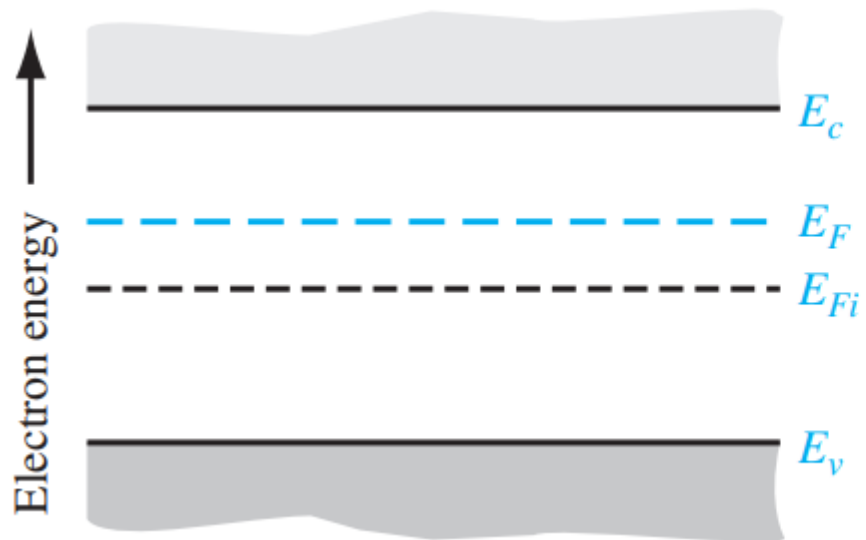


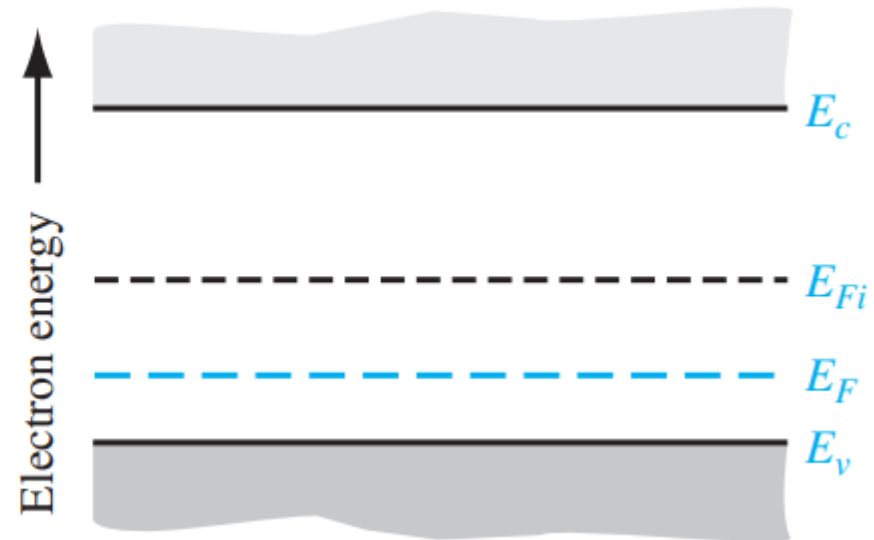


pn Преход

# Преговор – ниво на Ферми в примесни полупроводници

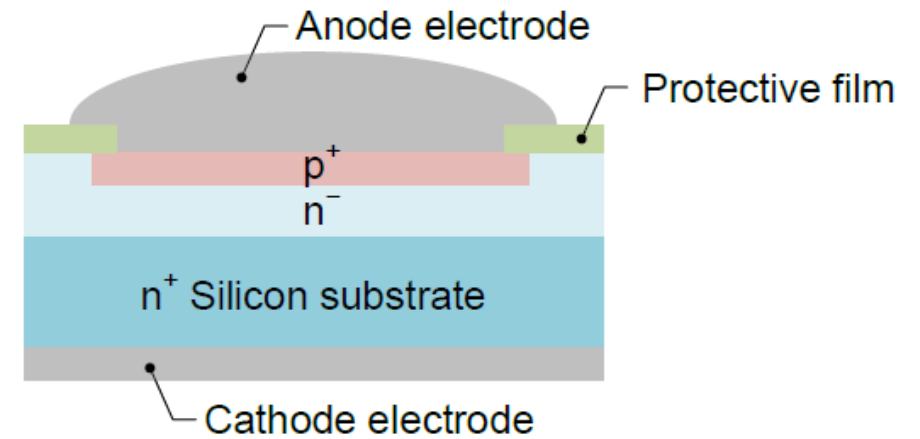
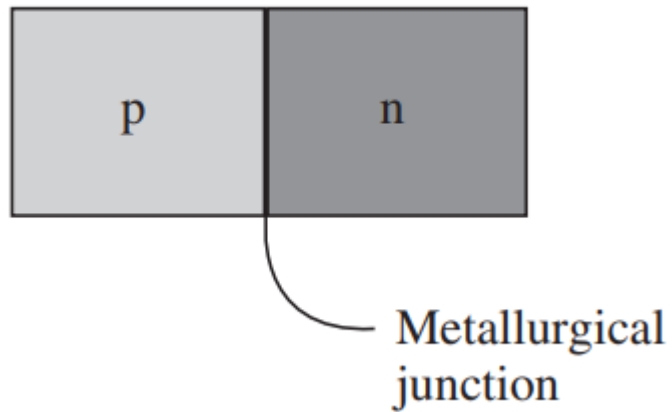


п-тип полупроводник



р-тип полупроводник

# Формиране на pn преход

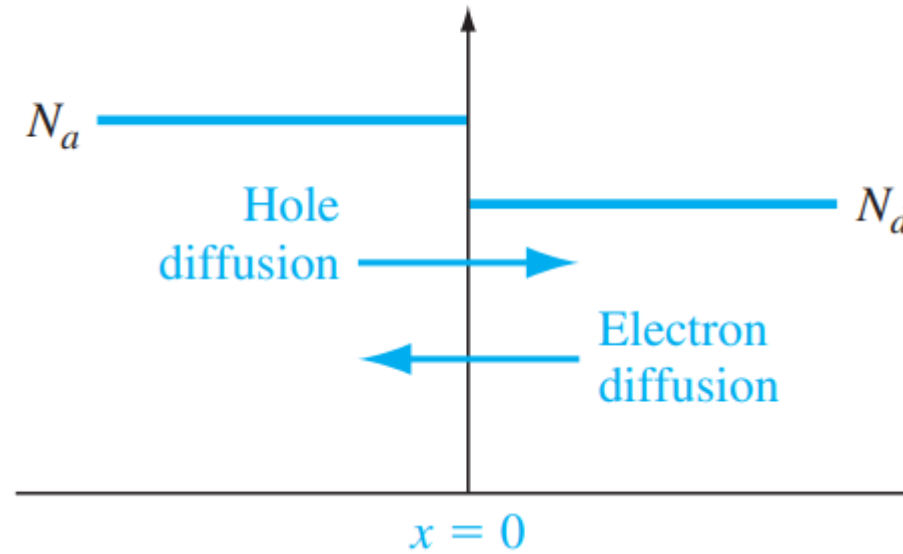
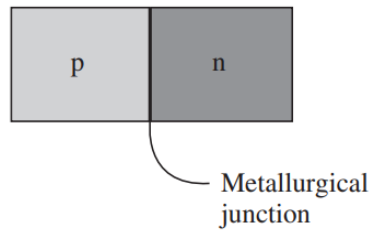


pn прехода се формира в полупроводнов монокристал, в който една област е легирана с акцепторни примесни атоми, за да се образува р област, а съседната област е легирана с донорни атоми за образуване на n регион.

Границата, разделяща n и p областите, се нарича металургичен граница.

Най-често, легирането се извършва посредством йонна имплантация.

# Формиране на p-n преход



Първоначално в металургичната граница има много голям градиент на концентрацията както на електрони така и на дупки. Основните токоносители в n областта (електрони) ще започнат да дифундират в p областта. Репективно, основните токоносители в p областта (дупки) ще започнат да дифундират в n областта.

