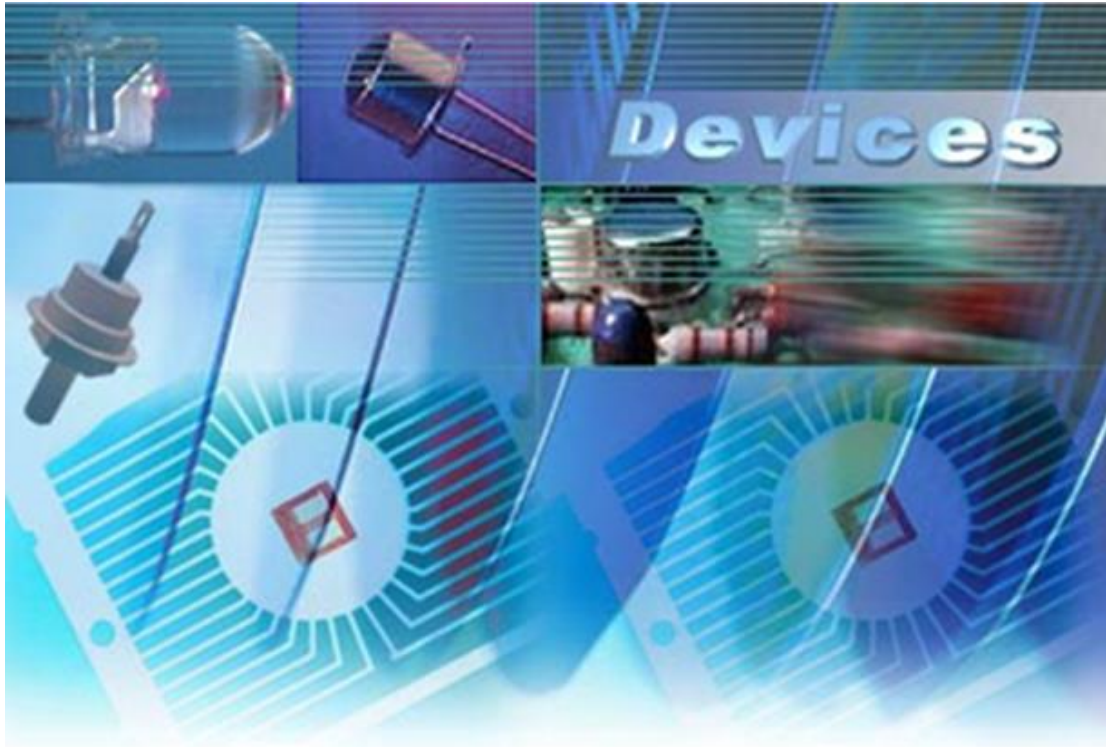




# *Полупроводников диод*

## *Работа по постоянен ток*

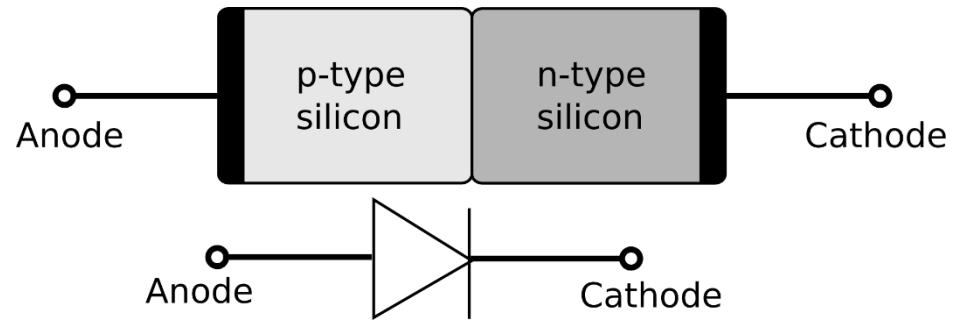


Полупроводникови  
елементи

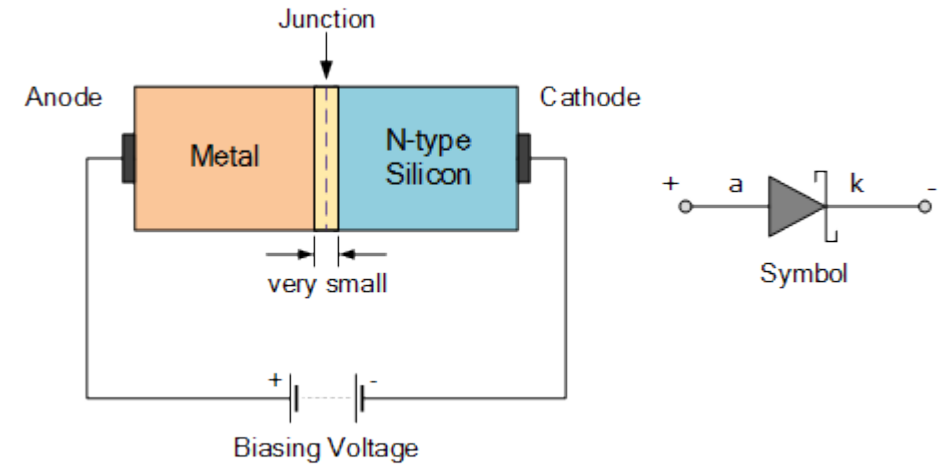
# Приложение

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

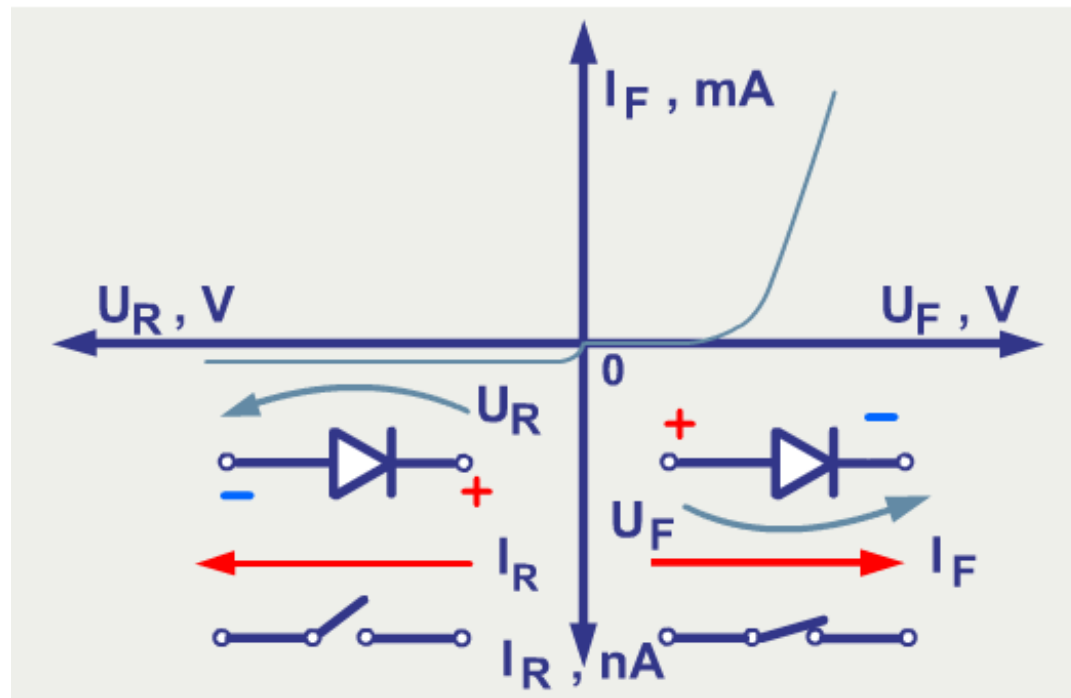
## PN-junction Diode



## Schottky Diode



# 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

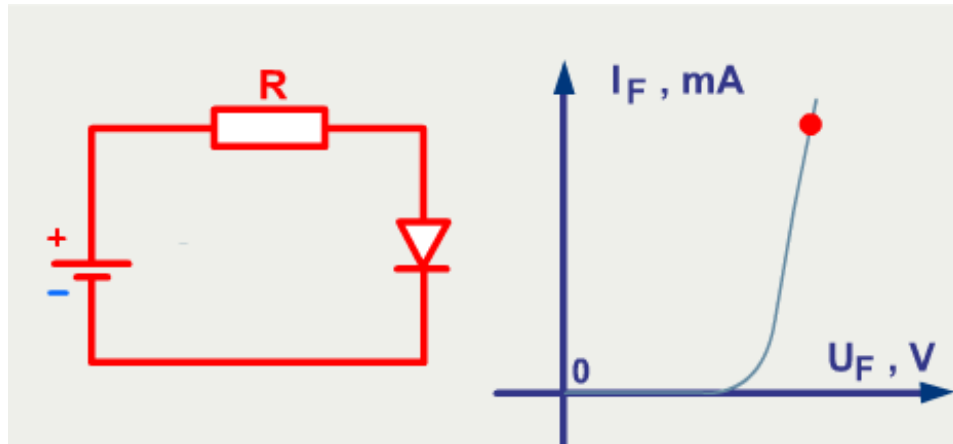
$S$  – Площ на прехода

$\varphi_T$  – Топлинен потенциал

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

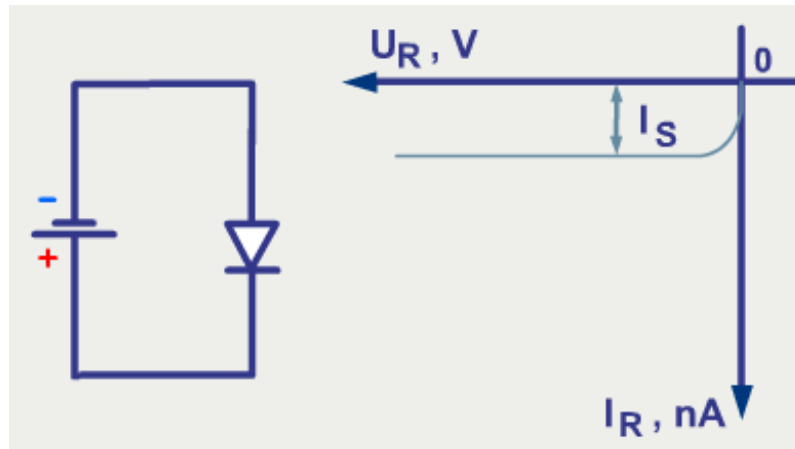
