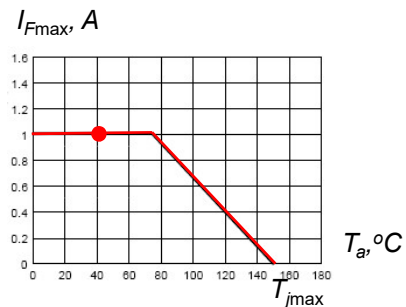
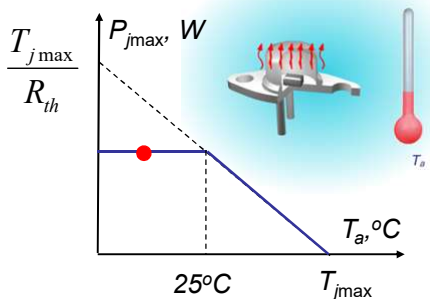
$$P_{\max} = -\frac{1}{R_{th}}T_a + \frac{1}{R_{th}}T_{j\max}$$



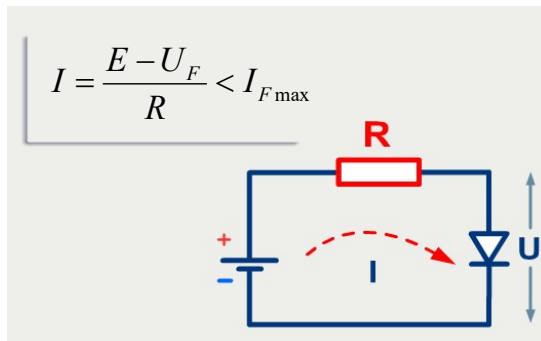
Max мощность & Max ток

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

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



Токоограничаващ резистор



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

Без наличие на този резистор в схемите, няма какво да ограничи нарастването на тока при право включване и **диодът излиза от строя**.

Топлинно съпротивление

Максималната мощност може да се увеличи чрез намаляване на топлинното съпротивление R_{th} . **Топлинното съпротивление** R_{th} показва ефективността на отвеждане топлината от прехода в дименсии K/W или °C/W.

$$R_{th} = R_{thjc} + R_{thca} \quad R_{thca} \gg R_{thjc}$$

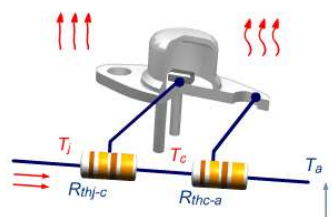
Преход – Корпус –
корпус околна среда



Средномощен транзистор

$$R_{thj-a} = R_{thj-c} + R_{thc-a}$$

$$62^\circ\text{C/W} = 2^\circ\text{C/W} + 60^\circ\text{C/W}$$

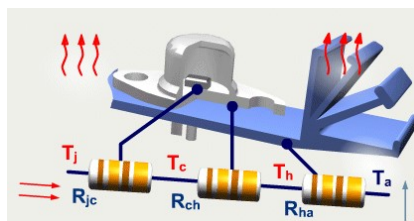
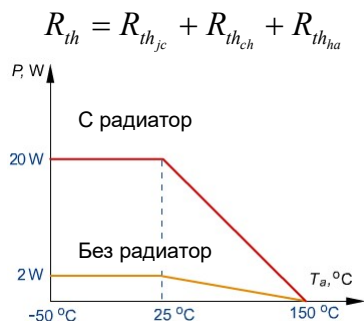


Мощен транзистор

$$R_{thj-a} = R_{thj-c} + R_{thc-a}$$

$$31^\circ\text{C/W} = 1^\circ\text{C/W} + 30^\circ\text{C/W}$$

Отвеждане на топлината



Топлинното съпротивление може да се намали с помощта на радиатор. Той представлява метална конструкция с голяма площ, която спомага по-лесното отвеждане на топлината.

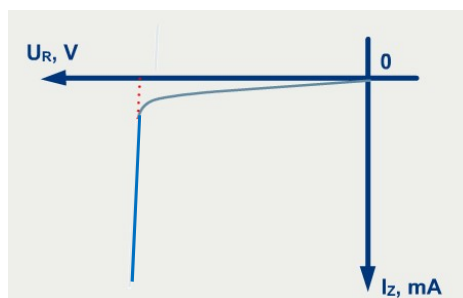
При наличие на радиатор общото топлинно съпротивление намалява, защото се увеличават пътищата за разсейване на топлината.

