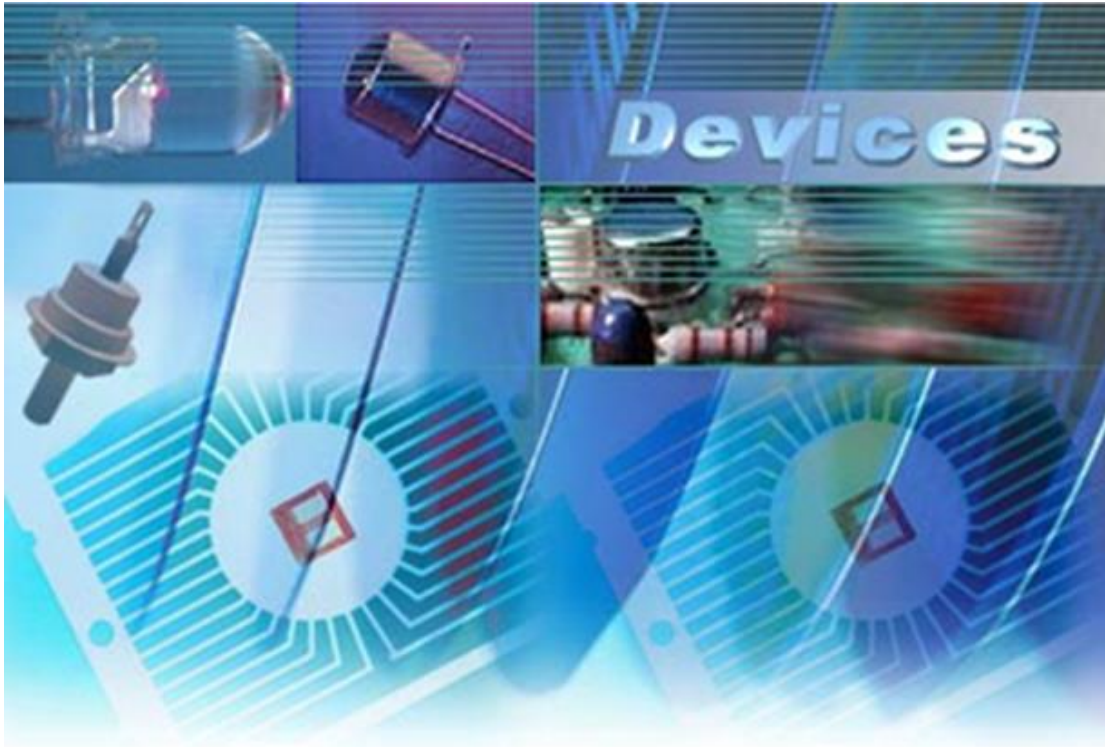




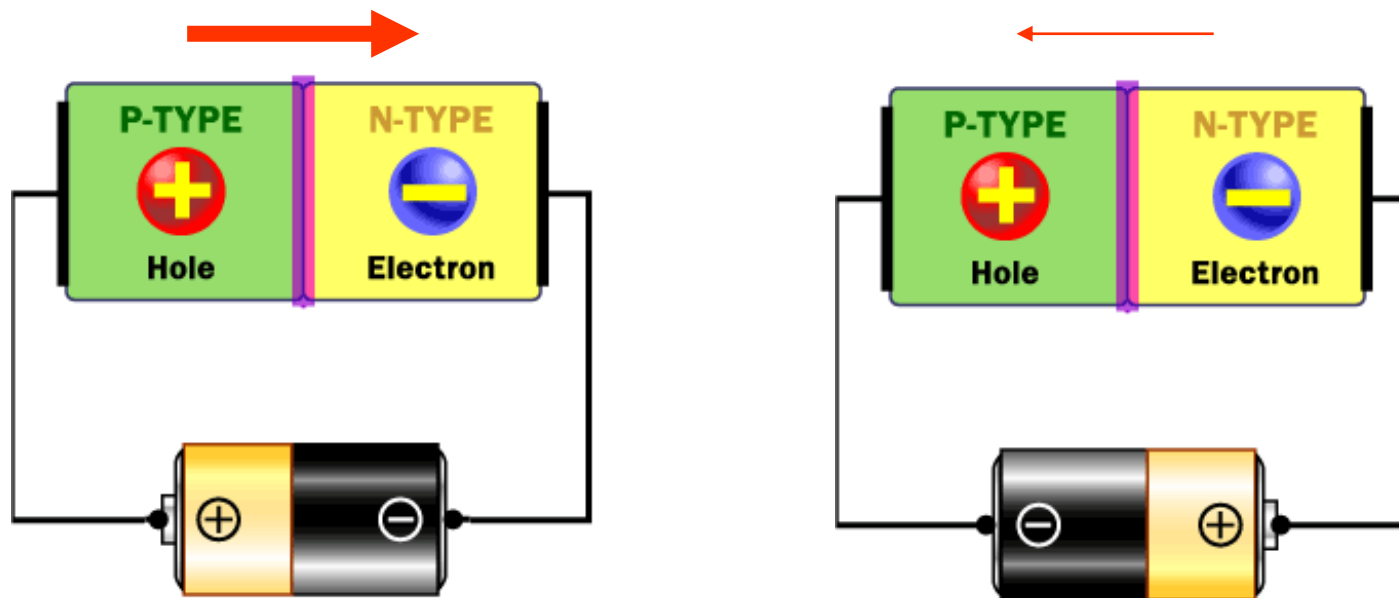
Полупроводников диод

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**.

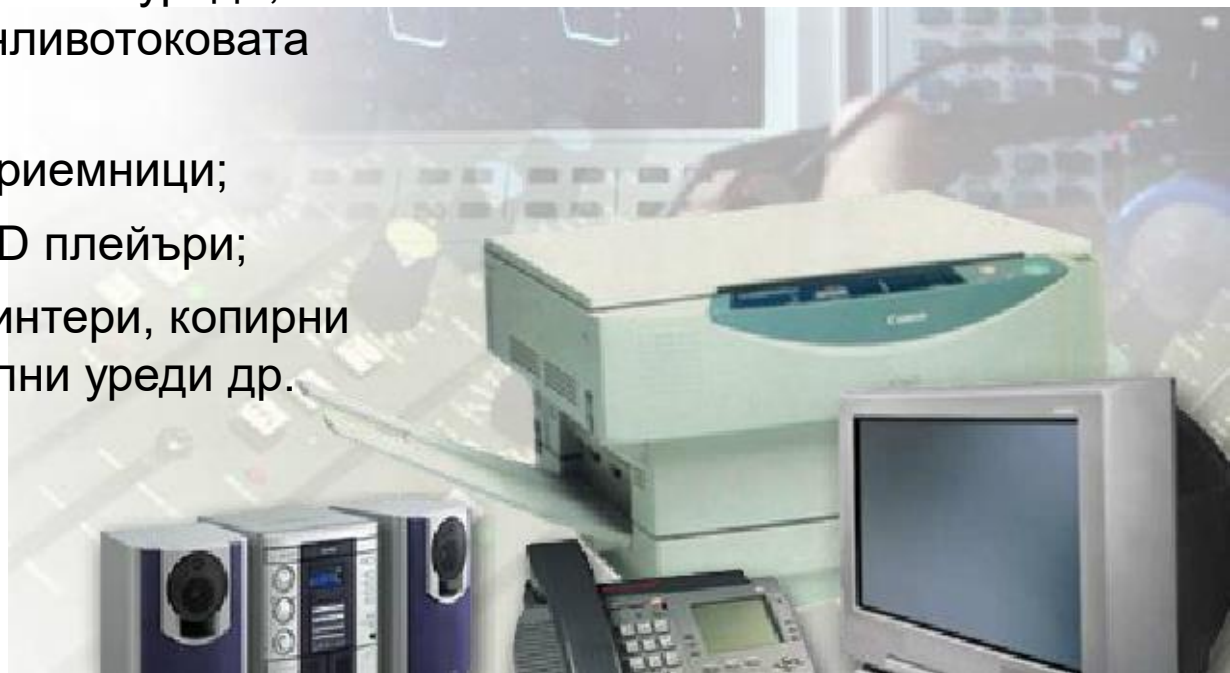
Диодът има **едностранна** проводимост на тока. Това негово свойство се използва в изправителите за преобразуване на променливия в постоянен ток.

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.

Познавателно

След изучаване на материала вие би трябвало да:

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

Разбирателно

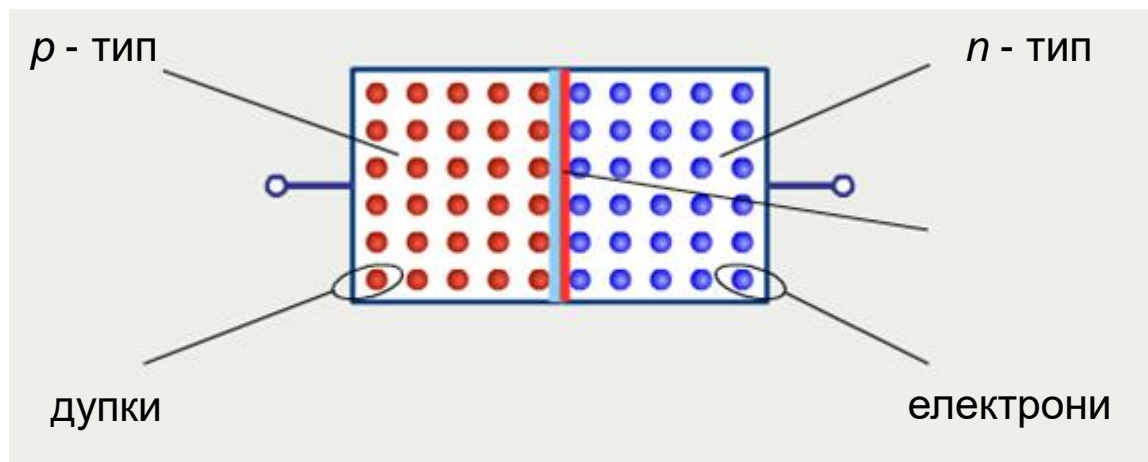
- ✚ Как се формира PN преходът;
- ✚ Процесите при право включване на диода;
- ✚ Процесите при обратно включване на диода

Анализиране

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

Предпоставки: свойства на полупроводниците

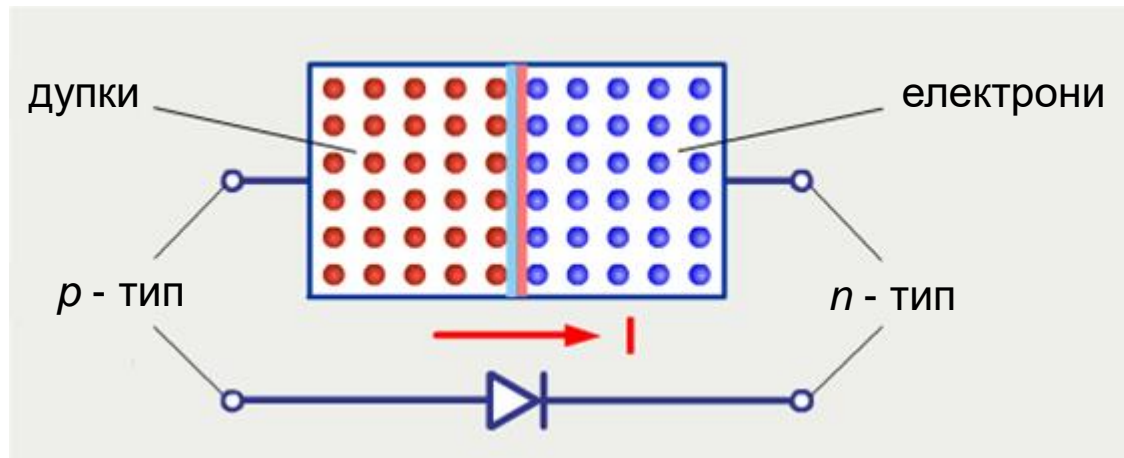
Структура на диода



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.