$$U = \varphi_T \ln \left( \frac{I}{I_s} + 1 \right)$$

# Уравнение на идеализиран диод



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

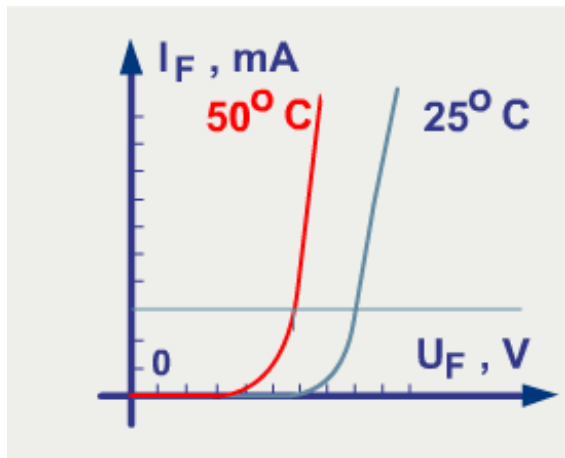
Право включване



$$I = -I_s$$

Обратно включване

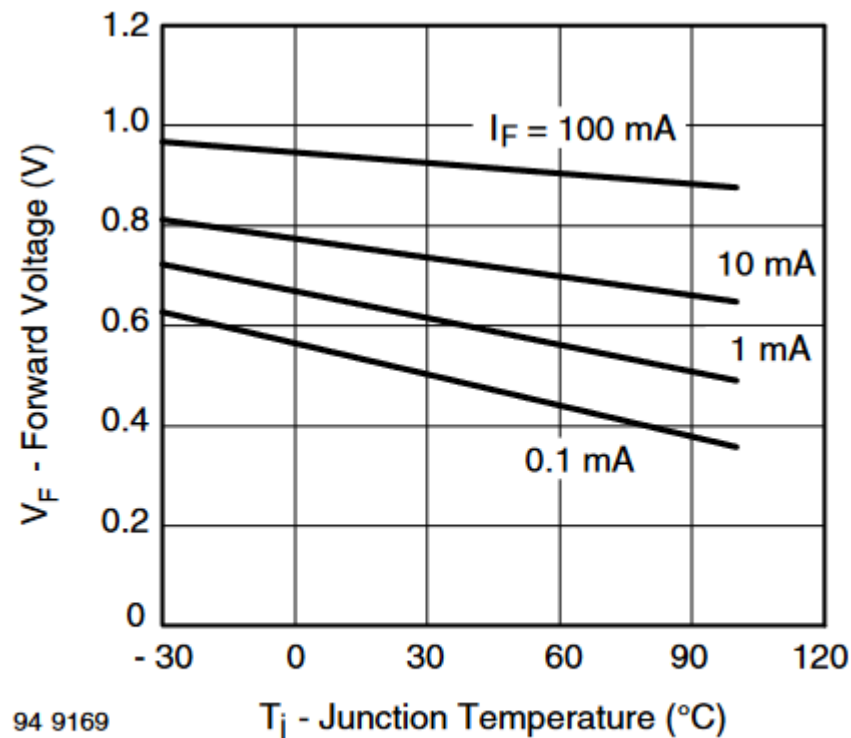
# Влияние на температурата



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

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

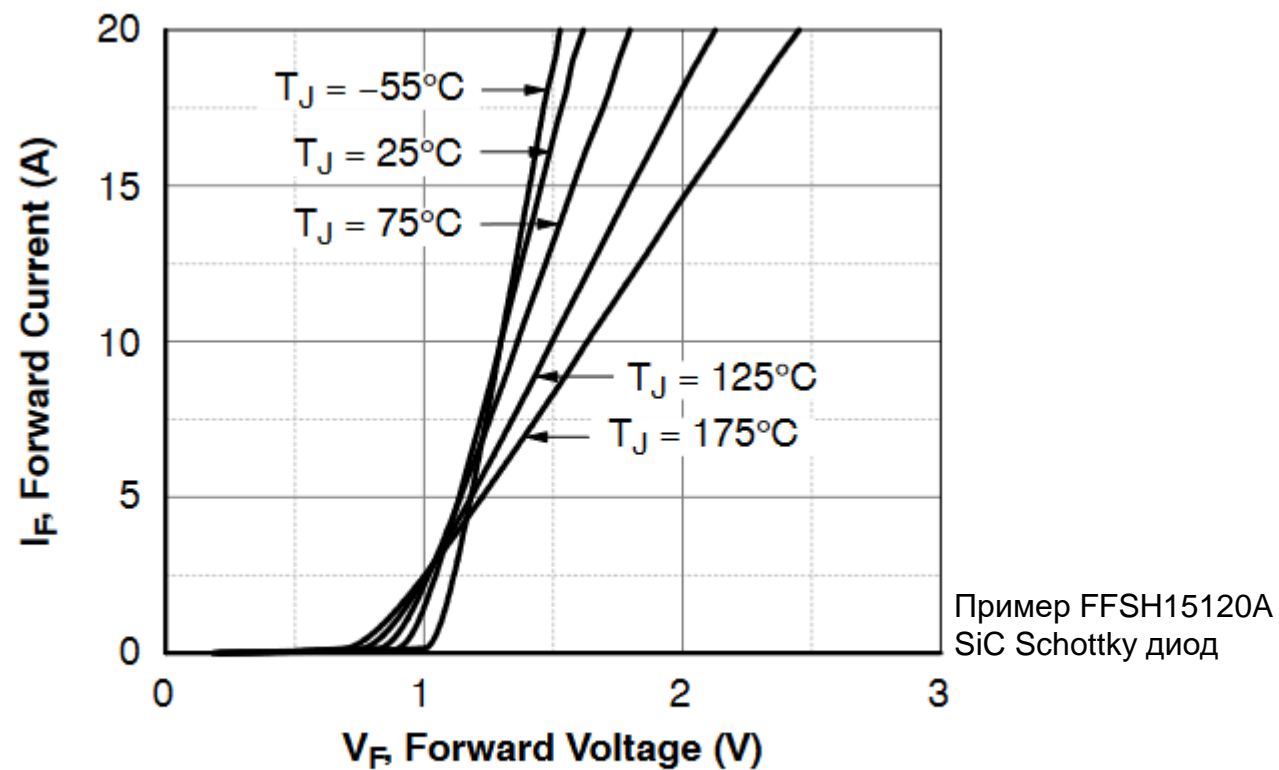
**Большинството** диоди имат **отрицателен температурен коефициент** на напрежението – т.е.  $U_F$  намалява с увеличение на температурата (при постоянен ток).