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

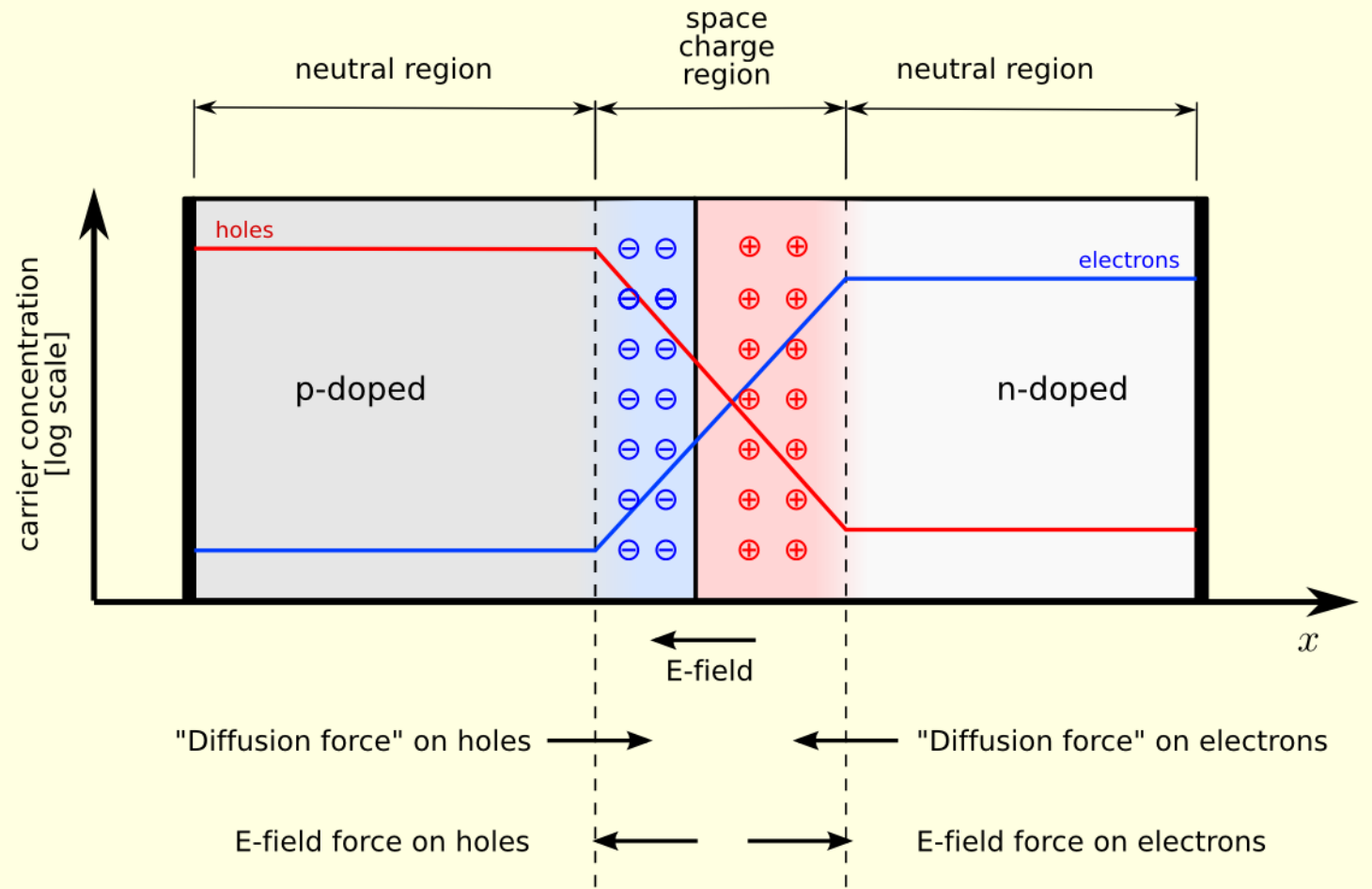
Когато електроните дифундират от областта n, в нея остават положително заредените донорни атоми.

По същия начин тъй като дупките дифундират от p областта, там остават отрицателно заредени акцепторни атоми.

Образува се **обемн заряд**, който индуцира електрическо поле в района близо до металургичния преход.

Това поле изтласква електроните и дупките от областта на обемния заряд, поради което тя се нарича **обеднена** област.

В термично равновесие, влиянието на дифузията и на полето на обемния заряд се уравновесяват.

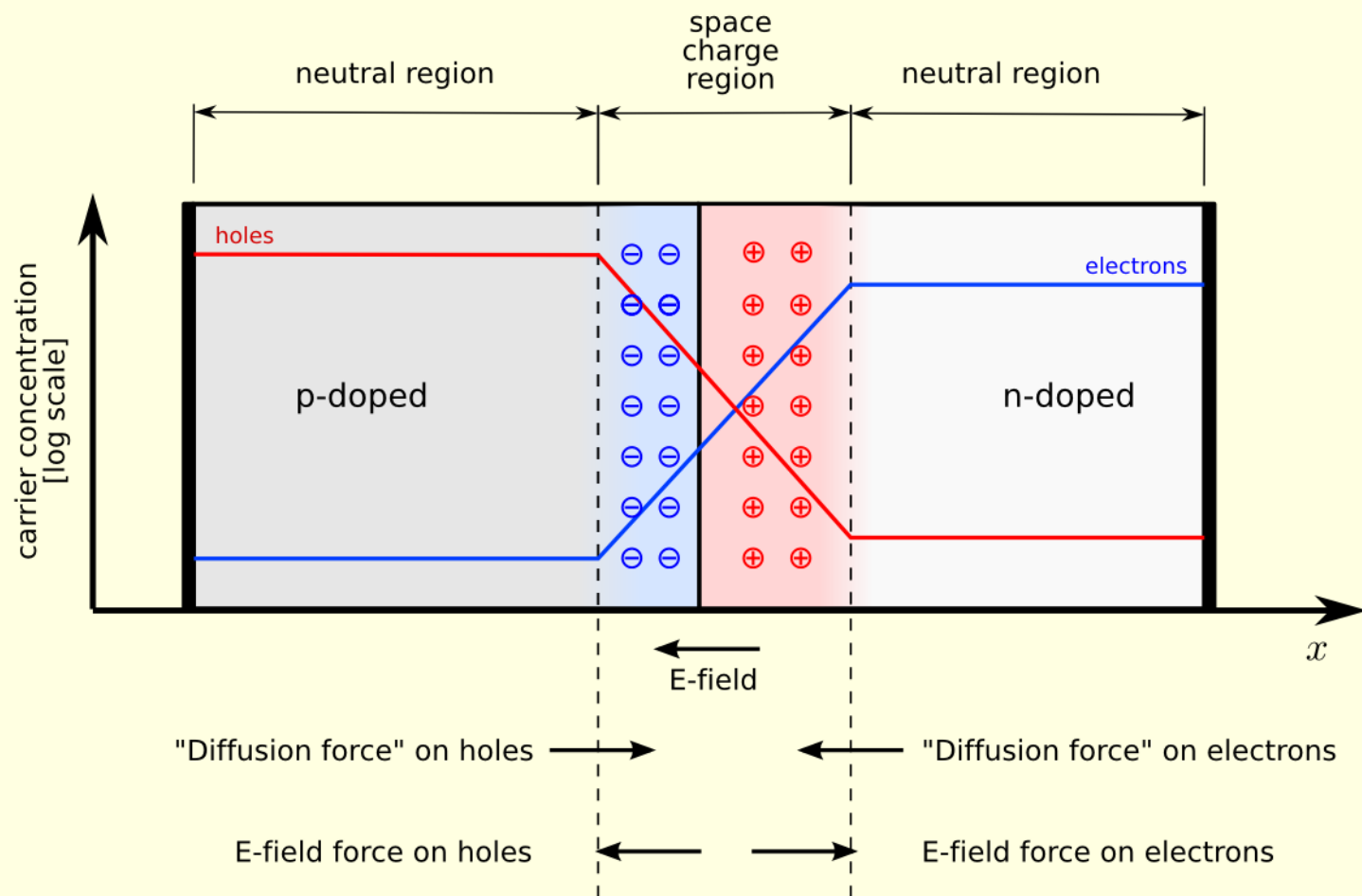


Ако означим широчината на обеднената област с  $d$  и интензитета на електрическото поле с  $E$ , потенциалната разлика между двете области на pn прехода ще бъде