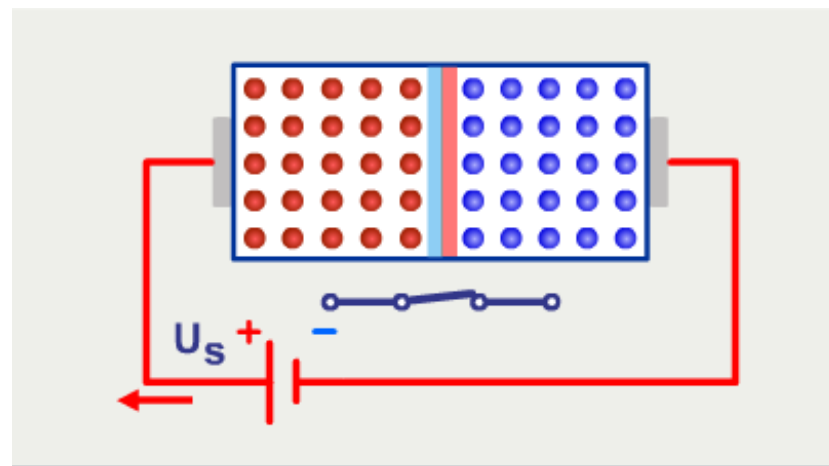
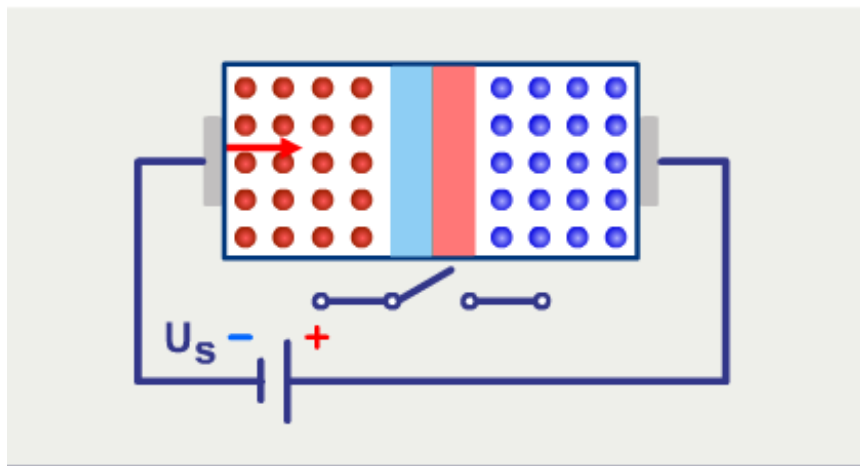
Схемно означение на диода



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.

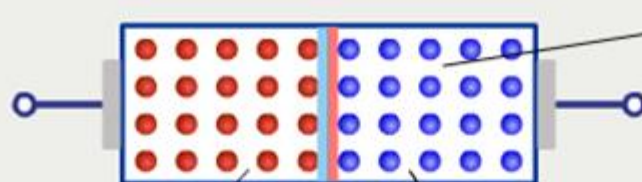
Принцип на действие на диода



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

Кристалът има равен брой положителни и отрицателни заряди.

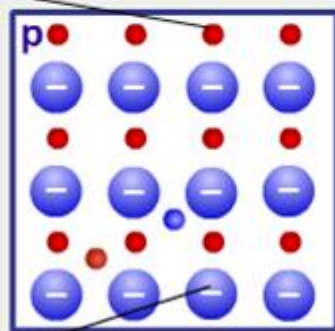


Единен pn кристал

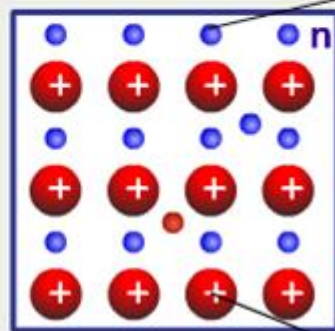
Електрически
неутрален
като цяло

дупки

електрони

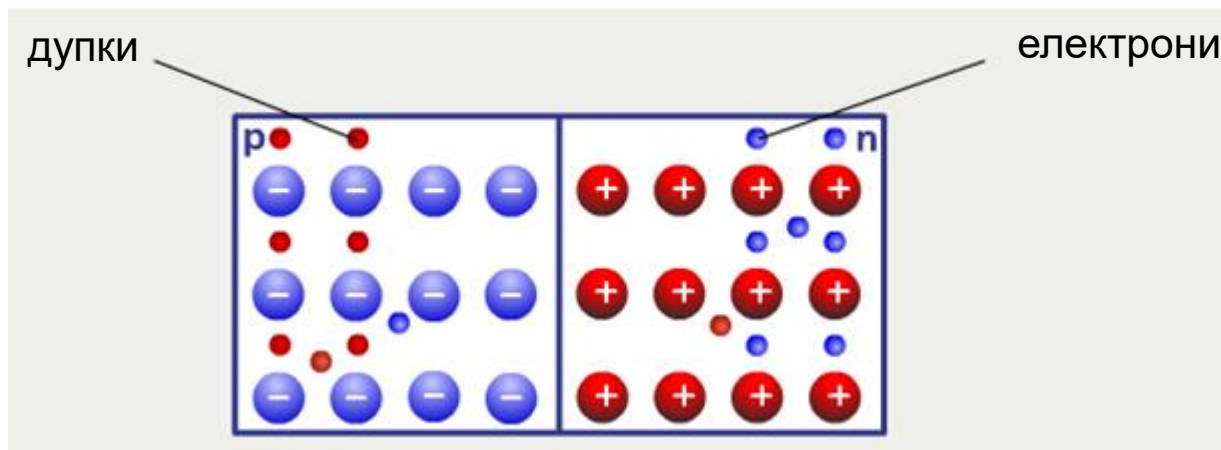


Акцепторен
йон



Донорен
йон

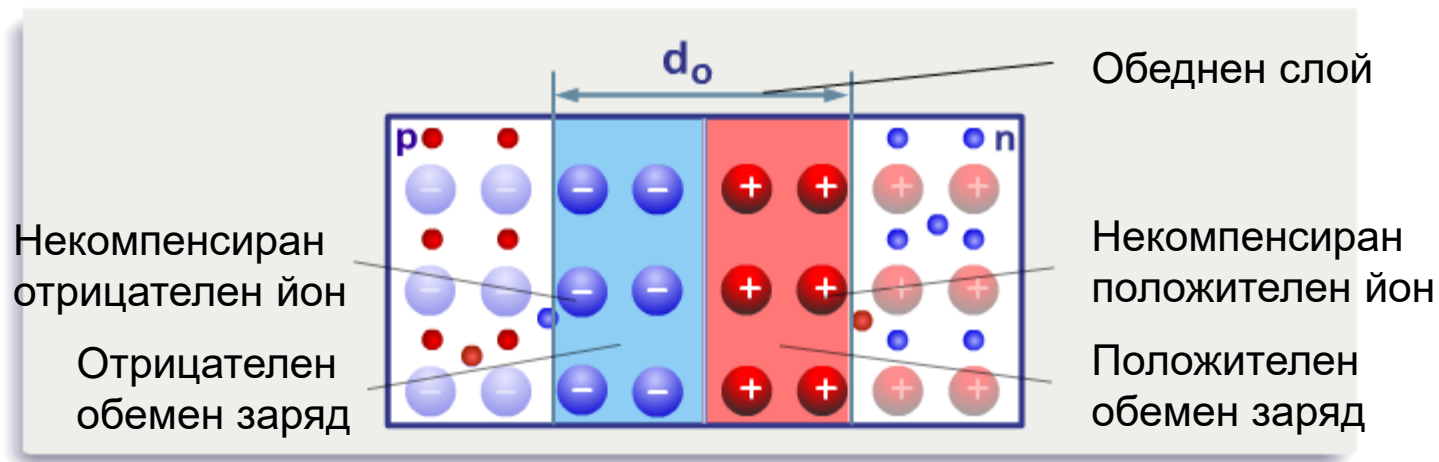
Формиране на PN прехода



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**.