Пример 1N4148  
Si PN диод

Fig. 1 - Forward Voltage vs. Junction Temperature

# Влияние на температурата

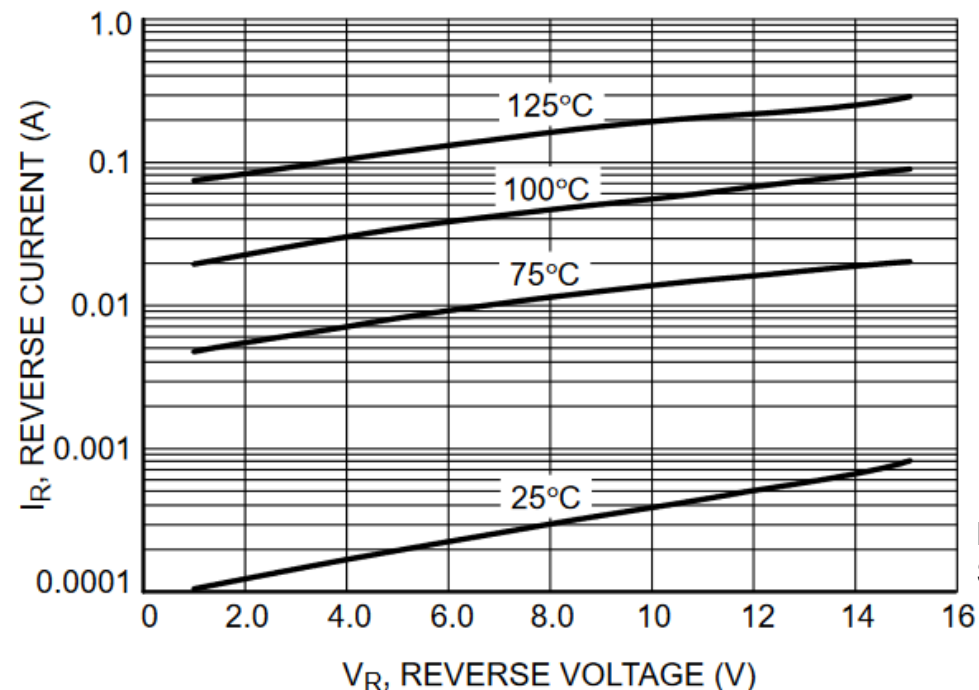
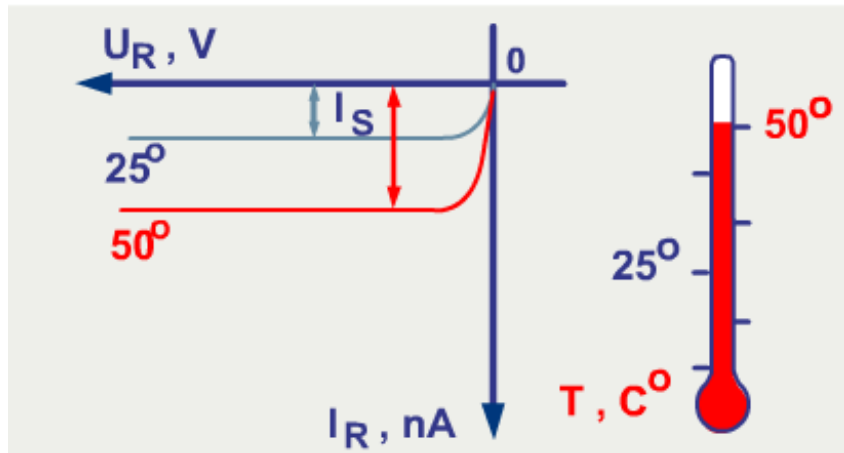


**Figure 1. Forward Characteristics**

Изключение правят SiC диодите с преход на Шотки, които имат положителен темп. коефициент.



# Влияние на температурата



Пример MBR4015CTLG  
Si Schottky диод

Figure 3. Typical Reverse Current

$I_S$  се удвоява на всеки  $10^\circ\text{C}$  увеличение на температурата.

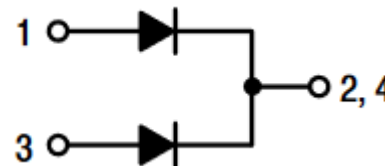
Тъй като обратният ток се формира от топлинно генерирани неосновни токоносители, той силно зависи от изменението на температурата.

# Максимално допусими параметри

## MAXIMUM RATINGS

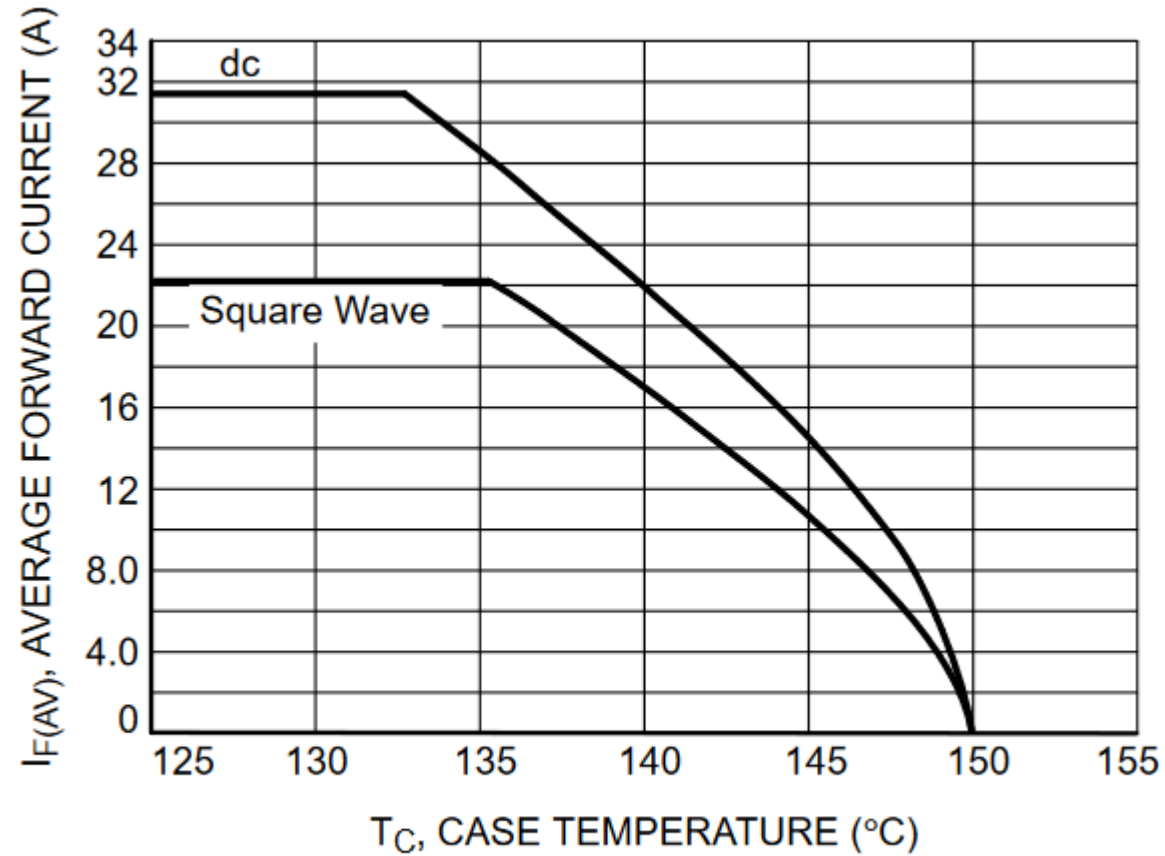
Rating	Symbol	Value	Unit
Peak Repetitive Reverse Voltage Working Peak Reverse Voltage DC Blocking Voltage	$V_{RRM}$ $V_{RWM}$ $V_R$	15	V
Average Rectified Forward Current ( $T_C = 140^\circ\text{C}$ per Diode) ( $T_C = 140^\circ\text{C}$ per Device)	$I_{F(AV)}$	20 40	A
Peak Repetitive Forward Current, per Diode (Square Wave, 20 kHz, $T_C = 135^\circ\text{C}$ )	$I_{FRM}$	40	A
Non-Repetitive Peak Surge Current (Surge Applied at Rated Load Conditions, Halfwave, Single Phase, 60 Hz)	$I_{FSM}$	150	A
Peak Repetitive Reverse Surge Current (2.0 $\mu\text{s}$ , 1.0 kHz)	$I_{RRM}$	1.0	A
Storage Temperature Range	$T_{stg}$	-65 to +175	$^\circ\text{C}$
Operating Junction Temperature (Note 1)	$T_J$	-65 to +150	$^\circ\text{C}$
Voltage Rate of Change (Rated $V_R$ )	$dv/dt$	1,000	V/ $\mu\text{s}$

Stresses exceeding those listed in the Maximum Ratings table may damage the device. If any of these limits are exceeded, device functionality should not be assumed, damage may occur and reliability may be affected.