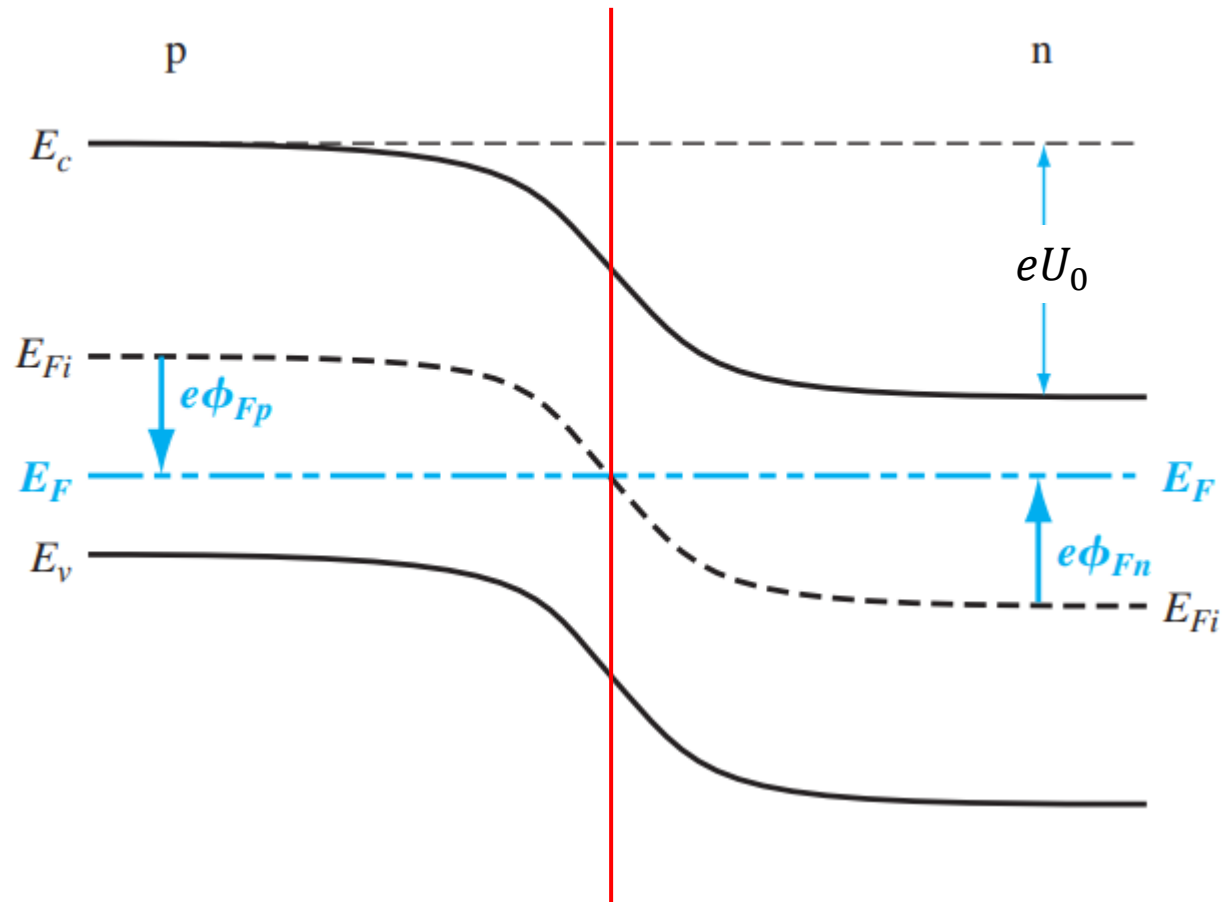
$$U_0 = E \cdot d$$

$U_0$  се нарича бариерен потенциал.

При стайна температура (25 °C) бариерният потенциал за Si диоди е приблизително 0.7V.



## Зонна диаграма на pn преход в термично равновесие



$$U_0 = |\varphi_{Fp}| + |\varphi_{Fn}| = \varphi_t \ln \left( \frac{N_a N_d}{n_i^2} \right)$$

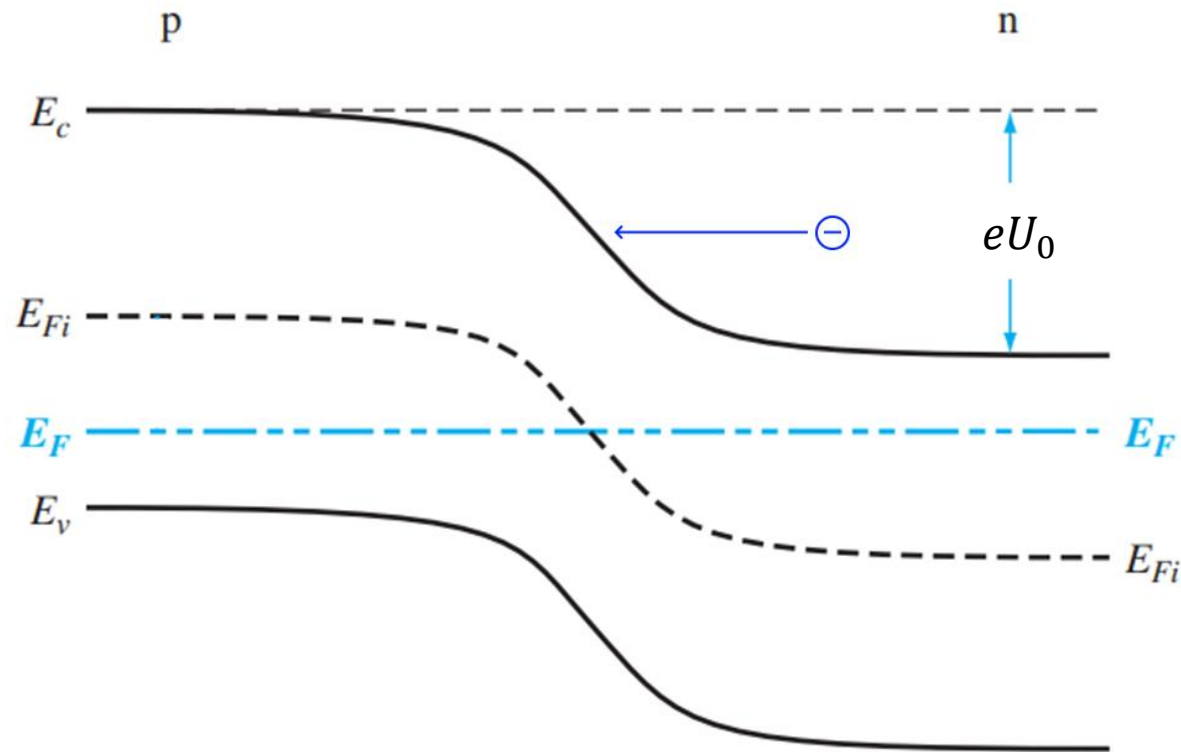
$$\varphi_t = \frac{kT}{e} = 0.0259 \text{ V} \quad \text{при } T=300\text{K}$$

$U_0$  – бариерен потенциал  
 $\varphi_t$  – топлинен потенциал  
 $k$  – константа на Болцман  
 $T$  – абсолютна температура  
 $e$  – заряд на електрона

Новото на Ферми е едно и също за цялата система.