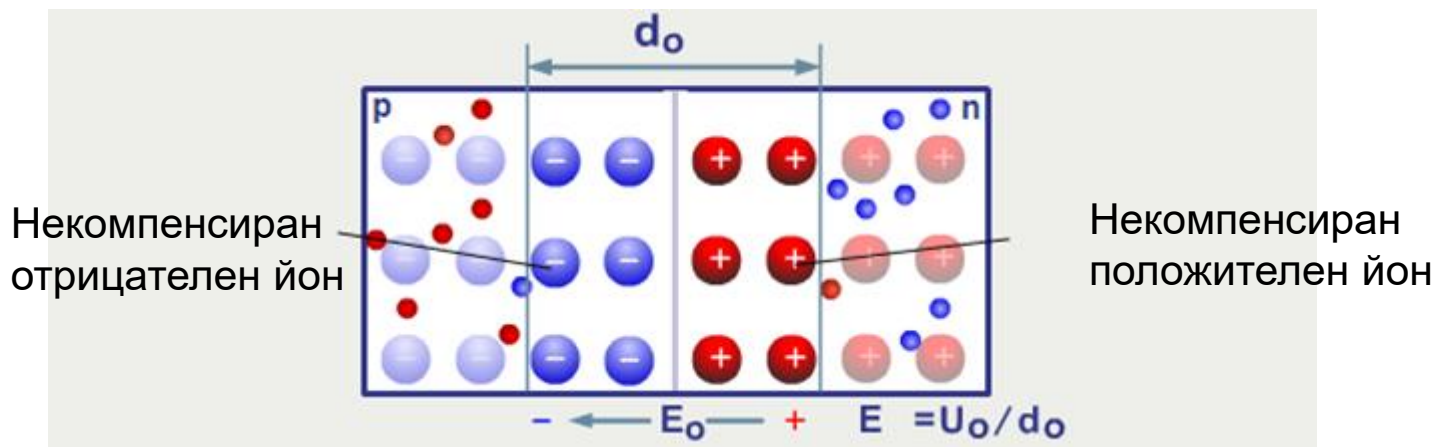
Бариерен потенциал и ел.поле

Дифузен ток I_D



I_D

Основни токоносители



Дрейфов ток I_E



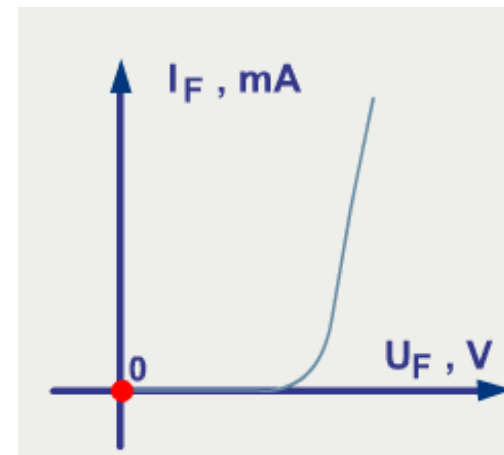
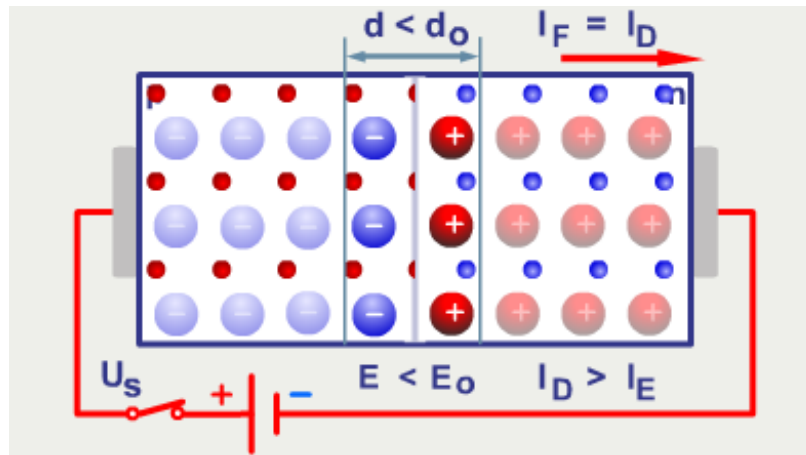
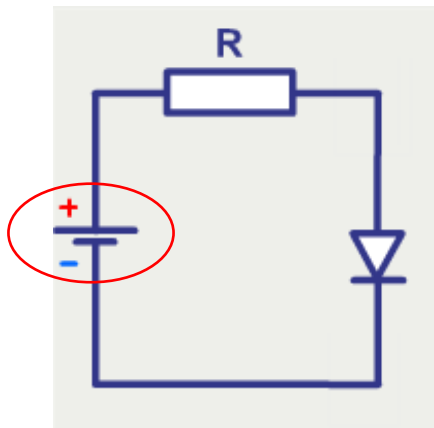
I_E

Неосновни токоносители

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

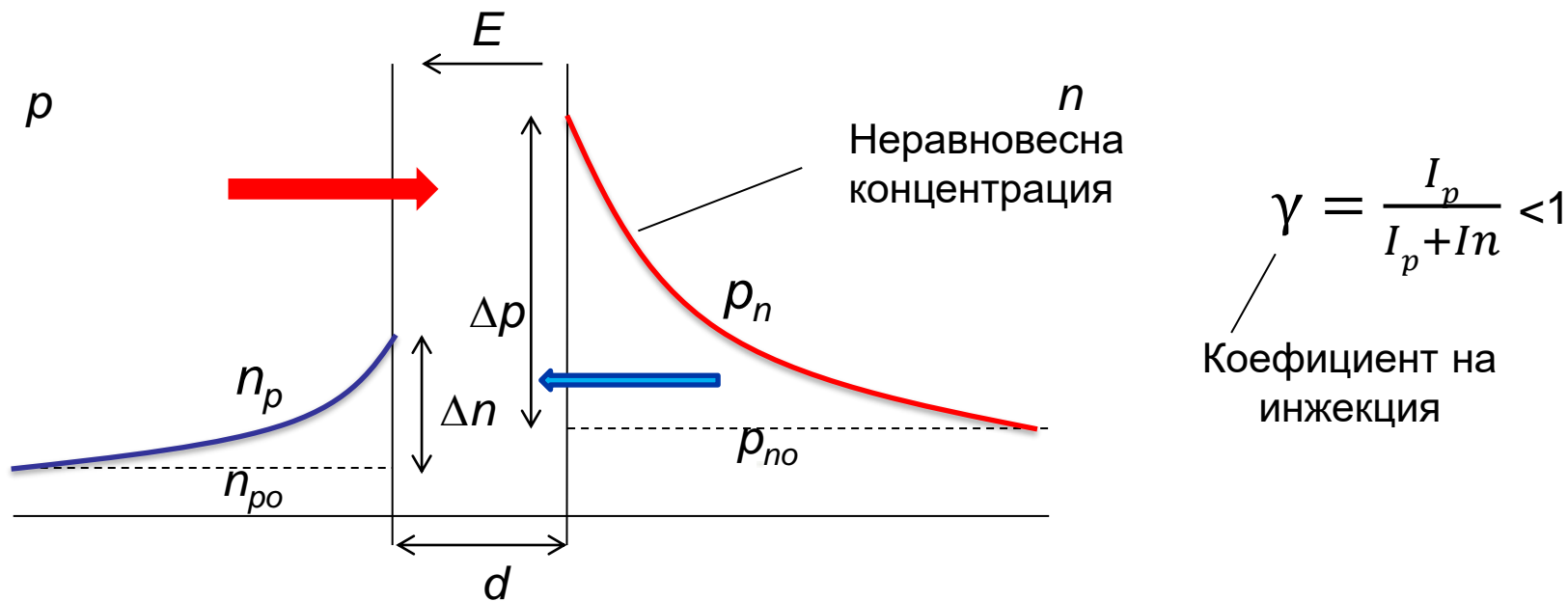


Бариерният потенциал ще се намали до $U_0 - U_s$ и електрическото поле $E < E_0$.

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 токоносители

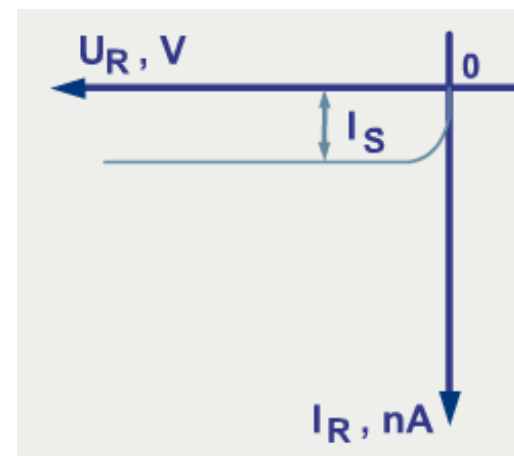
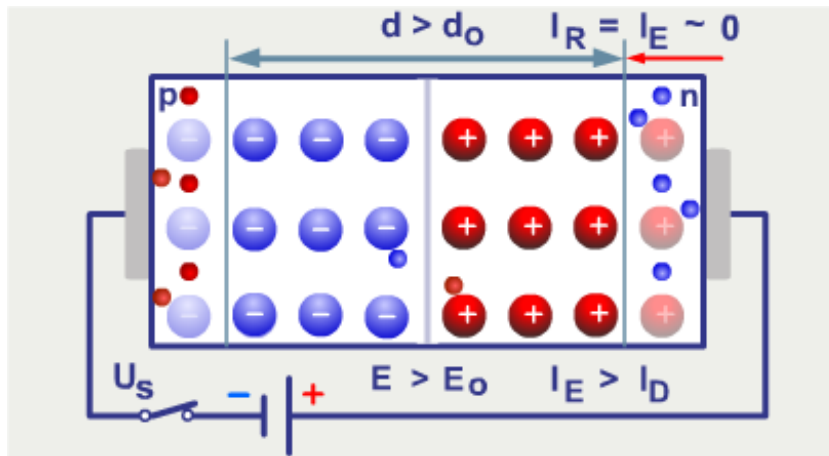
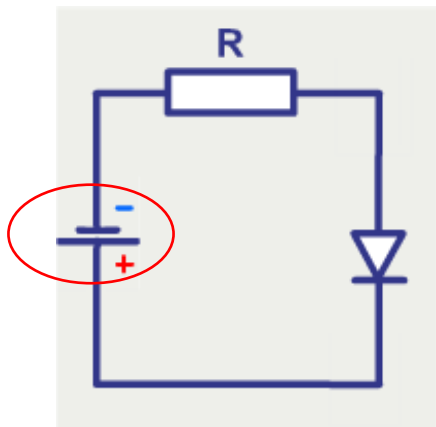


Увеличение на концентрацията на неосновните токоносители над равновесната на границата на PN прехода при право включване се нарича **инжекция**.

Инжекция има само при право включване.