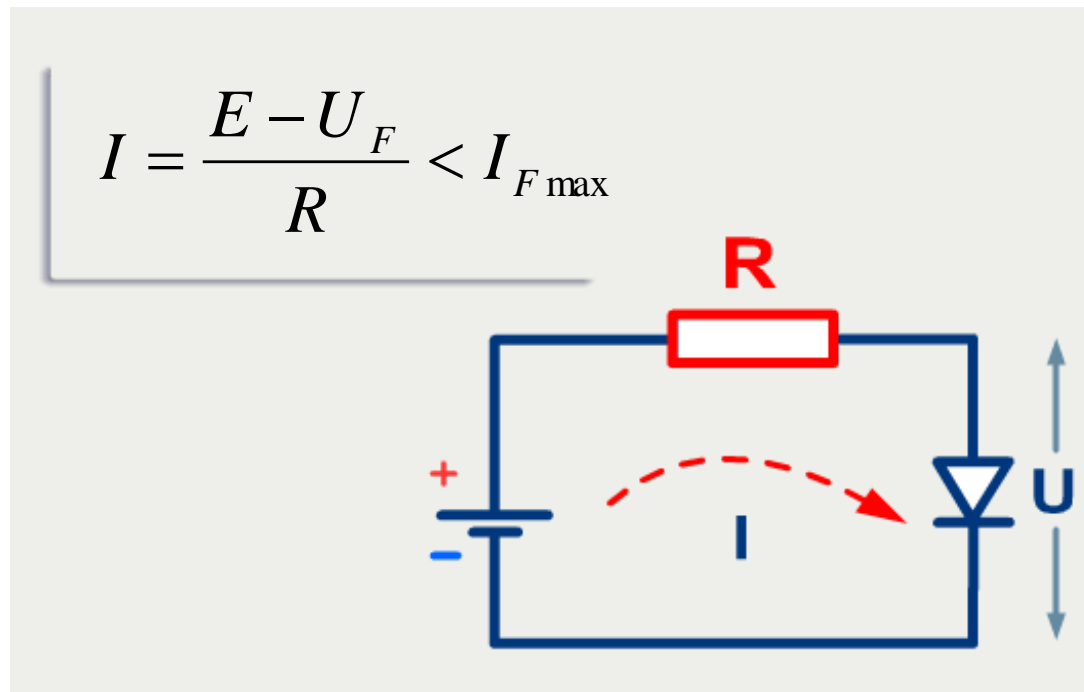
Пример MBR4015CTLG  
Si Schottky диод

$$IF_{max} = f(T)$$



**Figure 4. Current Derating, Case, Per Leg**

# 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 влючване 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.

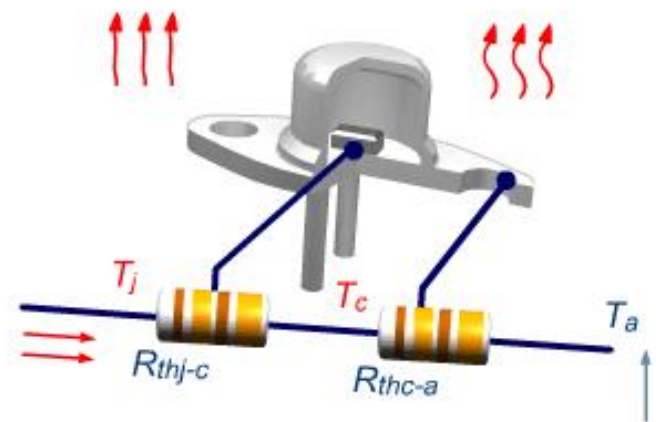
$$R_{th} = R_{thjc} + R_{thca} \quad R_{thca} \gg R_{thjc}$$

Преход – Корпус –  
корпус      околна среда



Средномощен транзистор

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

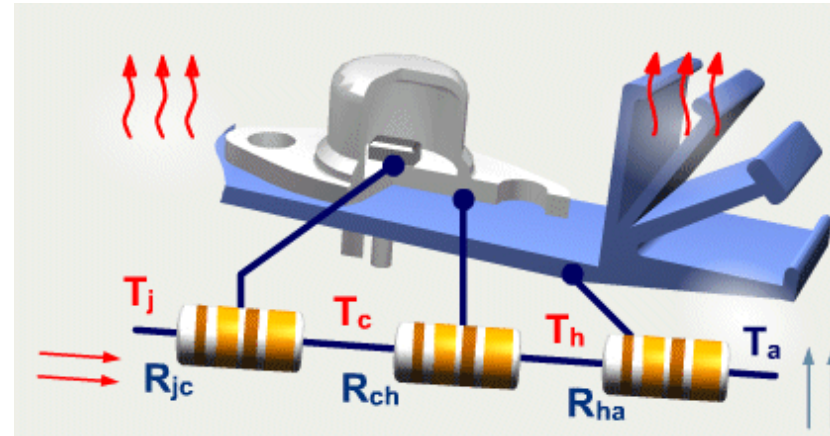
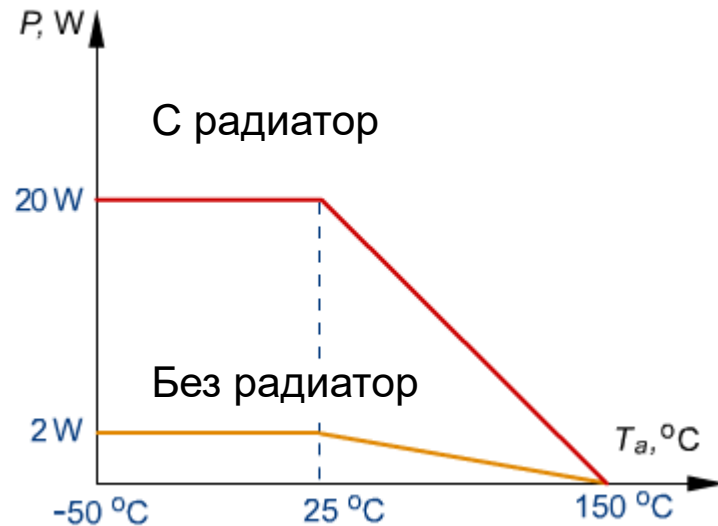