При преминаване през зоната на обемен заряд, нивата на валентната зона и зоната на проводимост се огъват, защото отстоянието им от нивото на Ферми е различно за p и n областите.

## Зонна диаграма на pn преход в термично равновесие

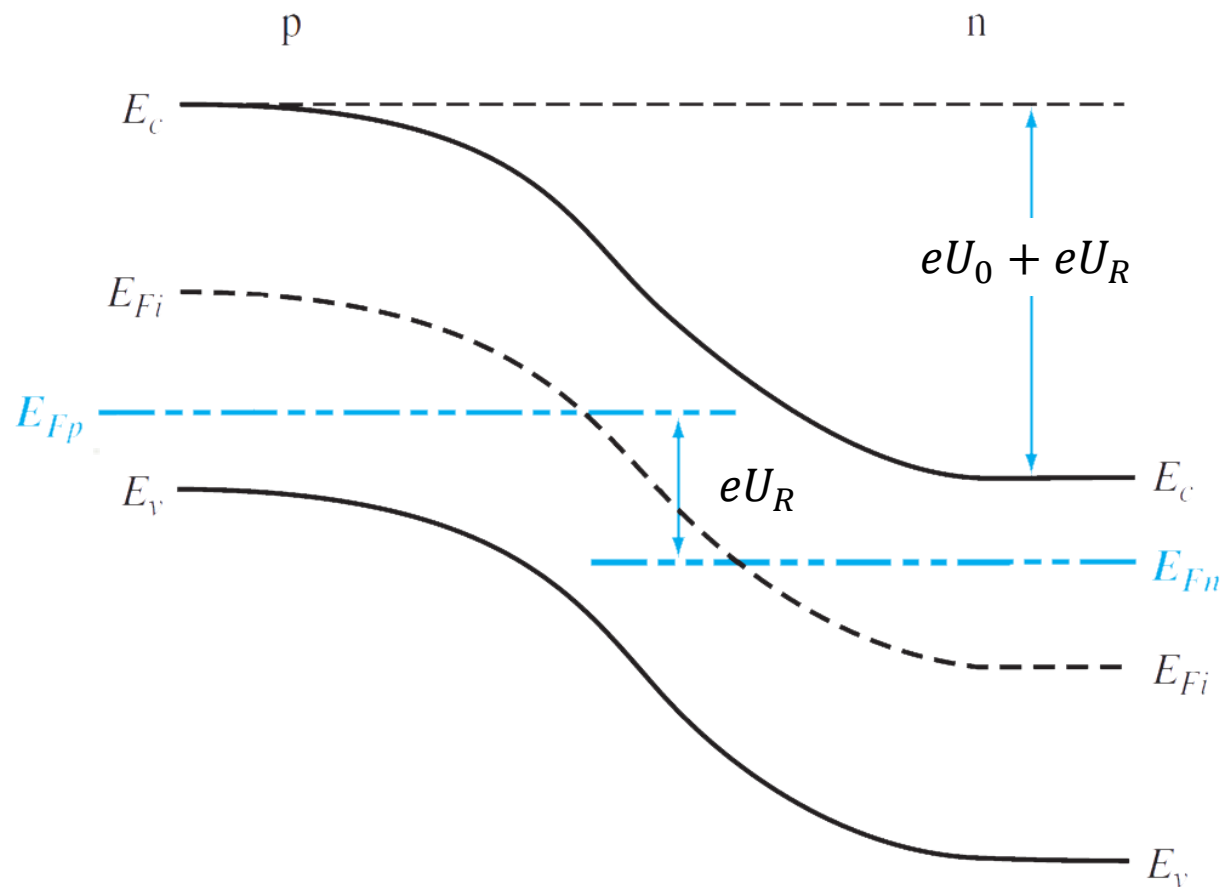
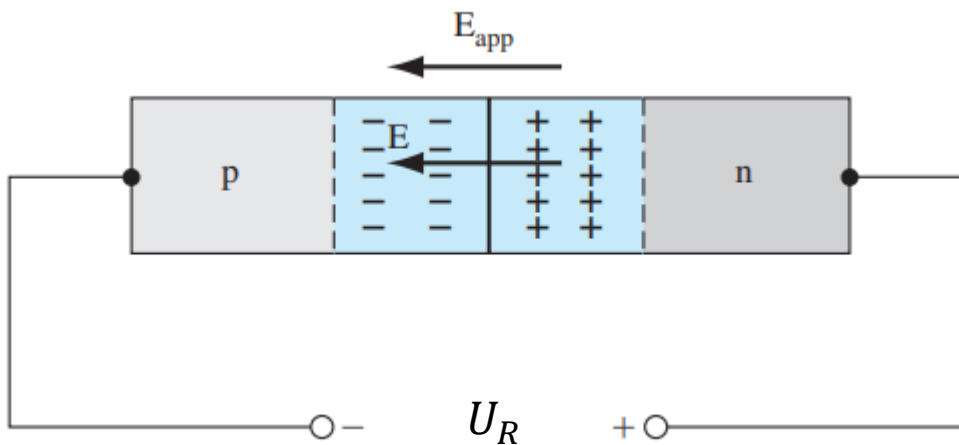


Защо  $U_0$  се нарича „бариерен“ потенциал?

Електроните в зоната на проводимост на n областта срещата „бариера“ когато се опитат да преминат в зоната на проводимост на p областта. Височината на тази бариера е  $eU_0$



Обратно включване на рп преход



Ако приложим потенциал  $U_R$  между областите p и n, ще се наруши условието за равновесие – нивото на Ферми вече няма да бъде постоянно през система.

Бариерният потенциал се повишава до  $U_0 + U_R$

Обеднената област действа като изолатор, предотвратявайки значителен поток на електрически ток (освен ако външен източник на енергия – например светлина – не предизвиква генериране на двойки електрон-дупка).

# Пробив

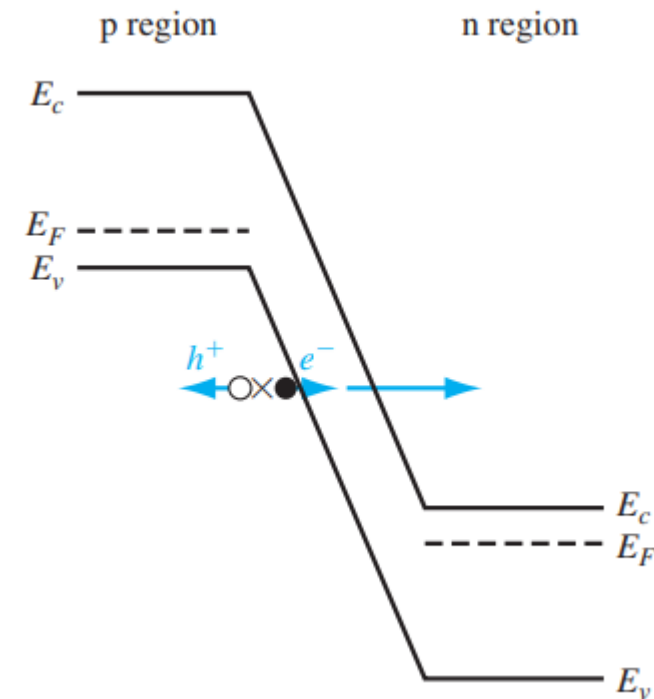
Обратното напрежение не може да бъде увеличавано неограничено – при определено напрежение обратният ток ще се увеличи бързо. Приложеното напрежение в тази точка се нарича напрежение на пробив.

Съществуват няколко механизма на пробив:

1. Пробивът на Zener се обяснява с тунелиране на токоносители през pn прехода.