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

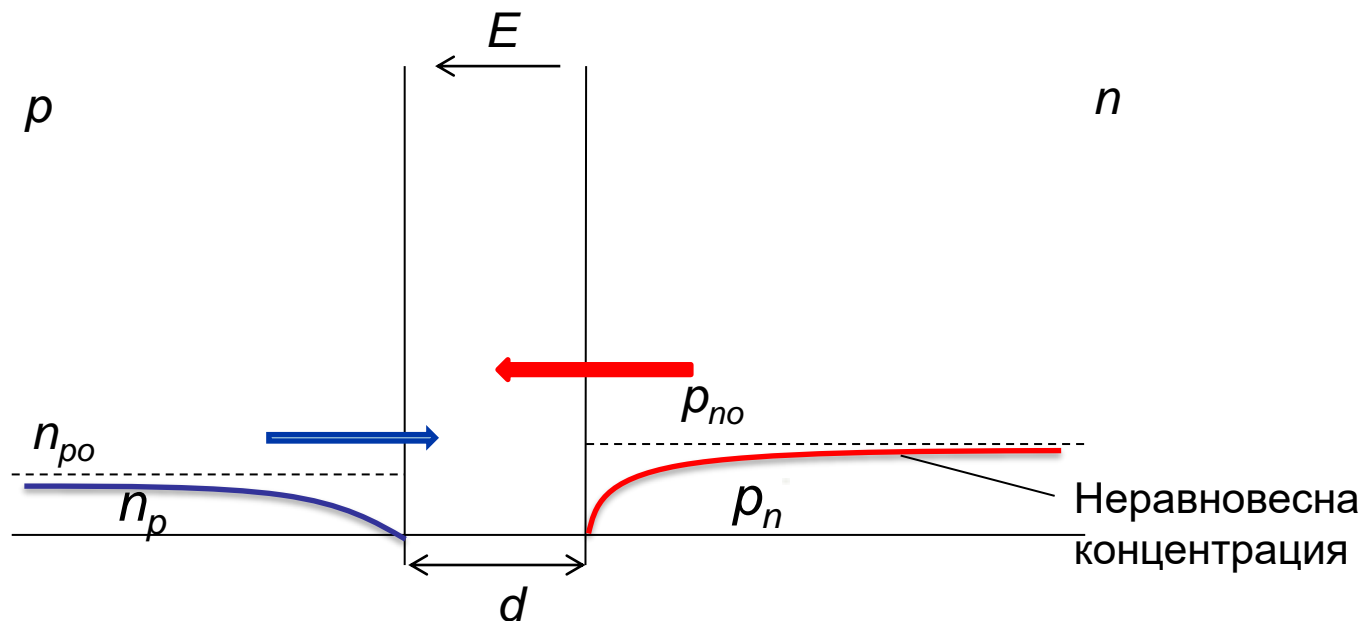
Обратно включване



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.

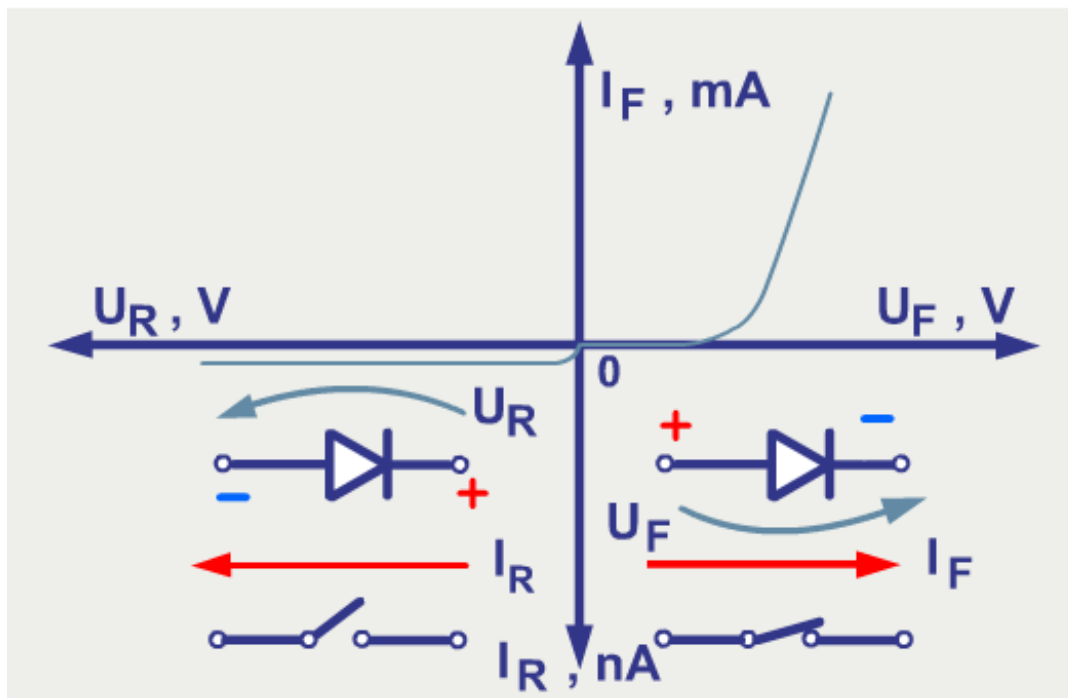
Екстракция на токоносители



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

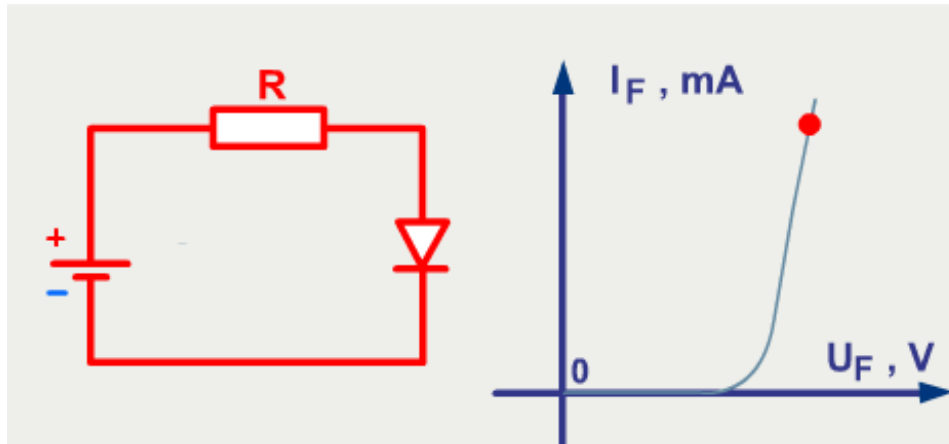
φ_T – Топлинен потенциал

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

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

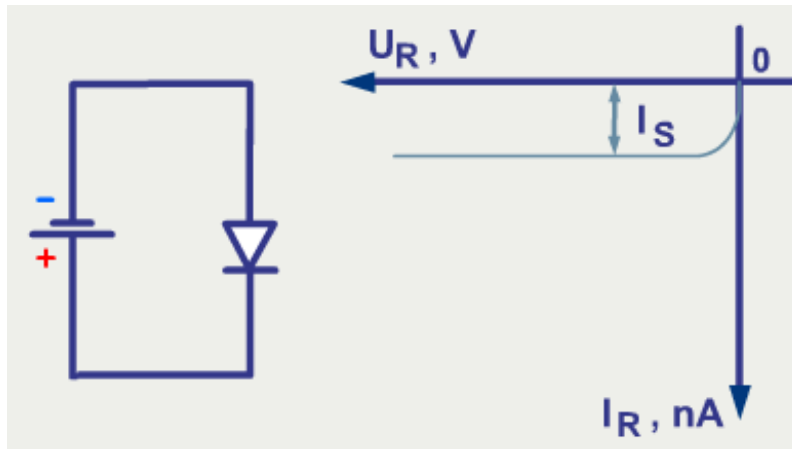
$$U = \varphi_T \ln \left(\frac{I}{I_s} + 1 \right)$$

Уравнение на идеализиран диод



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

Право включване

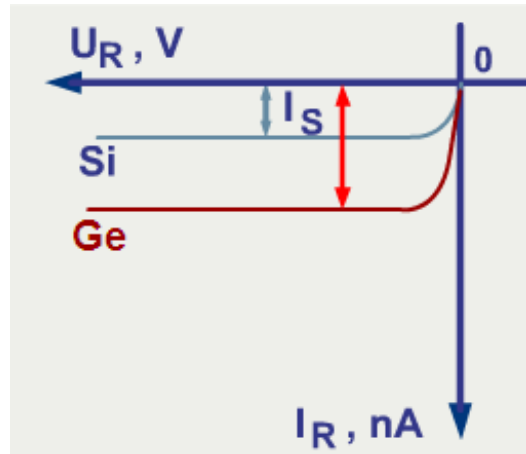


$$I = -I_s$$

Обратно включване

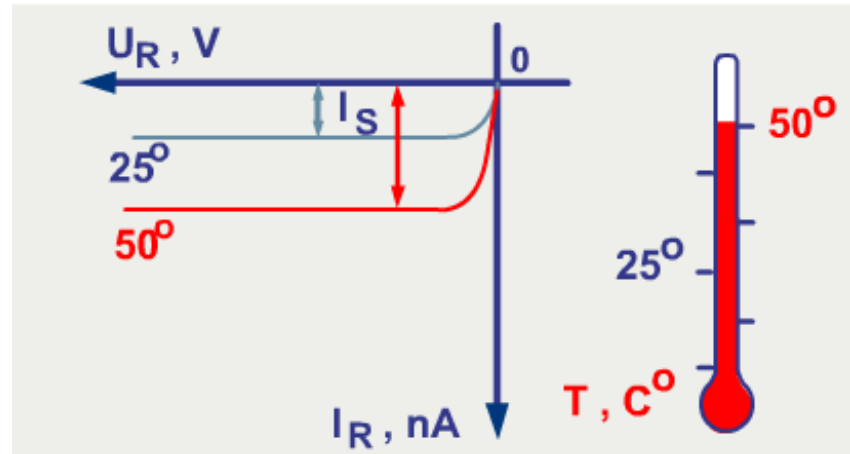
Ток на насищане

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



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

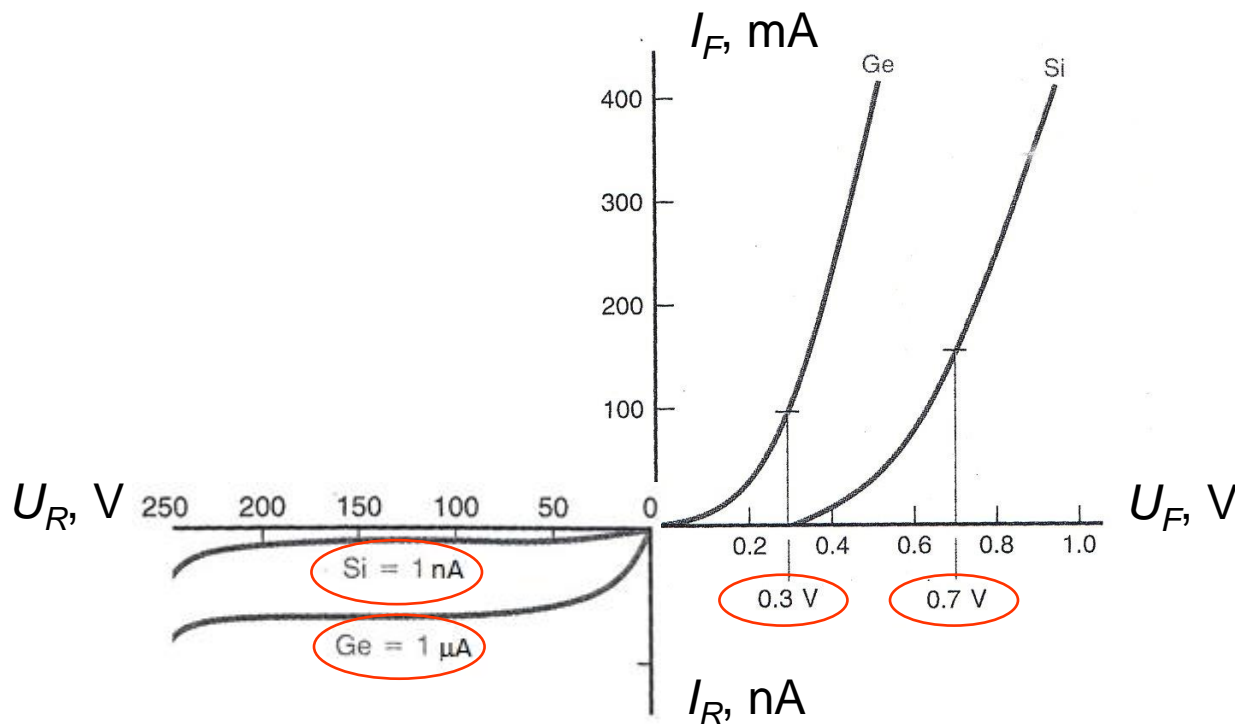
Si диоди имат много по-малко неосновни токоносители спрямо *Ge* диоди за същата температура поради по-широката си забранена зона.