Мощен транзистор

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

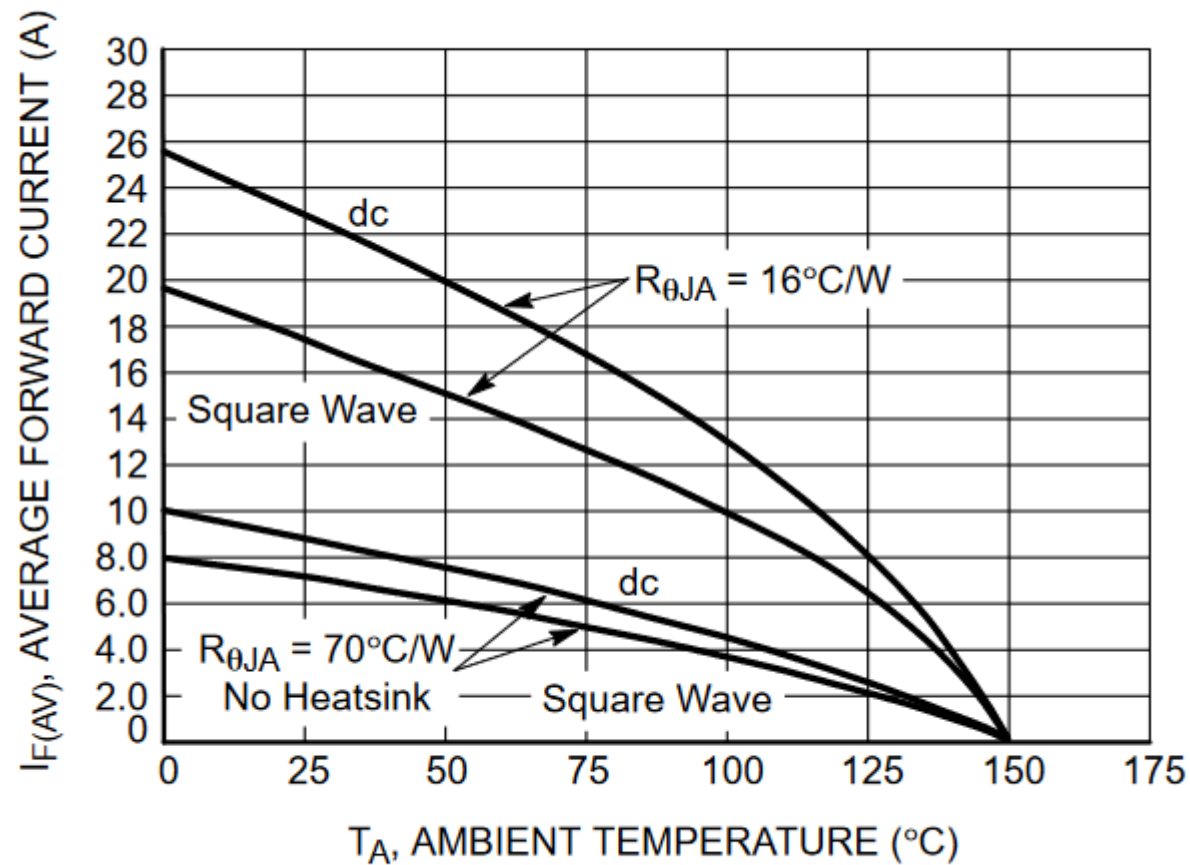
# Отвеждане на топлината

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



Топлинното съпротивление може да се намали с помощтта 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.



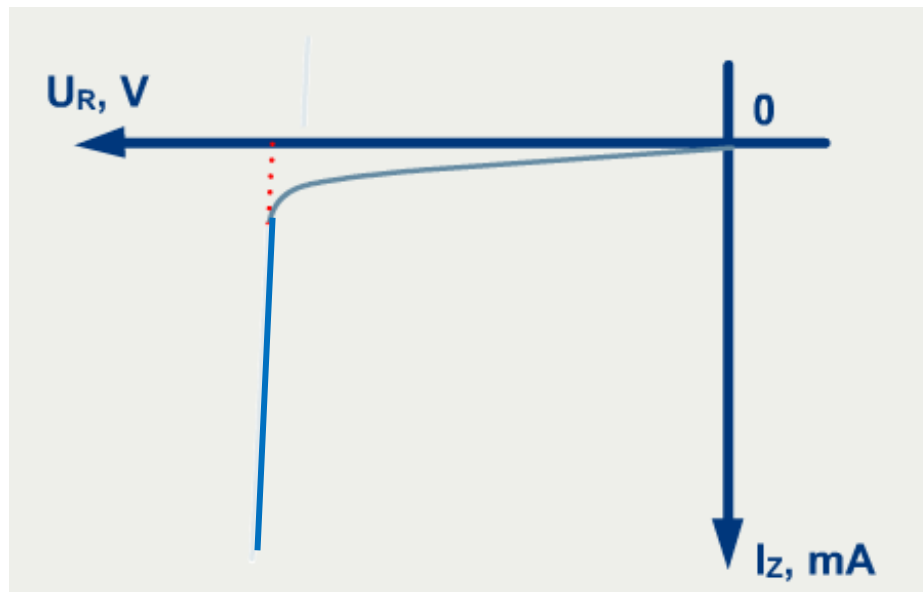
**Figure 5. Current Derating, Ambient, Per Leg**

# Пробив

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

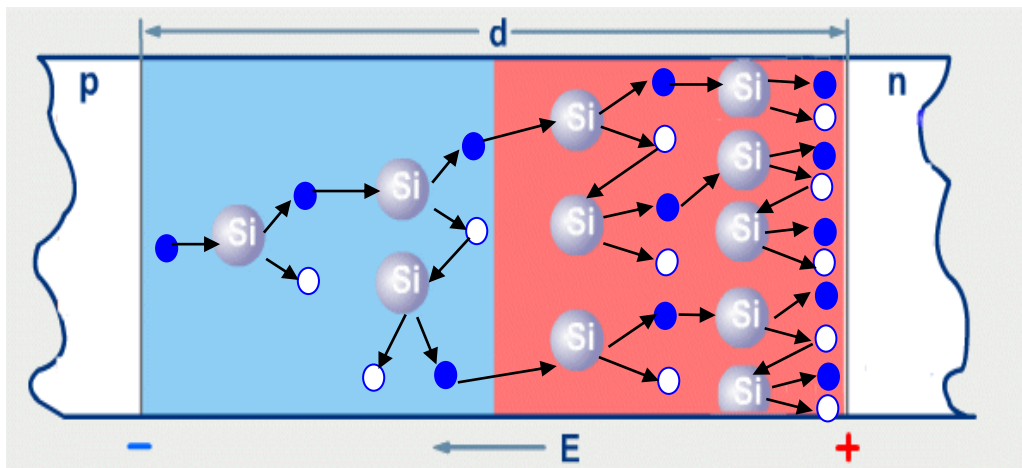
Според механизма на пробив се различават:

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





# Лавинен пробив

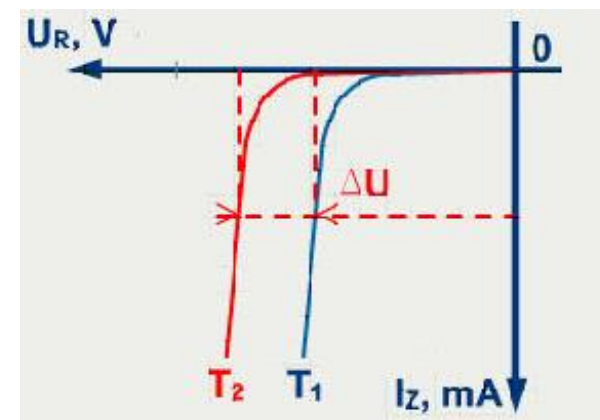


Неосновните токоносители, ускорени от полето, при сблъсък с атомите ги йонизират и се създават електрон и дупка. Процесът продължава лавинообразно, причинявайки рязко нарастване на тока.

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

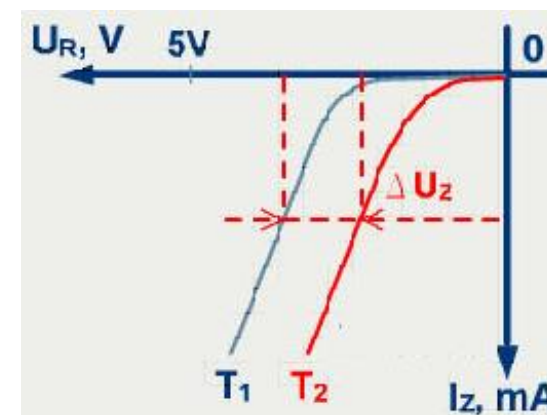
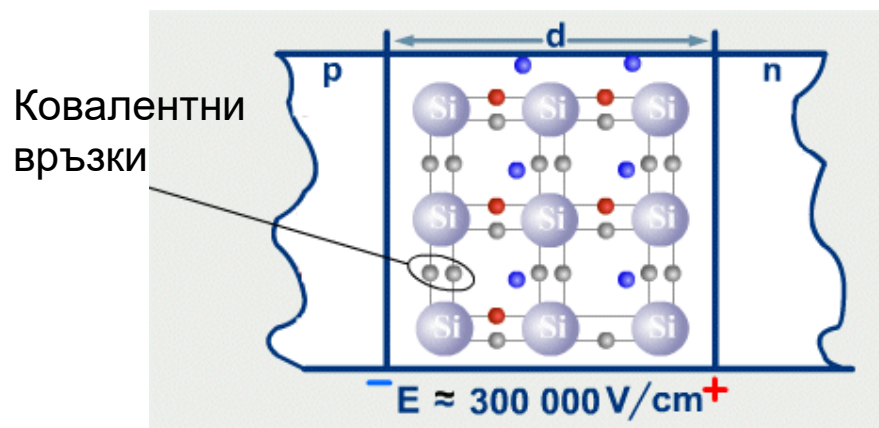
$$U_{BR} > 7V$$