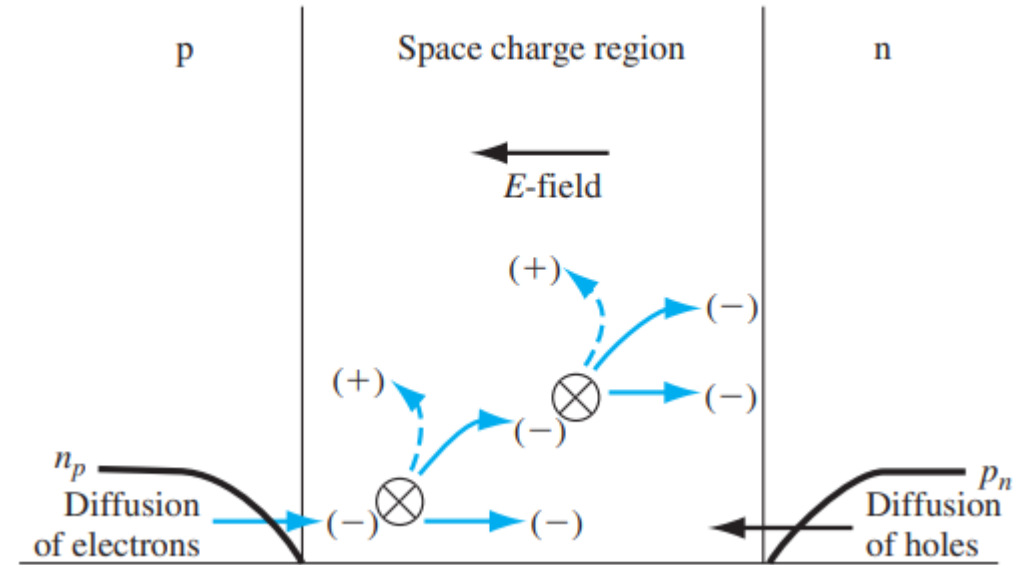
В силно легиран преход, енергийните зони от двете страни на прехода са достатъчно близки една до друга.

Електроните могат да тунелират директно от валентната зона на р областта в зоната на проводимост на n областта.



# Лавинен пробив

2. Лавинният пробив възниква, когато електрони или дупки, движейки се в областта на обемния заряд, придобиват достатъчно енергия от електрическото поле, за да създадат двойки електрон-дупка чрез сблъсък с електроните на неутрални атоми.

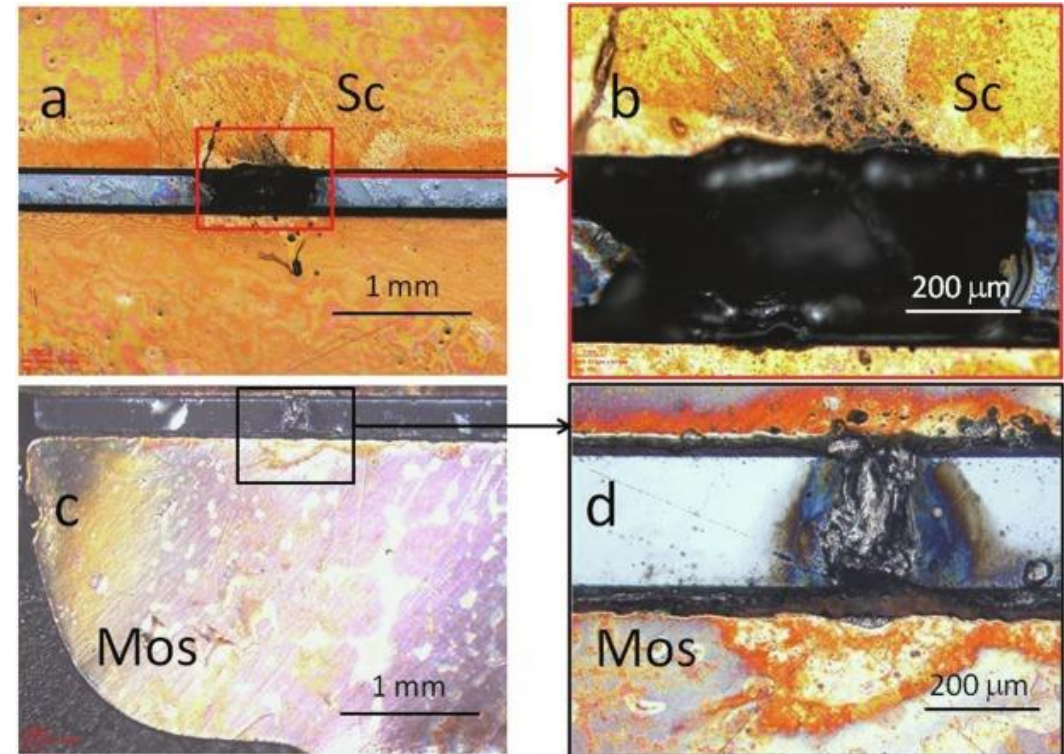


# Топлинен пробив

3. Ако продължим да увеличаваме обратното напрежение върху pn прехода ще се увеличава и обратния ток.

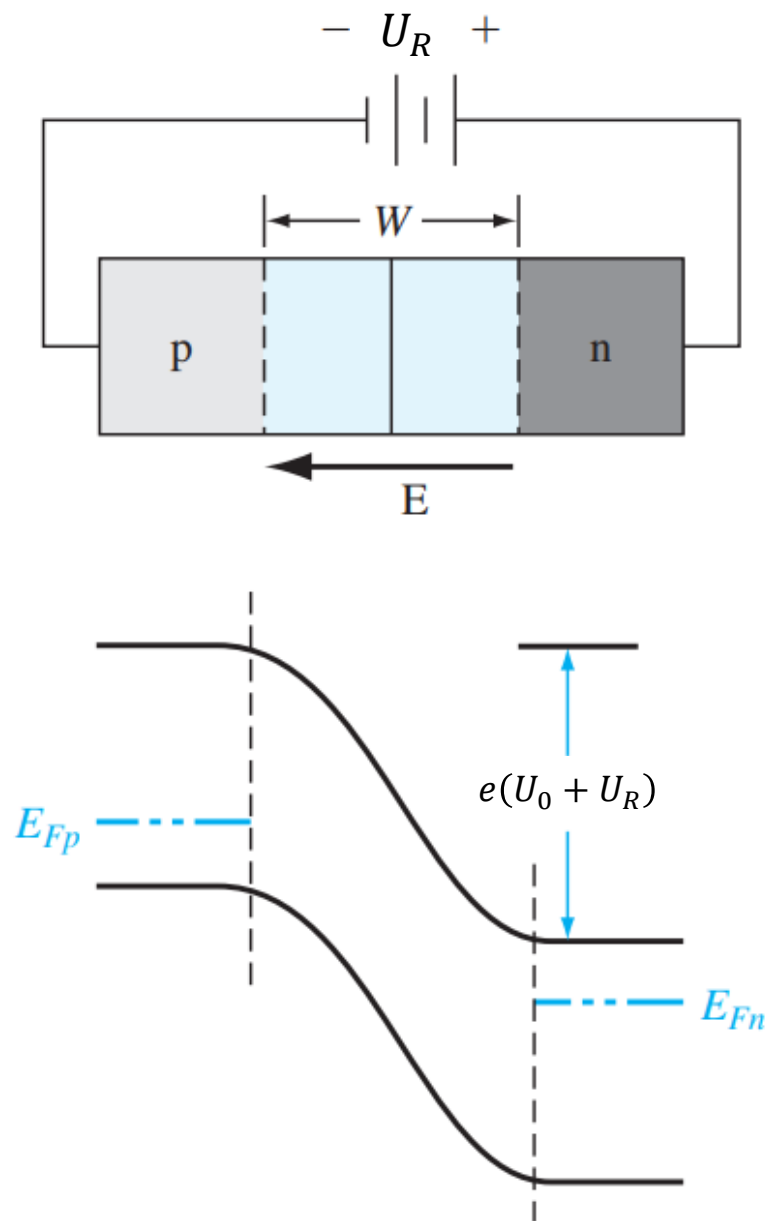
Протичането на ток води до отделяне на топлина и до повишаване на температурата.

Рано или късно, това ще доведе до необратимо разрушаване на pn прехода.