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

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

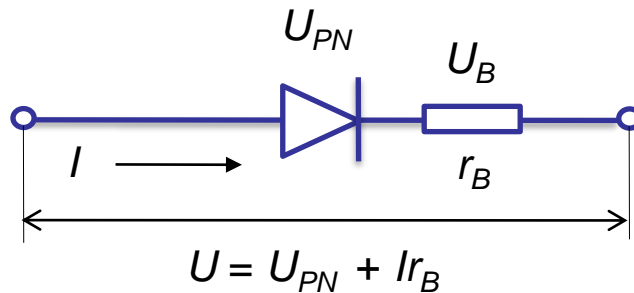
VA характеристики на Si и Ge диод



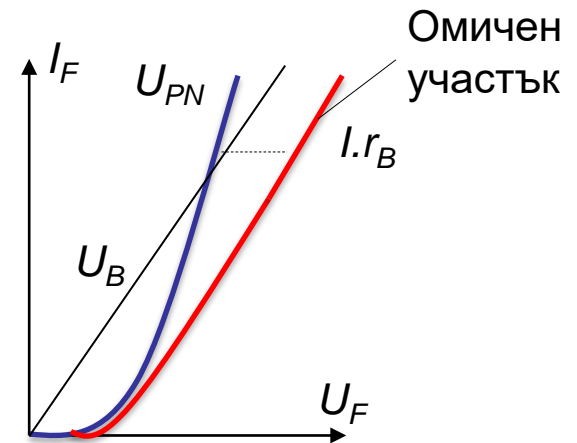
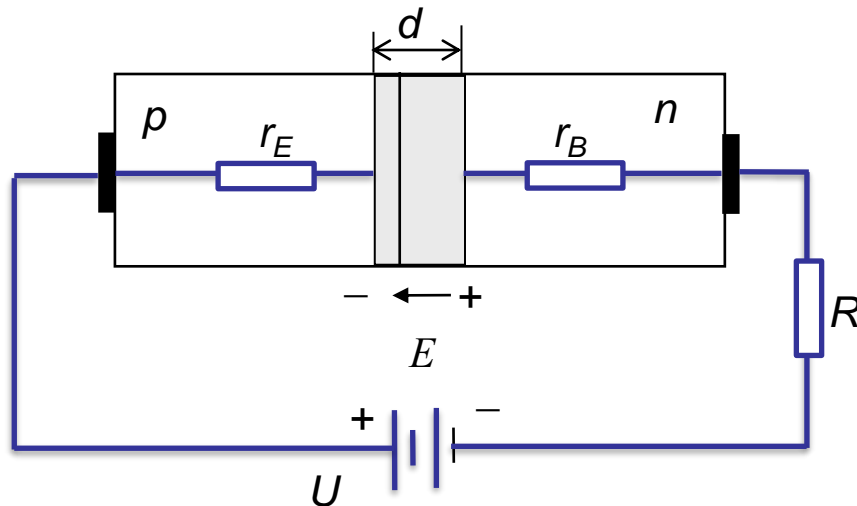
На значително по-малкия топлинен ток за силициеви диоди съответства по-голям пад в права посока. Падът на напрежение в права посока за Ge диоди е 0,3 – 0,4 V, докато за Si е 0,5 – 0,7 V.

Реален диод – право включване

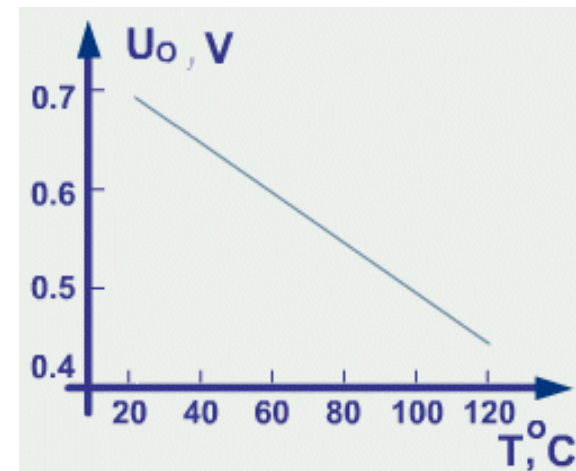
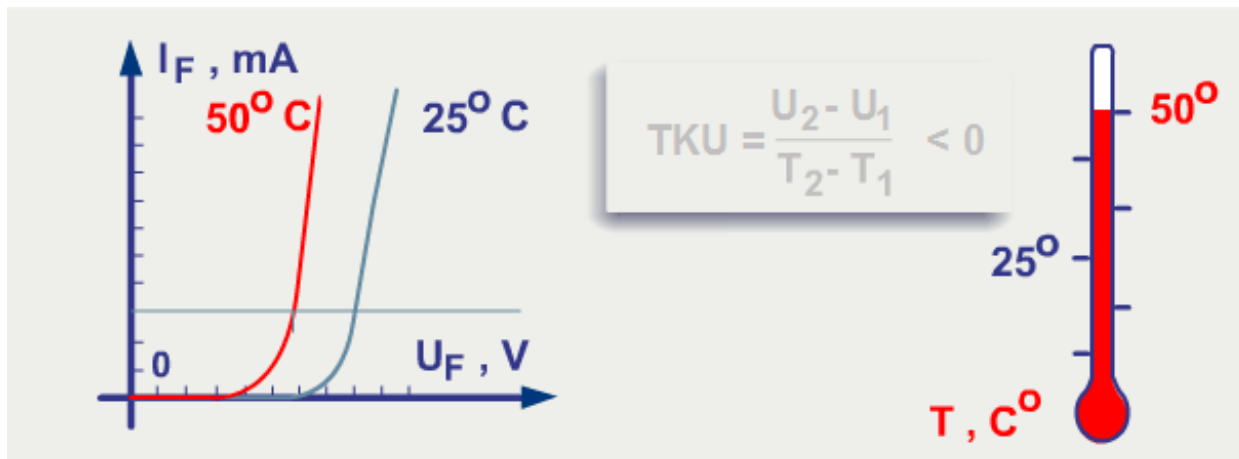
Отчитат се ток на рекомбинация, омичното съпротивление на базата и модулация на това съпротивление от тока $r_B = f(I)$.



$$I = I_S (e^{\frac{U - Ir_B}{m\varphi_T}} - 1)$$



Влияние на температурата



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

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

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 $T_{j\max} < T_i$, където $n = p = n_i$
- ✚ Максимална мощност $P_{j\max}$

$P = UI$ Мощност в прехода

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

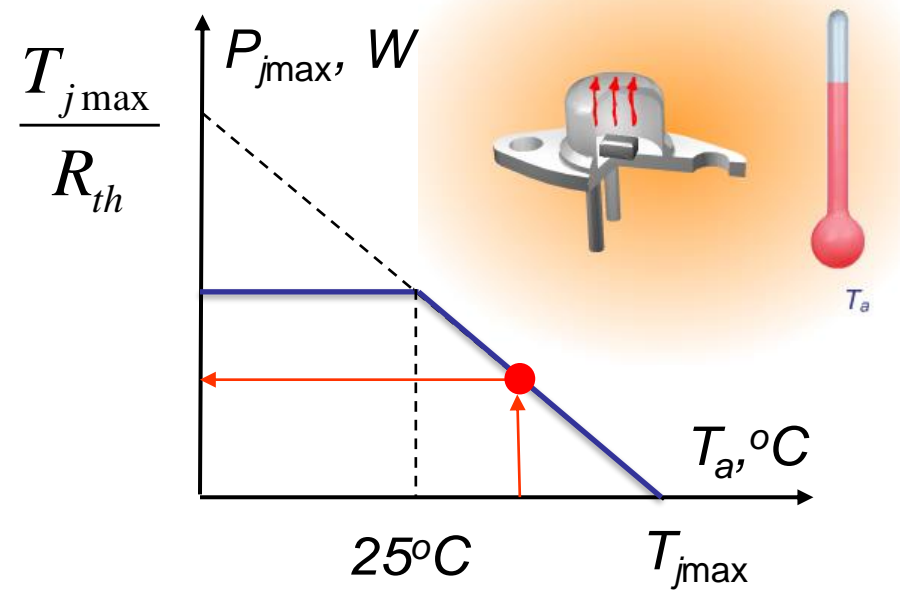
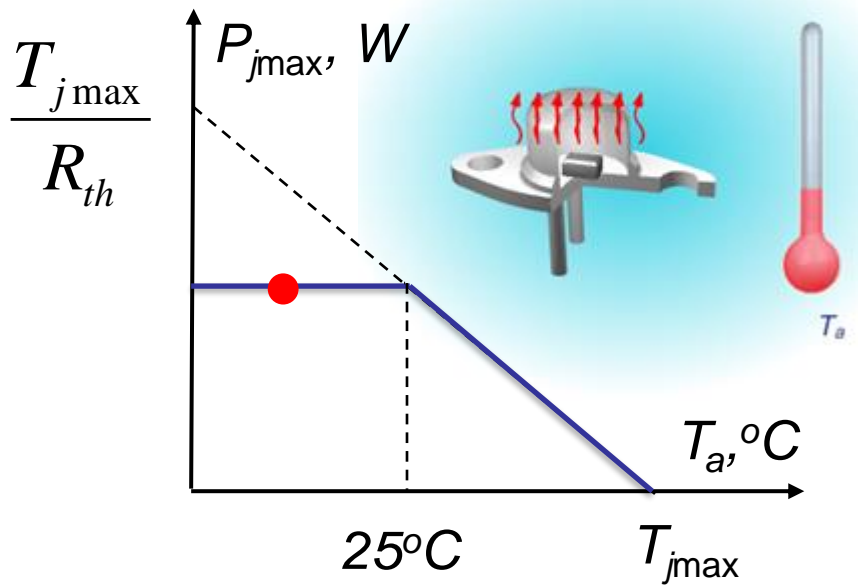
$$UI = \frac{T_j - T_a}{R_{th}}$$