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



Влияние на температурата

# Ценеров пробив



Влияние на температурата

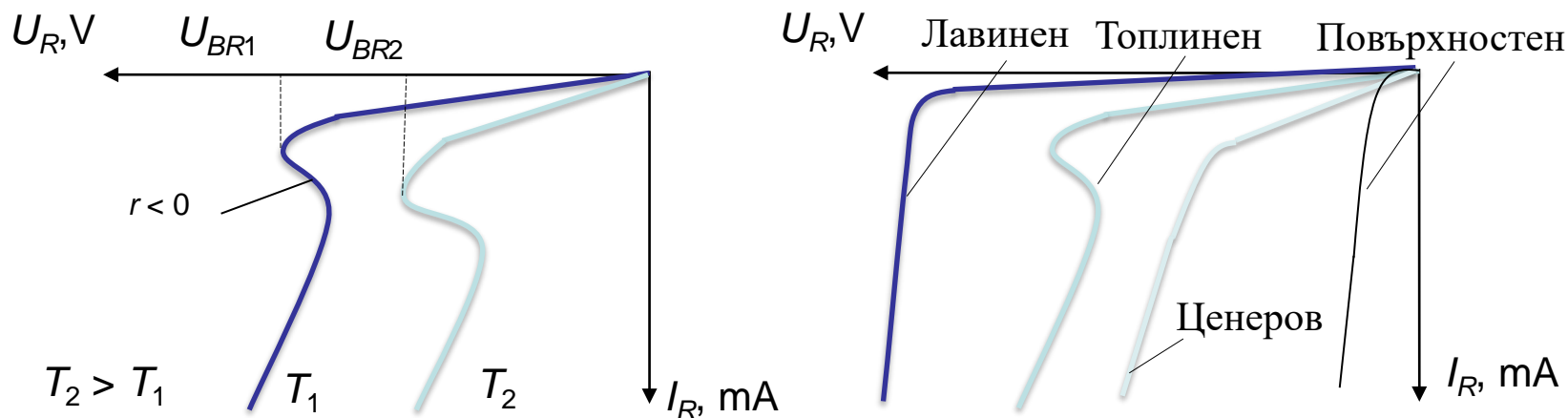
При достатъчно голямо електрическо поле се разкъсват ковалентни връзки и се създават допълнителни електрони и дупки – Ценеров ефект. Изискват се стойности на полето от порядъка на  $300\,000\text{ V/cm}$ .

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

# Топлинен пробив

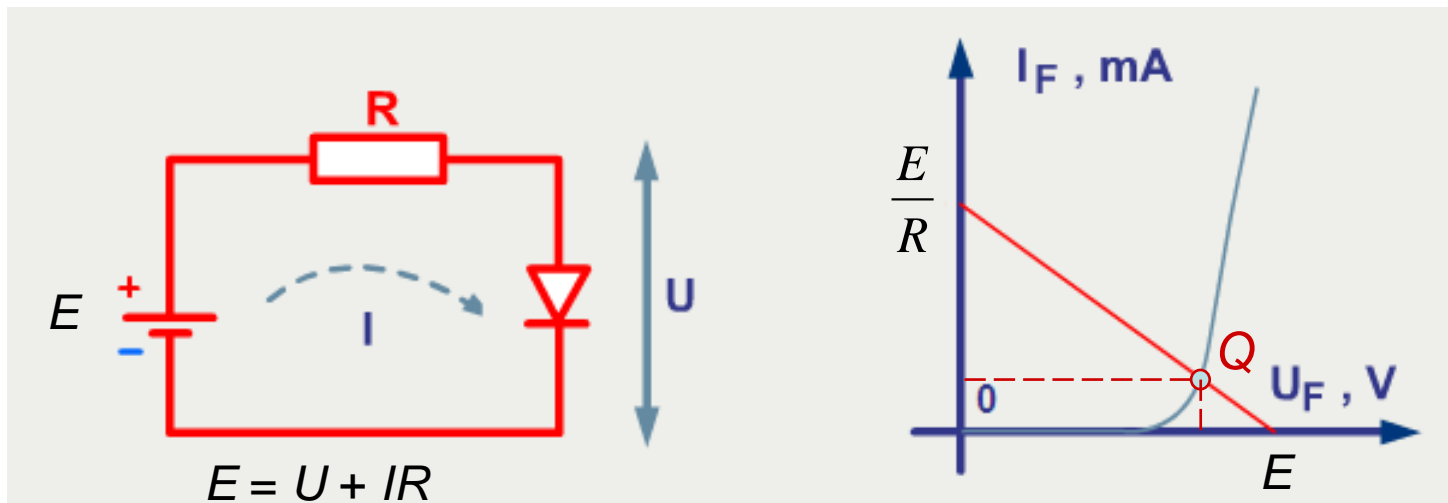
Този пробив настъпва, ако

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

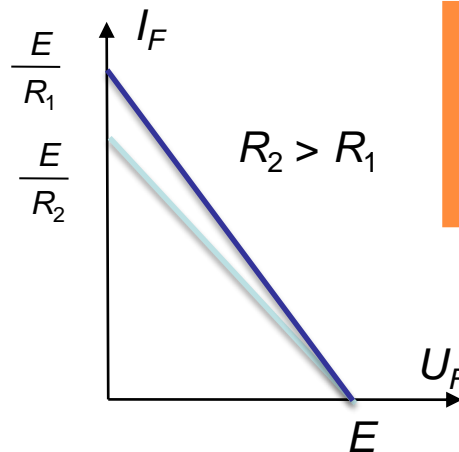
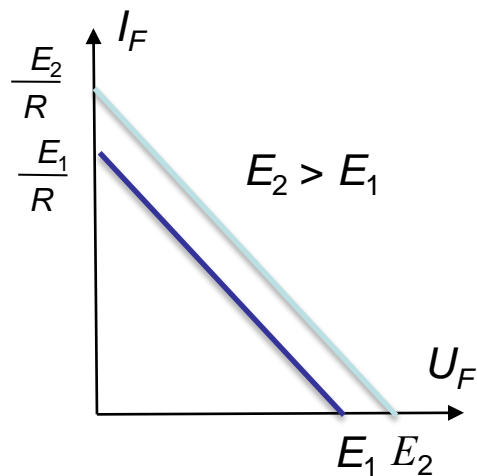


Топлинният е **необратим** и довежда до разрушаване на диода. С увеличаване на околната температура пробивът настъпва при по-ниско напрежение, защото нараства обратният ток и се влошават условията за охлаждане