Пробив

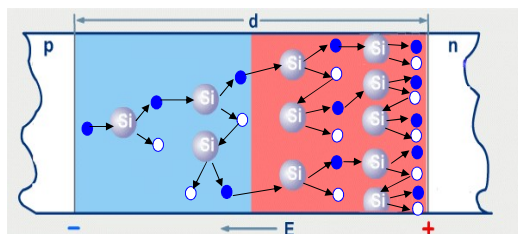
Пробивът е явление, при което рязко нараства обратният ток при оставащо почти постоянно обратно напрежение U_{BR} .

Според механизма на пробив се различават:

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



Лавинен пробив

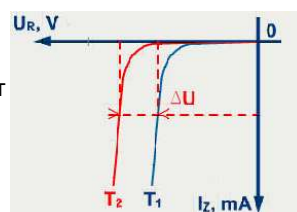


Неосновните токоносителни, ускорени от полето, при сблъсък с атомите ги йонизират и се създават електрон и дупка. Процесът продължава лавинообразно, причинявайки рязко нарастване на тока.

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

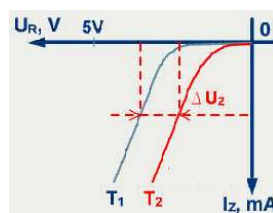
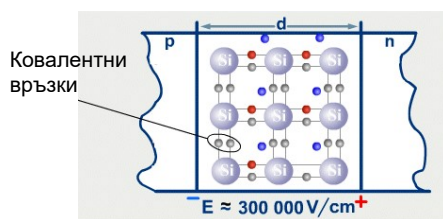
$$U_{BR} > 7V$$

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



Влияние на температурата

Ценеров пробив



Влияние на температурата

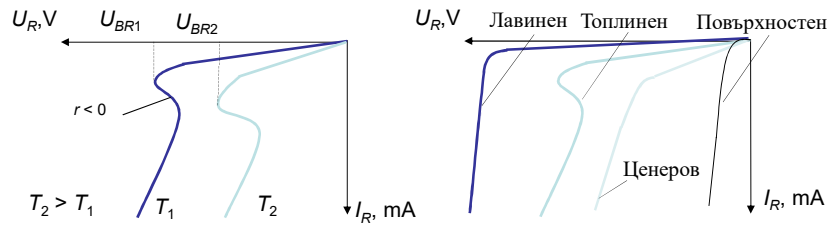
При достатъчно голямо електрическо поле се разкъсват ковалентни връзки и се създават допълнителни електрони и дупки – Ценеров ефект. Изискват се стойности на полето от порядъка на 300 000 V/cm.

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

Топлинен пробив

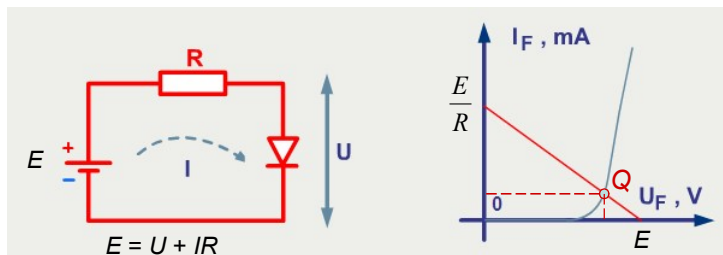
Този пробив настъпва, ако

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

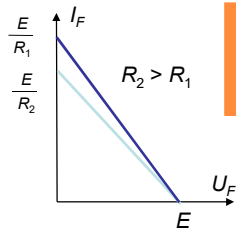
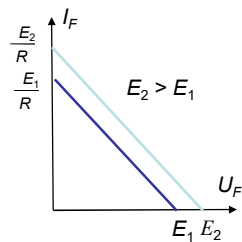


Топлинният е **необратим** и довежда до разрушаване на диода. С увеличаване на околната температура пробивът настъпва при по-ниско напрежение, защото нараства обратният ток и се влошават условията за охлаждане

Товарна права и работна точка



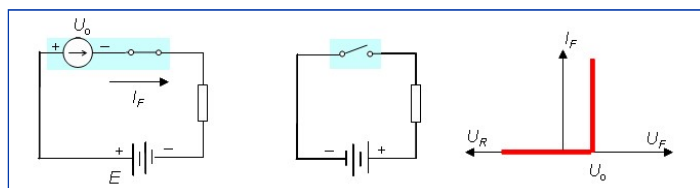
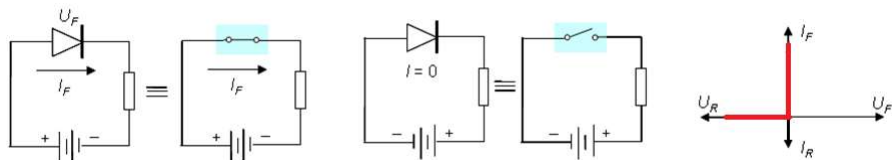
$$R_Q = \frac{U_Q}{I_Q}$$