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

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

Max мощность & Температура

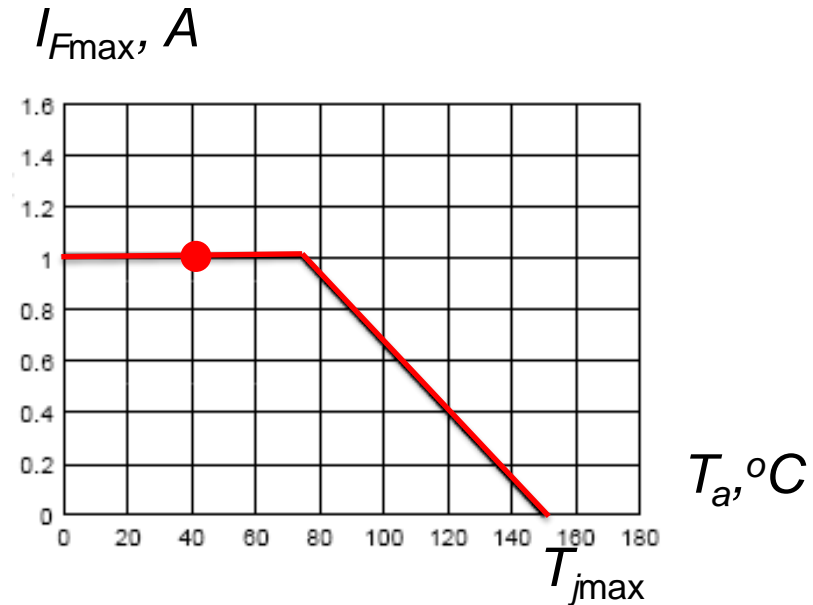
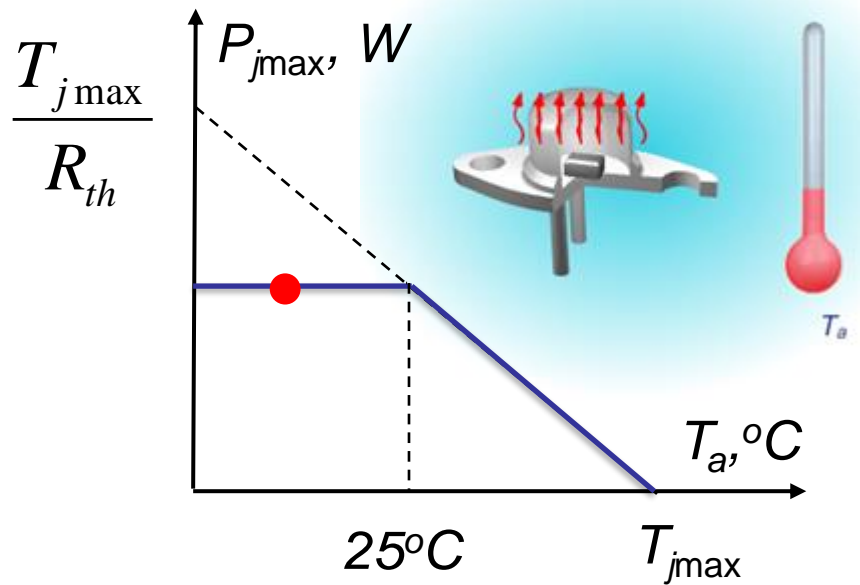
$$P_{\max} = -\frac{1}{R_{th}} T_a + \frac{1}{R_{th}} T_{j\max}$$



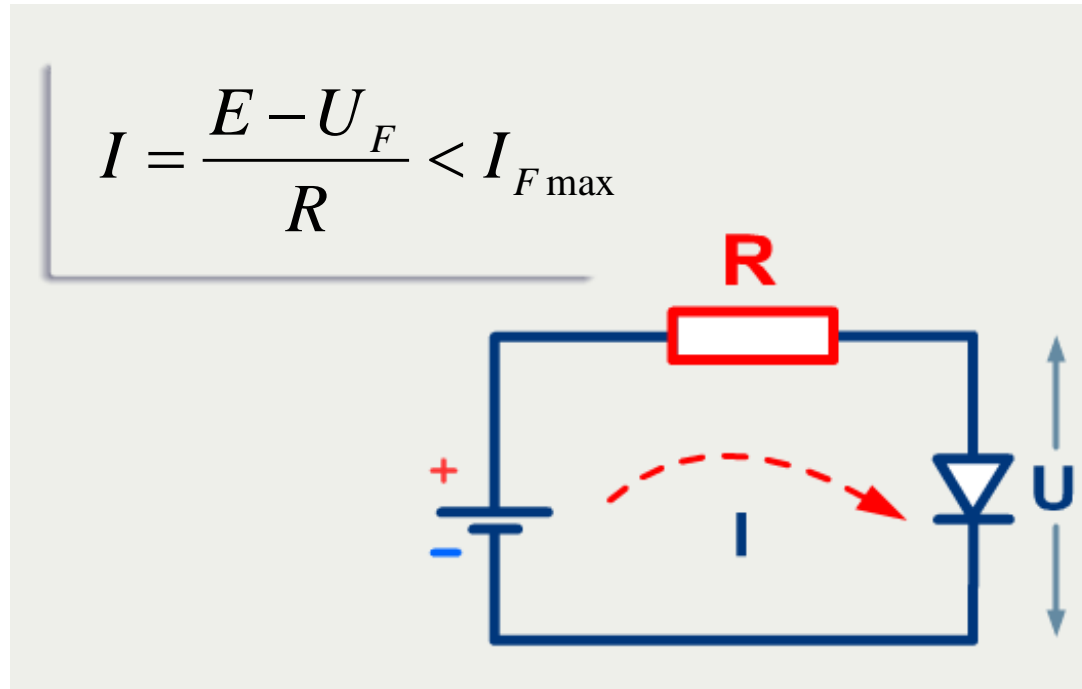
Max мощность & Max ток

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

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



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.

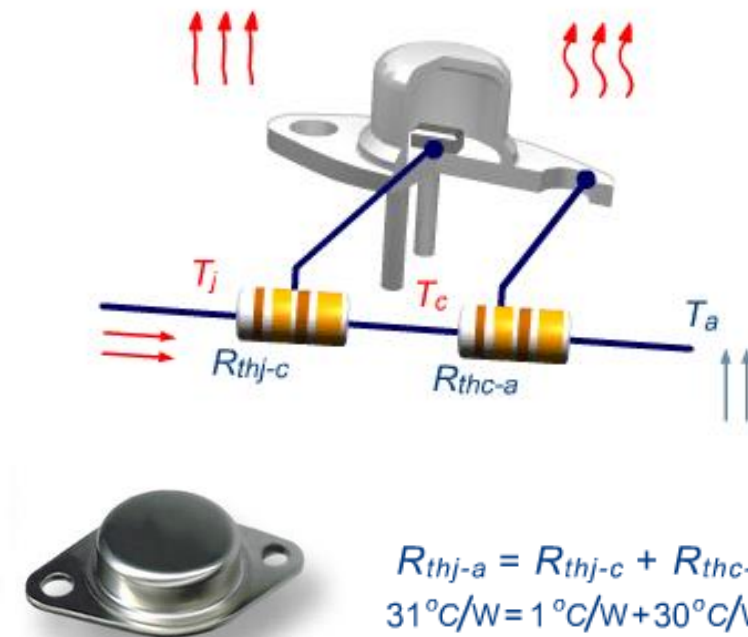
$$R_{th} = R_{th_{jc}} + R_{th_{ca}} \quad R_{th_{ca}} \gg R_{th_{jc}}$$

Преход – Корпус –
корпус околна среда



Средномощен транзистор

$$R_{thj-a} = R_{thj-c} + R_{thc-a}$$
$$62^{\circ}\text{C/W} = 2^{\circ}\text{C/W} + 60^{\circ}\text{C/W}$$

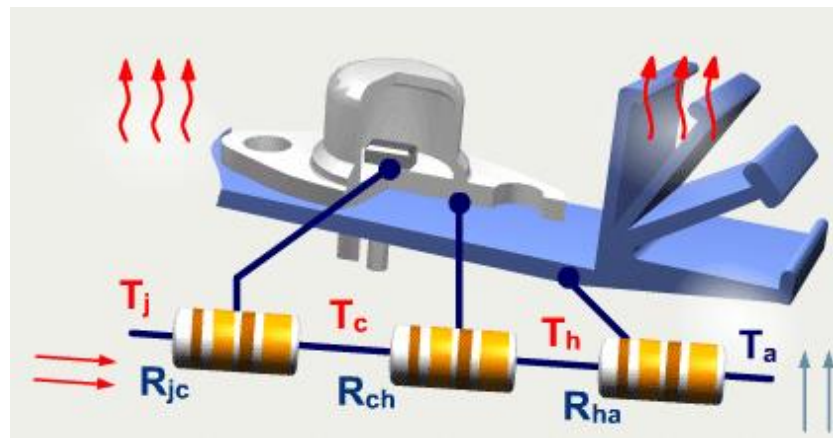
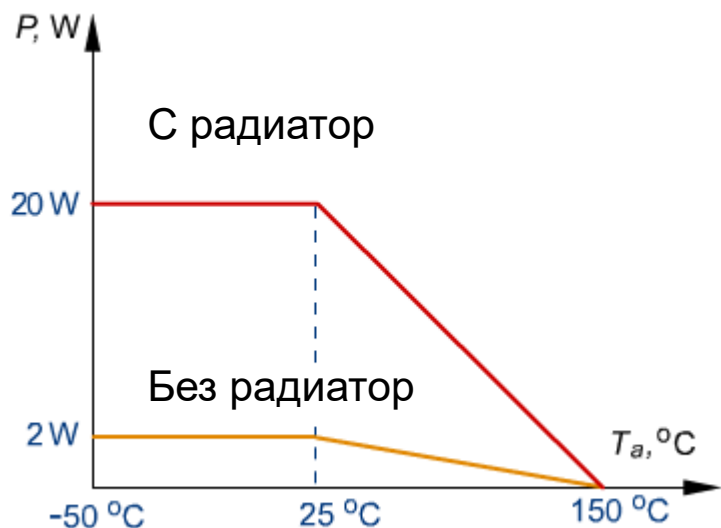