# Товарна права и работна точка



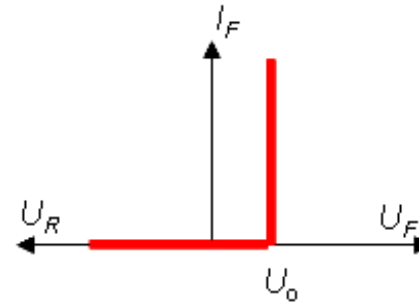
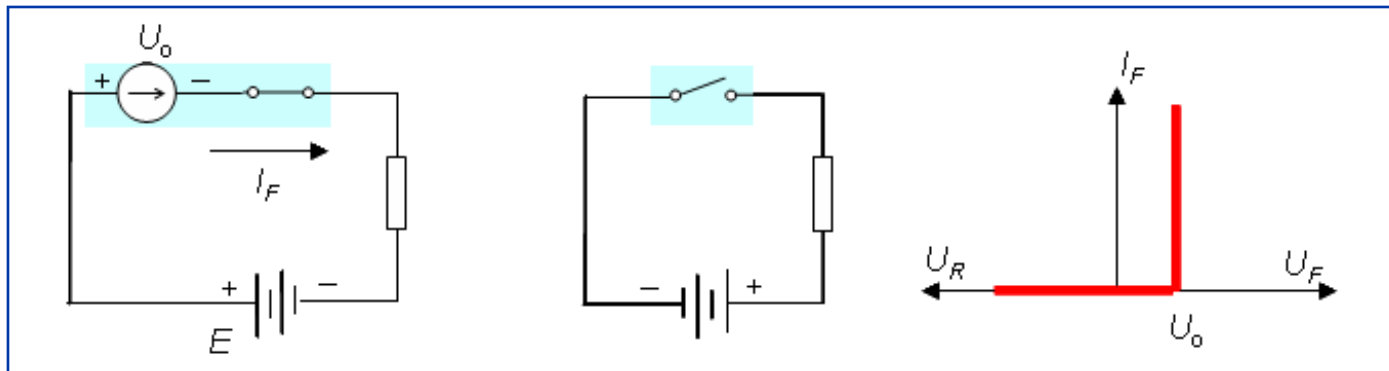
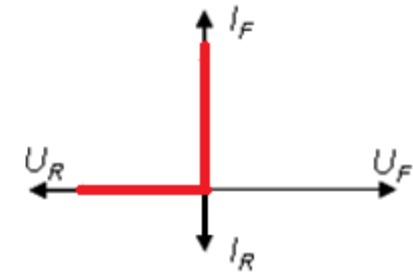
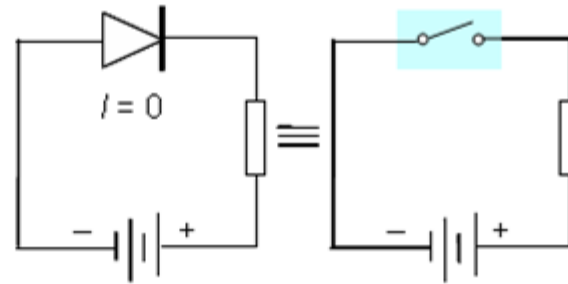
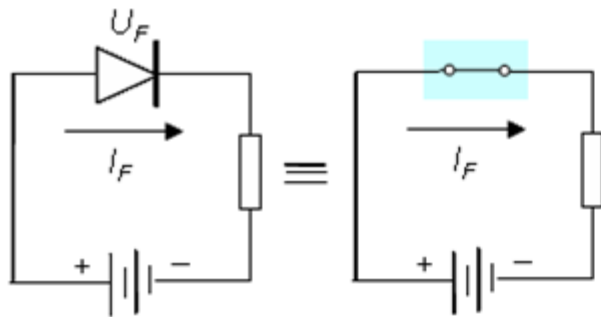
$$R_Q = \frac{U_Q}{I_Q}$$



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

Зависимост от захранването и товарното съпротивление

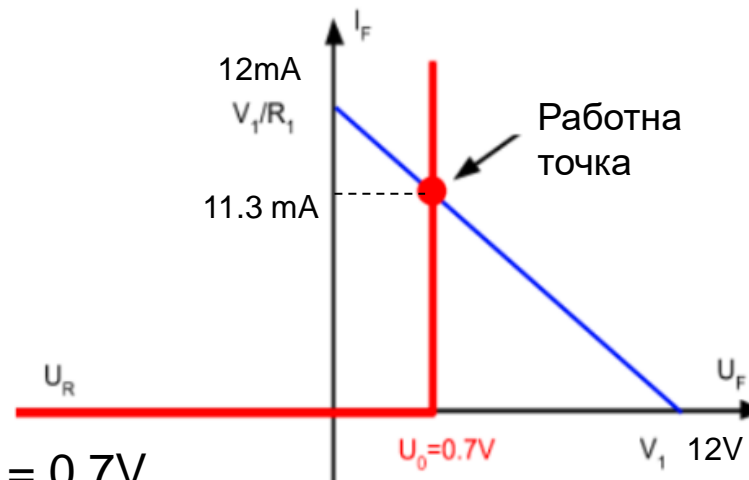
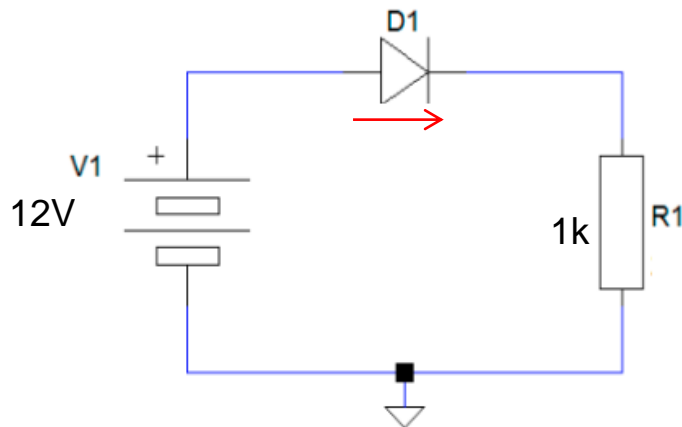
# Еквивалентни схеми по ток



Прагов модел

# Примери

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



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

Напрежението върху резистора  $U_R$  се изчислява от закона на Кирхов.

$$U_R = V_1 - U_0 = 12 - 0.7 = 11.3V$$

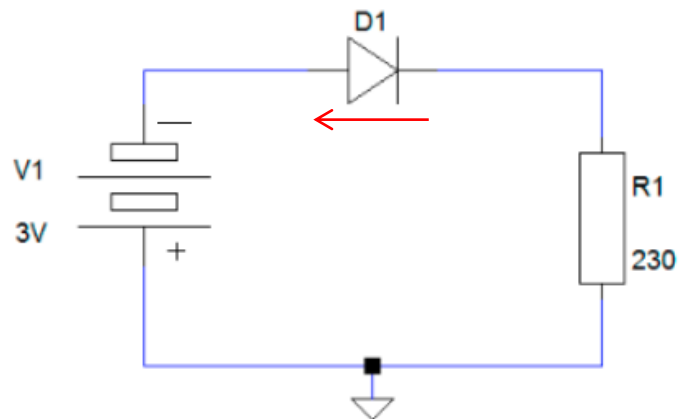
Токът през  $R_1$  от закона на Ом е:  $I_R = \frac{U_R}{R_1} = \frac{11,3}{1.10^3} = 11,3 \cdot 10^{-3}A = 11.3 \text{ mA} = I_D$

	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

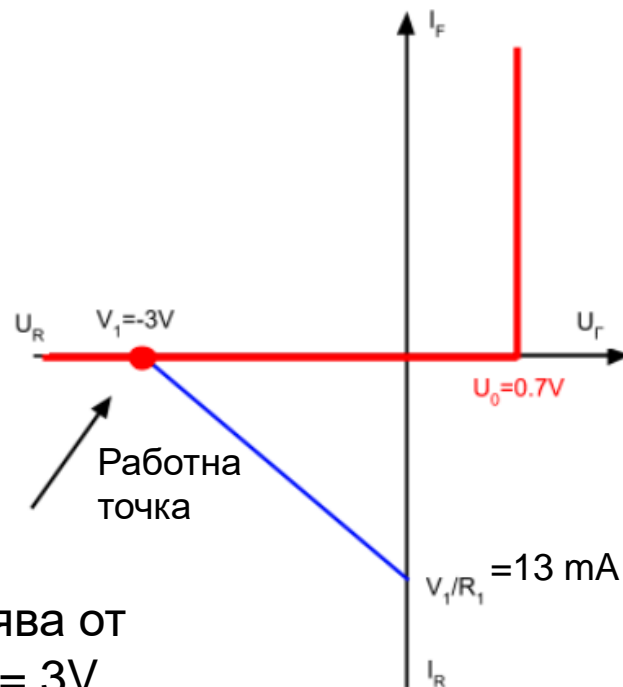
Изчисляване на стойностите на тока и напрежението в работната точка чрез използване прагов модел.



Диодът е в обратно включване,  $I=0$ .