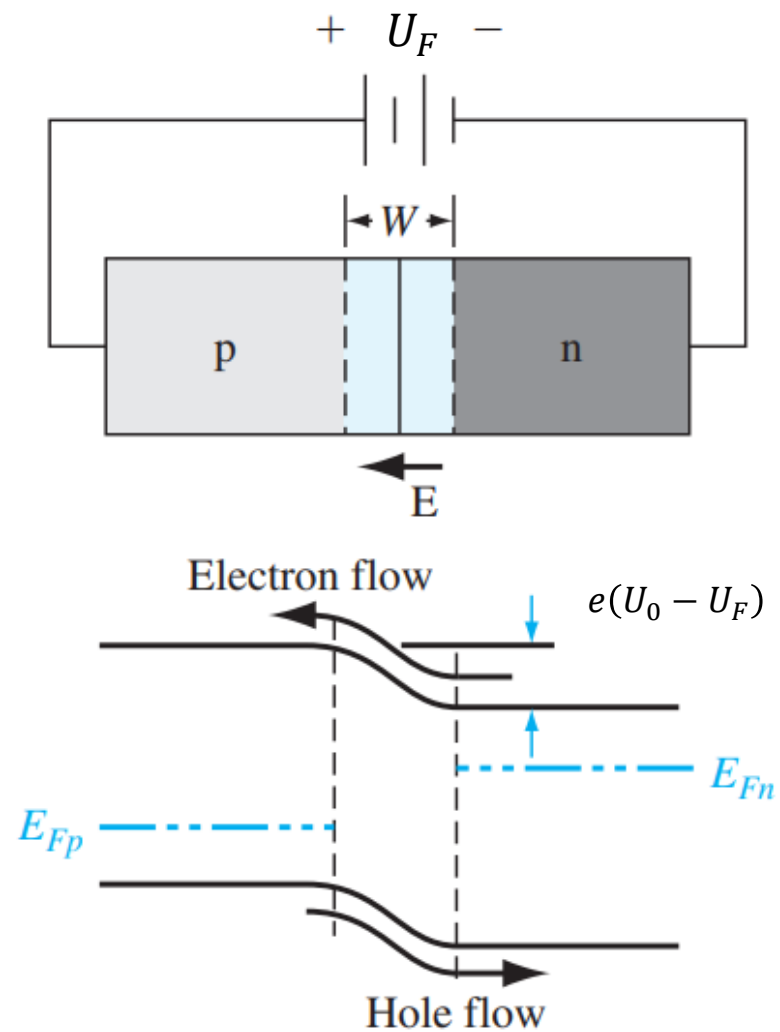


Право включване на рп преход

Обратно включване



Право включване

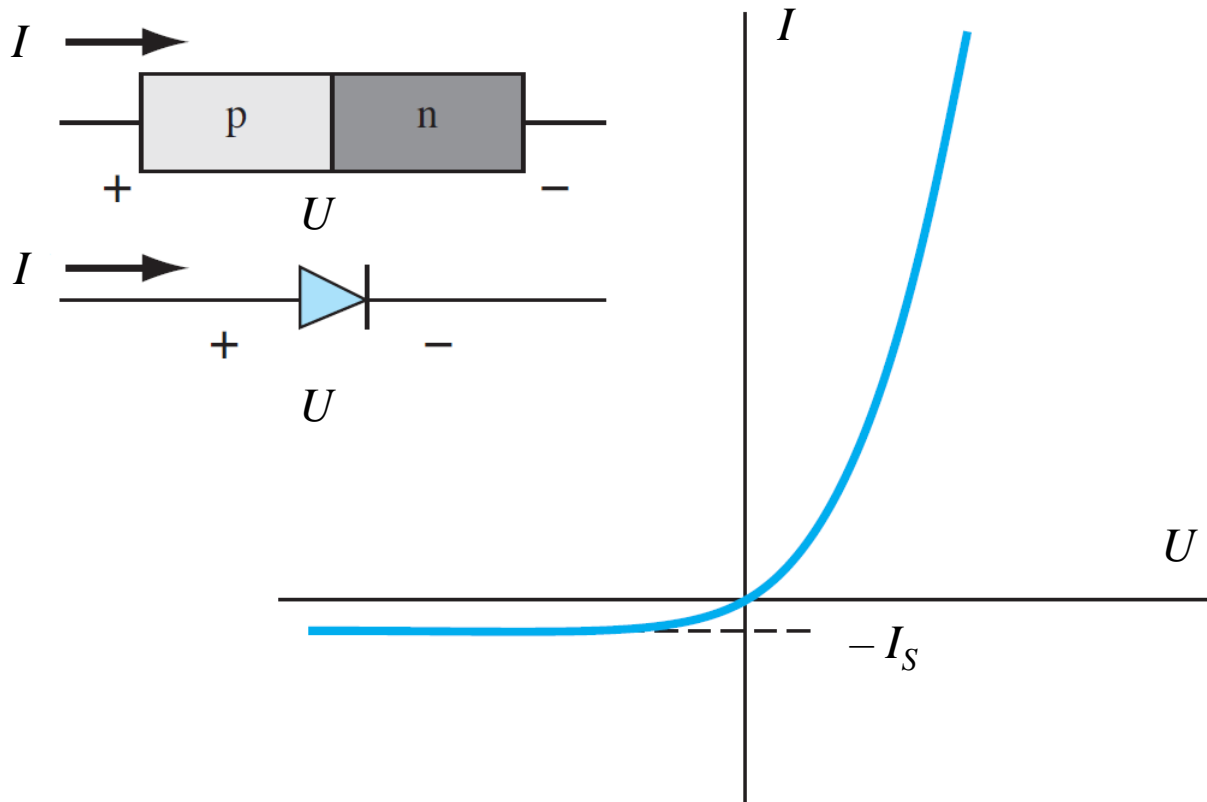


Намаленият бариерен потенциал вече не е в състояние да спре дифузията на токоносители. През pn прехода ще протече ток.

# Волта-Амперна характеристика на идеален диод

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

$I$  – ток през диода  
 $I_s$  – ток на насищане  
 $U$  – напрежение върху диода  
 $\varphi_t$  – топлинен потенциал



John Bardeen(l), William Shockley and  
Walter Brattain(r), 1948

1956 Нобелова награда по физика за  
изследване свойствата на полупроводниците и  
откриване на транзистора.