Мощен транзистор

$$R_{thj-a} = R_{thj-c} + R_{thc-a}$$
$$31^{\circ}\text{C/W} = 1^{\circ}\text{C/W} + 30^{\circ}\text{C/W}$$

Отвеждане на топлината

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



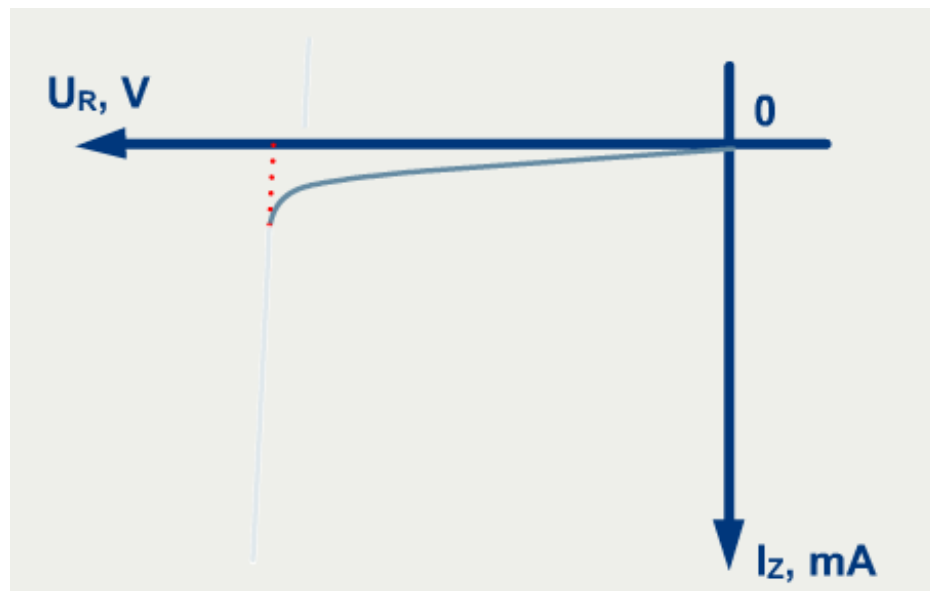
Топлинното съпротивление може да се намали с помощта на радиатор. Той представлява метална конструкция с голяма площ, която спомага по-лесното отвеждане на топлината. При наличие на радиатор общото топлинно съпротивление намалява, защото се увеличават пътищата за разсейване на топлината.

Пробив

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

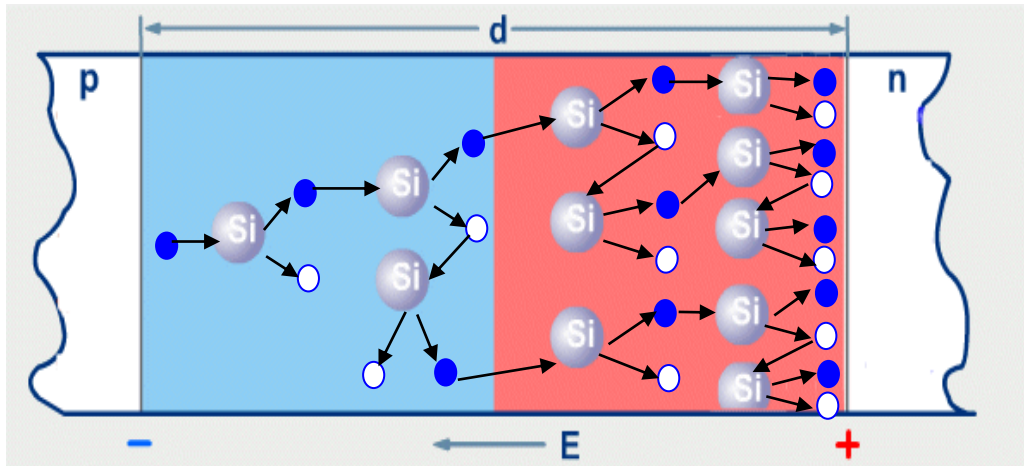
Според механизма на пробив се различават:

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



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

Лавинен пробив

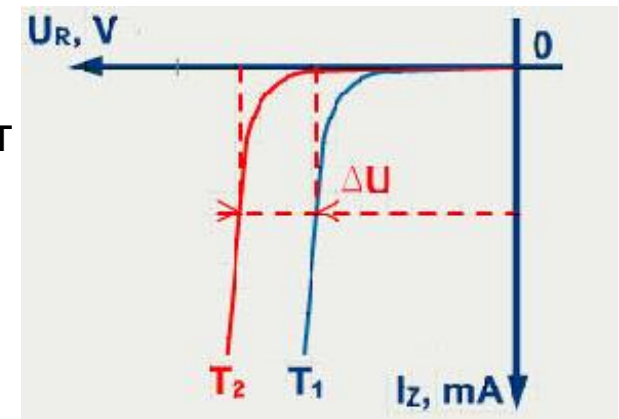


Неосновните токоносители, ускорени от полето, при сблъсък с атомите ги йонизират и се създават електрон и дупка. Процесът продължава лавинообразно, причинявайки рязко нарастване на тока.

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

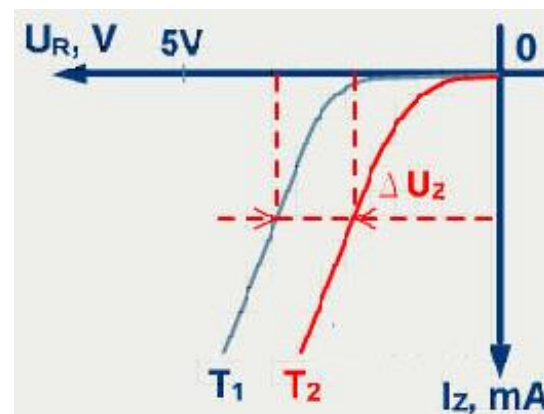
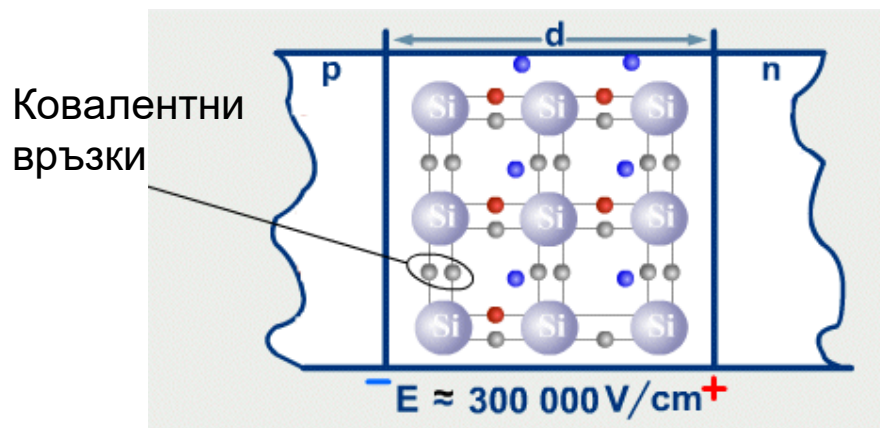
$$U_{BR} > 7V$$

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



Влияние на температурата

Ценеров пробив



Влияние на температурата

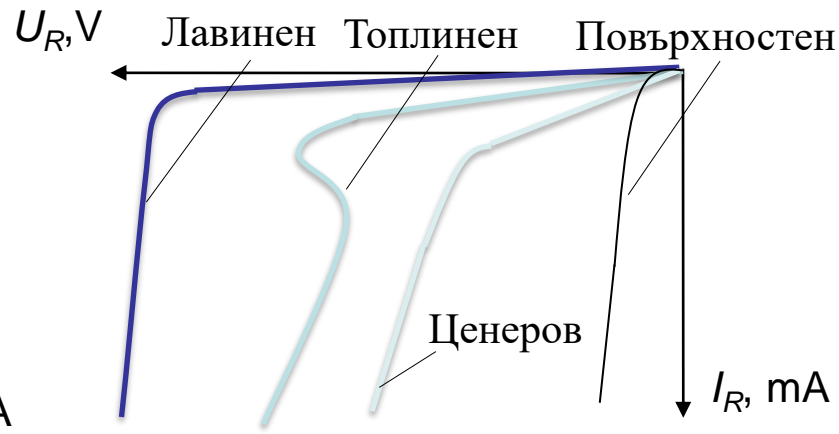
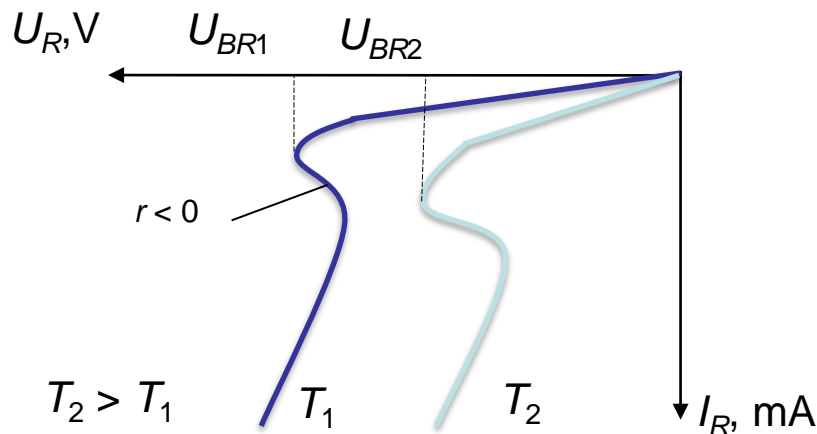
При достатъчно голямо електрическо поле се разкъсват ковалентни връзки и се създават допълнителни електрони и дупки – Ценеров ефект. Изискват се стойности на полето от порядъка на 300 000 V/cm.