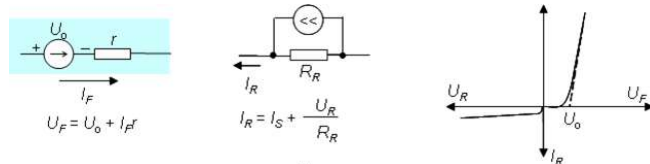
$$I = -\frac{1}{R}U + \frac{E}{R}$$

Зависимост от захранването и товарното съпротивление

Еквивалентни схеми по ток



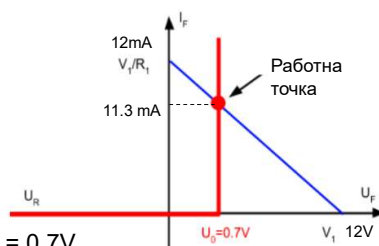
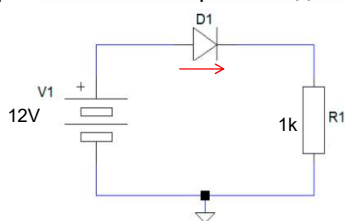
Прагов модел



Линеализиран модел

Примери

Изчисляване на стойностите на тока и напрежението в работната точка чрез използване на прагов модел.



Диодът е в право включване с $U_0 = 0.7V$

Напрежението върху резистора U_R се изчислява от закона на Кирхов.

$$U_R = V1 - U_0 = 12 - 0.7 = 11.3V$$

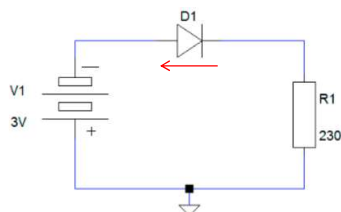
Токът през R_1 от закона на Ом е: $I_R = \frac{U_R}{R_1} = \frac{11,3}{1.10^3} = 11,3 \cdot 10^{-3}A = 11.3 mA = I_D$

	U, V	I, mA
Диод	0.7	11.3
Резистор	11.3	11.3

В последователна верига токът е един и същ през всички елементи на схемата

Примери

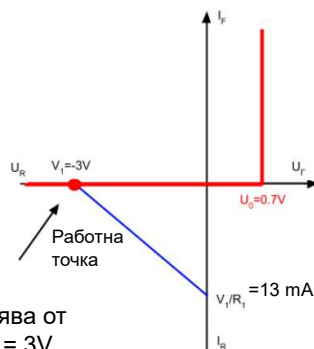
Изчисляване на стойностите на тока и напрежението в работната точка чрез използване прагов модел.



Диодът е в обратно включване, $I=0$.

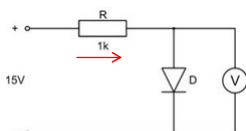
От закона на Ом $U_R = I \cdot R_1 = 0$

Напрежението върху диода се изчислява от закона на Кирхов $U_D = V1 - I \cdot R_1 = 3 - 0 = 3V$

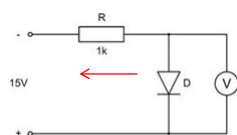


	U, V	I, mA
Диод	3	0
Резистор	0	0

Примери



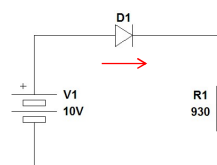
Какво ще е показанието на волтметъра, ако диодът е от Si? Какъв ток тече през диода? Постройте товарната права и означете работната точка. Използвайте прагов модел на диода.



Какво ще е показанието на волтметъра, ако диодът е от германий? Какъв ток тече през диода? Постройте товарната права и означете работната точка. Използвайте прагов модел на диода.

Изчислете отделената мощност върху Si диод от схемата.

$P_D = I \cdot U_D$ $I = ?$ Използвайте прагов модел на диода.



Тестване на диода



Право включване



При изправен диод
показанието е 0,5 – 0,9 V.



Обратно включване

„OL” означава
отворена верига