# Влияние на температурата - обратно включване

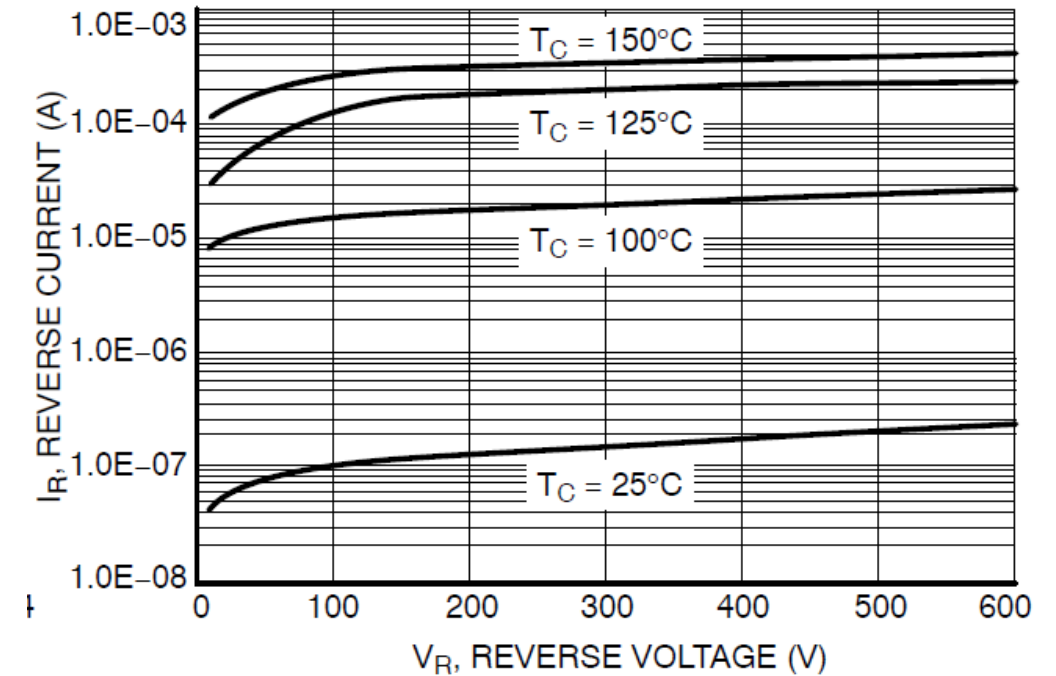
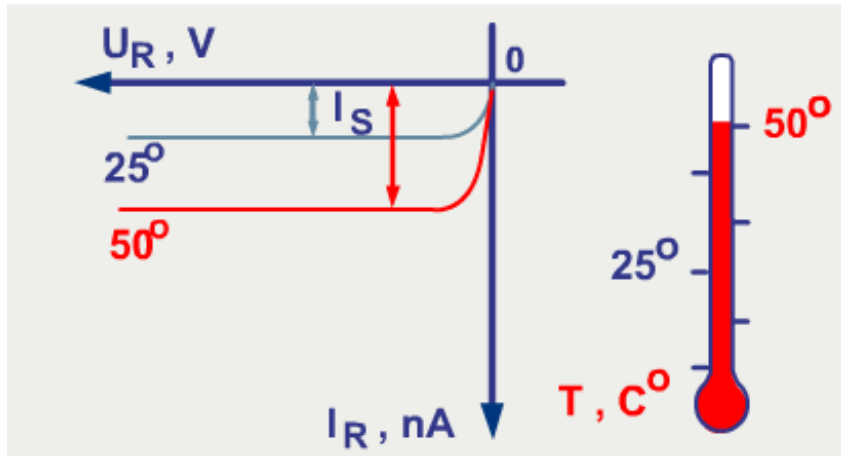
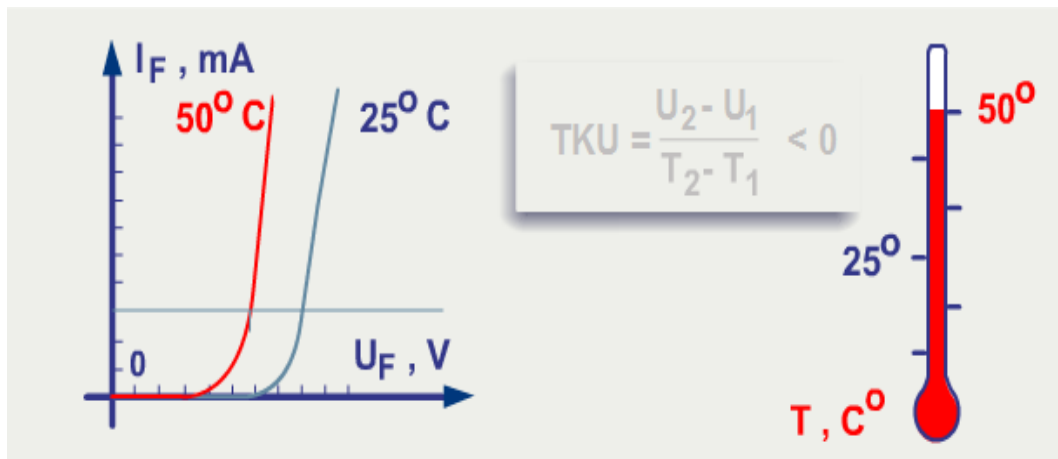


Figure 2. Typical Reverse Current

Токът на насищане  $I_S$  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.

# Влияние на температурата – право включване



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

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

Ако  $T \uparrow$  то  $U \downarrow$  при  $I = \text{const}$

Диодът има **отрицателен температурен коефициент** на напрежението  $U_F$ .

Това позволява диодите да се използват като датчици за температура, както и за температурна компенсация.

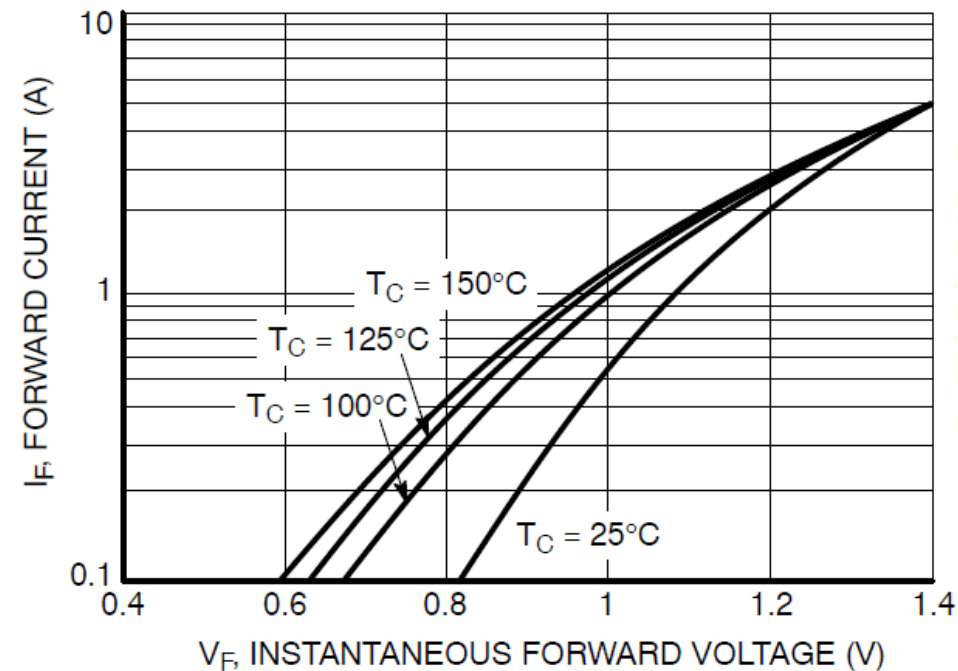


Figure 1. Typical Forward Voltage

Преход метал-полупроводник  
Прехо на Шотки

# Зонна диаграма

Преди контакт, нивото на Ферми в полупроводникът е над това в метала. За да може нивото на Ферми да е постоянно в цялата система, електрони от полупроводника преминават в по-ниските енергийни състояния в метала.

Положително заредени донорни атоми остават в полупроводника, създавайки област на пространствен заряд