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

Топлинен пробив

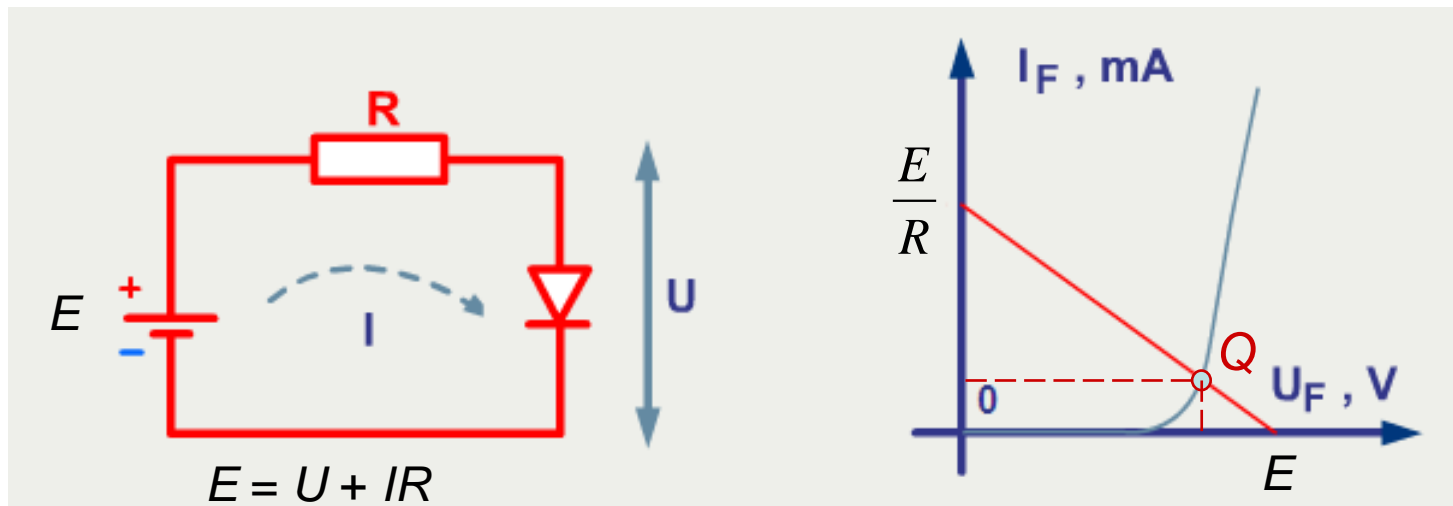
Този пробив настъпва, ако

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

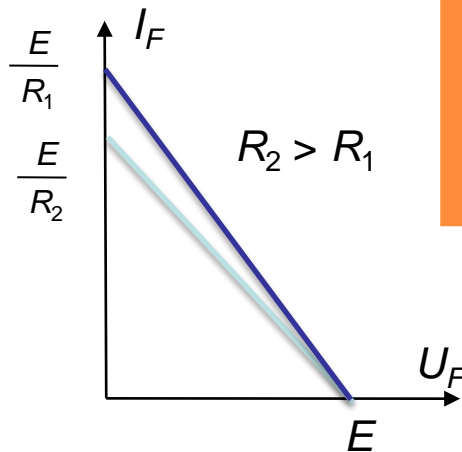
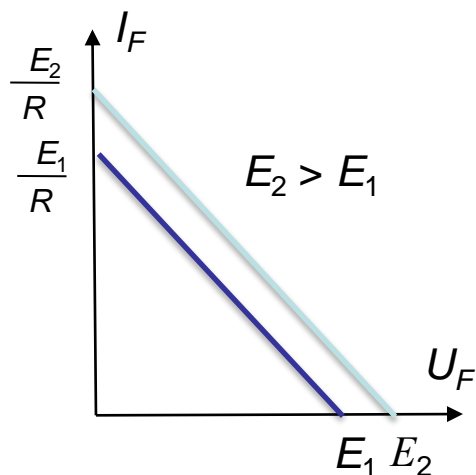


Топлинният е **необратим** и довежда до разрушаване на диода. С увеличаване на околната температура пробивът настъпва при по-ниско напрежение, защото нараства обратният ток и се влошават условията за охлаждане

Товарна права и работна точка



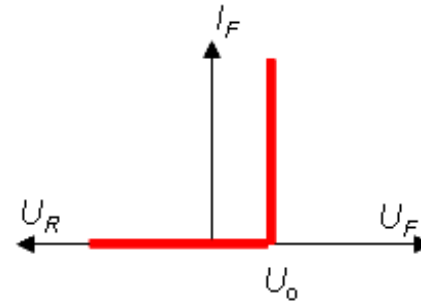
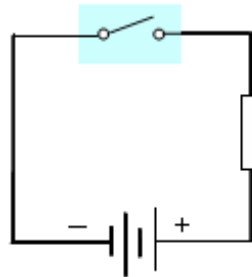
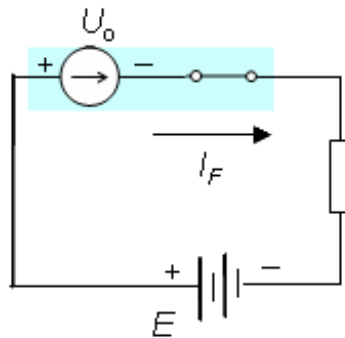
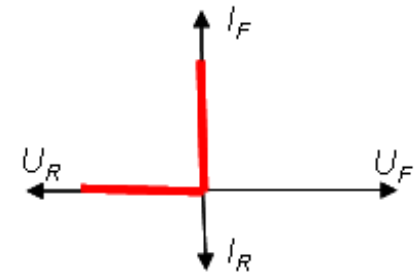
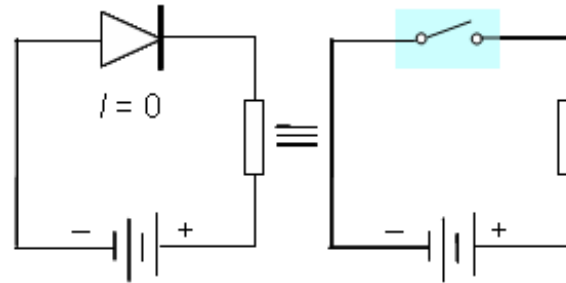
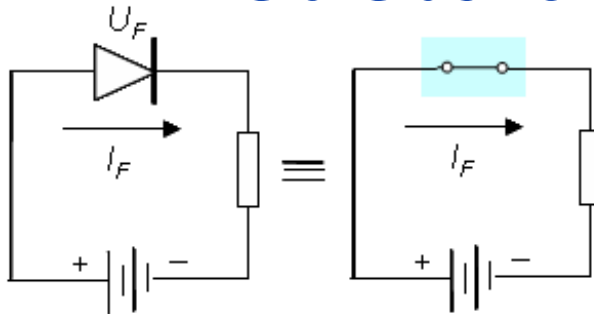
$$R_Q = \frac{U_Q}{I_Q}$$



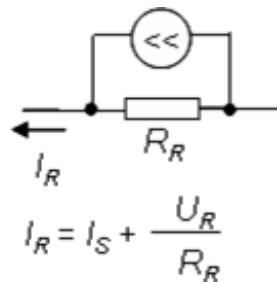
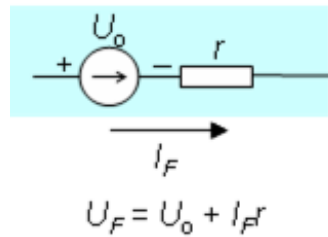
$$I = -\frac{1}{R}U + \frac{E}{R}$$

Зависимост от захранването и товарното съпротивление

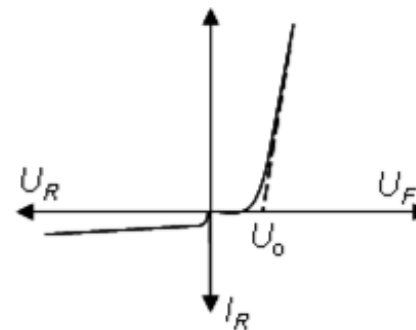
Еквивалентни схеми по ток



Прагов модел

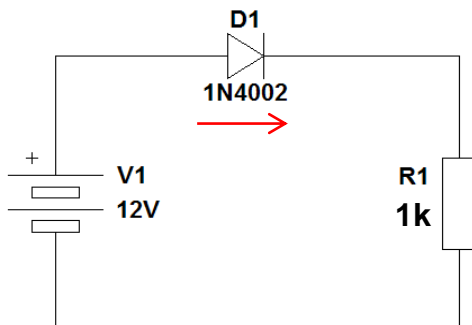


...

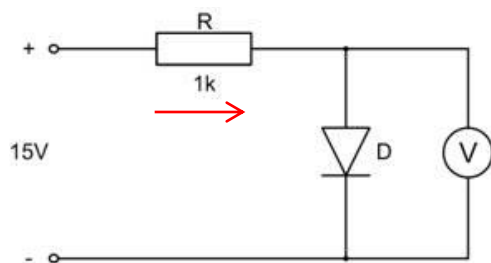


Линеализиран модел

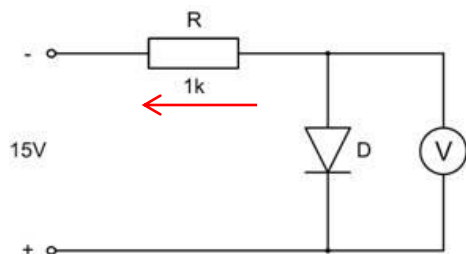
Примери



Начертайте VA характеристика за Si диод. Постройте товарната права за схемата. Изчислете стойностите на тока и напрежението в работната точка и ги означете на характеристиката.

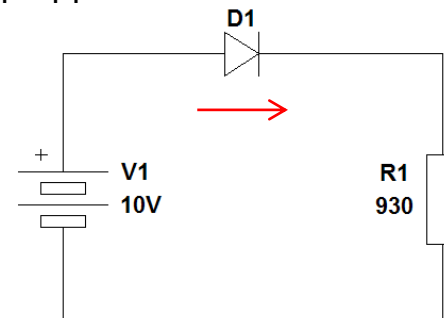


Какво ще е показанието на волтметъра, ако диодът е от Si? Какъв ток тече през диода? Постройте товарната права и означете работната точка. Използвайте прагов модел на диода.

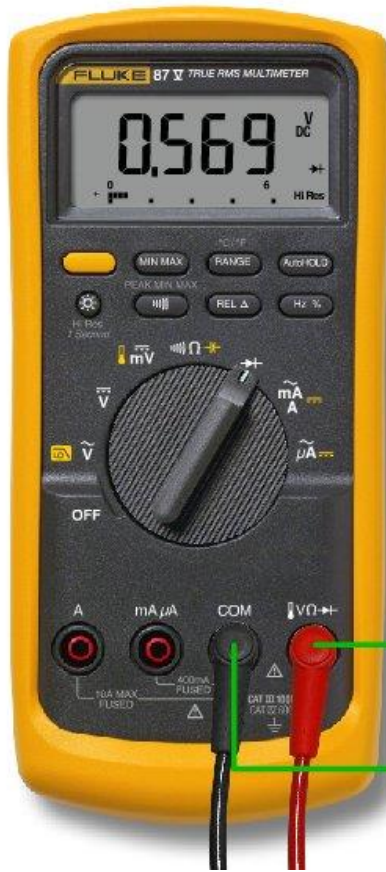


Какво ще е показанието на волтметъра, ако диодът е от германий? Какъв ток тече през диода? Постройте товарната права и означете работната точка. Използвайте прагов модел на диода.

Изчислете отделената мощност върху Si диод от схемата.



Тестване на диода



Право включване



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



„OL” означава
отворена верига

Обратно включване