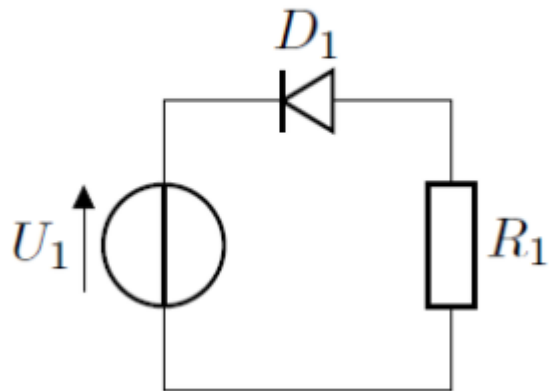
От закона на Ом  $U_R = I \cdot R_1 = 0$

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

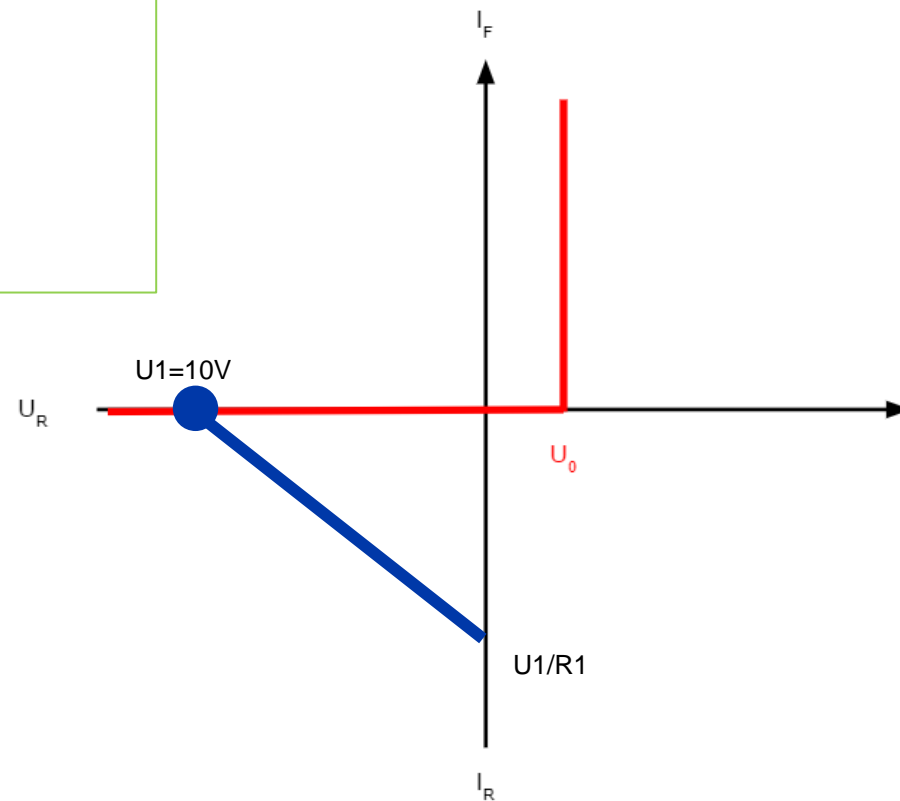


	U, V	I, mA
Диод	-3	0
Резистор	0	0

Определете напреженията върху резистора и диода и големината на тока, ако  $U_1=10V$  и  $R_1=100$  Ома. Използвайте прагов модел на диод с  $U_0=0.7V$ .



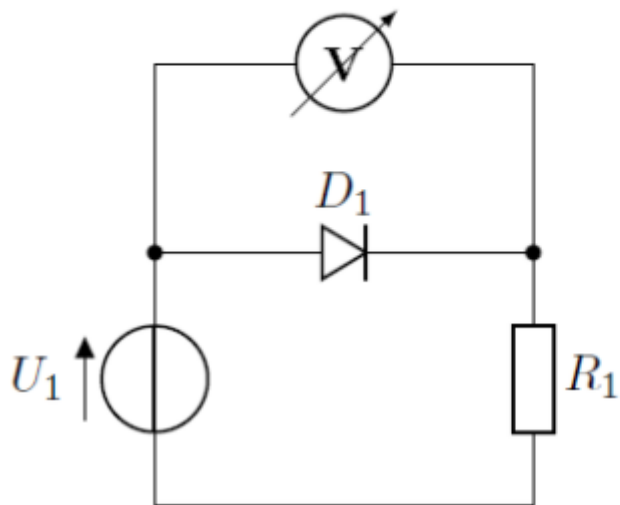
1. Диода е включен в обратна посока  $\Rightarrow I = 0$
2.  $U_{R1} = I \cdot R_1 = 0 \cdot 100 = 0V$
3.  $U_{D1} = U_1 - U_{R1} = 10V - 0V = 10V$





# Примери

Какво ще покава волтметъра, ако  $U_1=10\text{V}$ ,  $R_1=100\ \Omega$ , а  $D_1$  е силициев диод с PN преход.

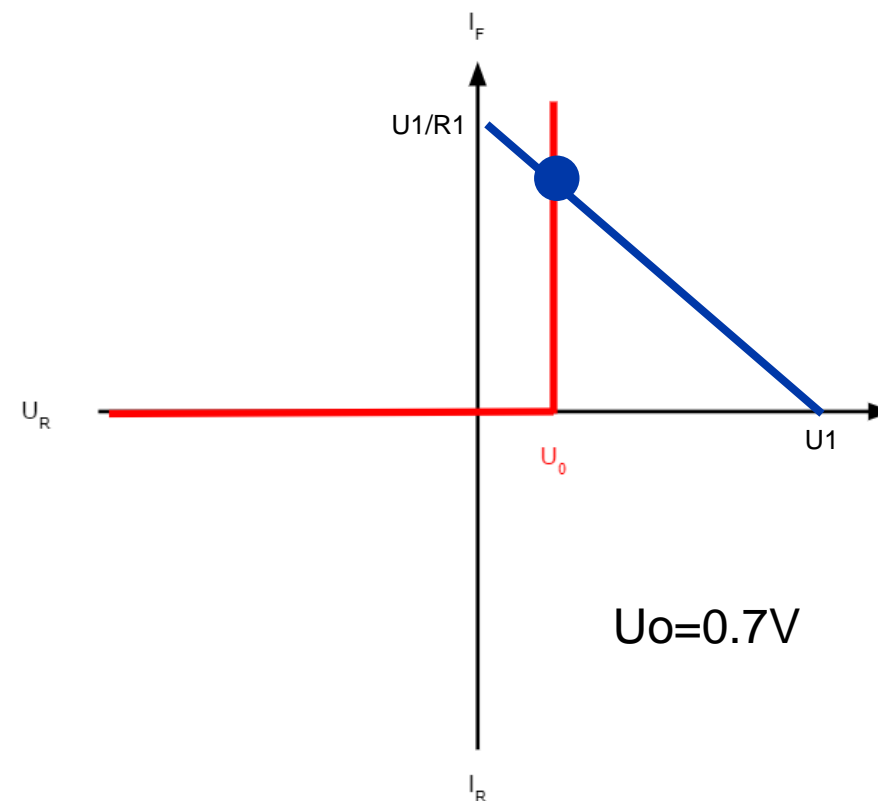


☐ 10V

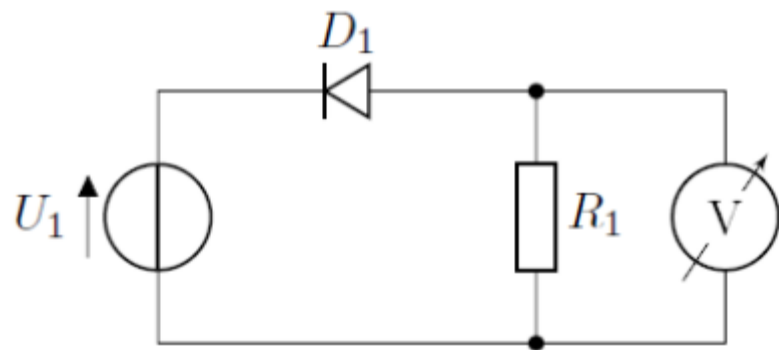
☐ 9.3V

☒ 0.7V

☐ 0V



Какво ще покава волтметъра, ако  $U_1=10V$ ,  $R_1=100\Omega$ , а  $D_1$  е силициев диод с PN преход.



☐ 10V

☐ 9.3V

☐ 0.7V

☒ 0V