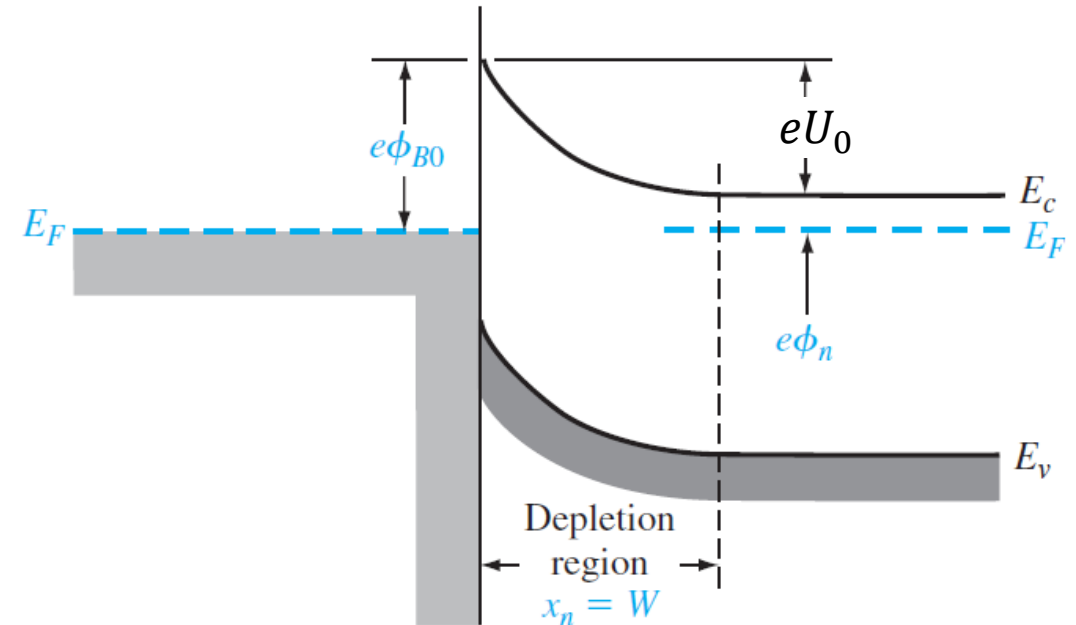
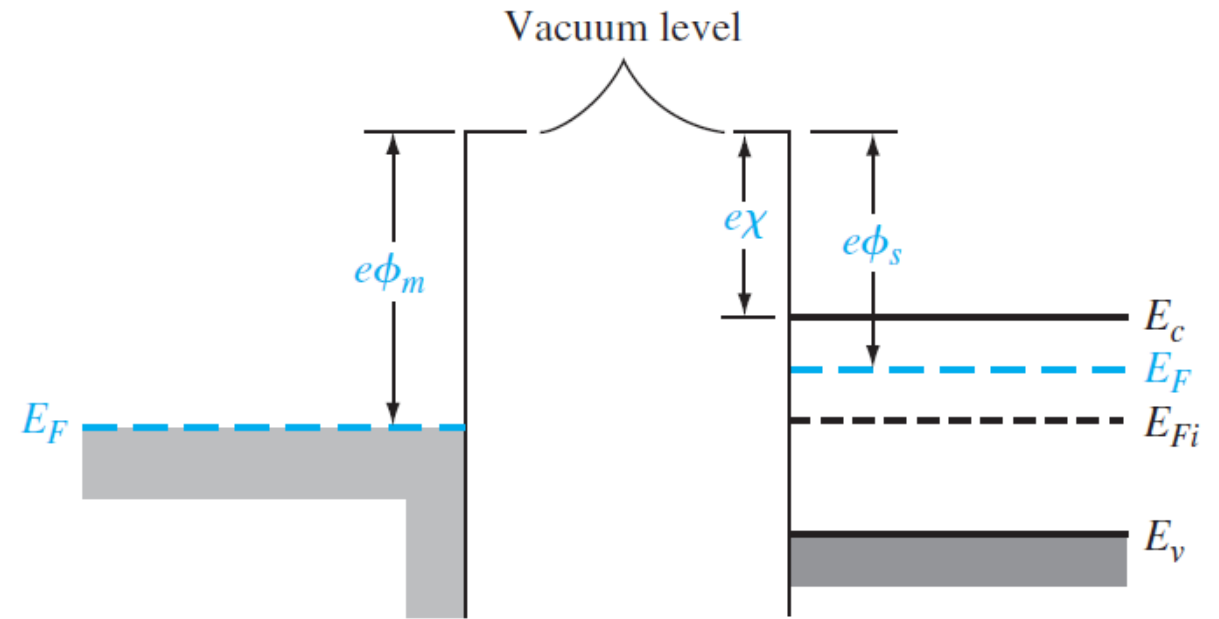
$\varphi_m$  - работна функция на метала

$\varphi_s$  - работна функция на полупроводника

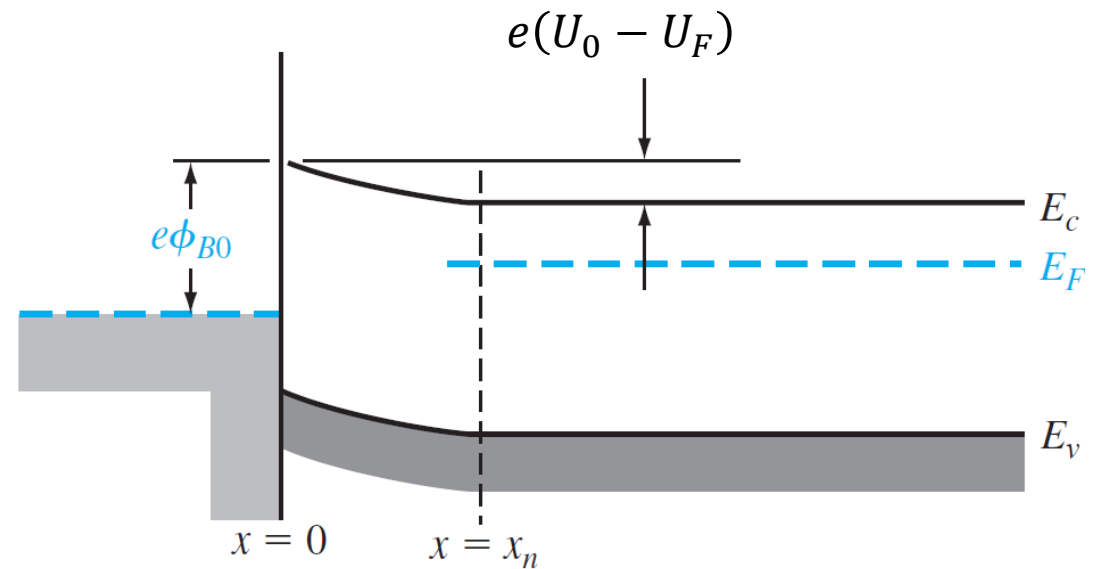
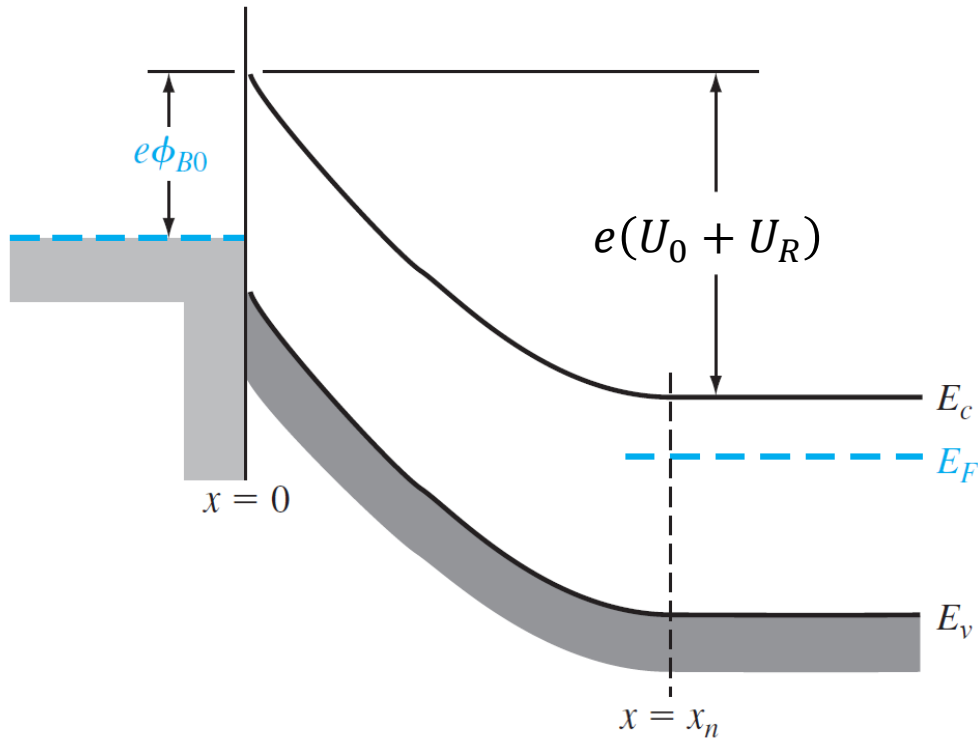
$\chi$  – електронен афинитет на полупроводника

$\varphi_{B0} = \varphi_m - \chi$  – бариера на Шотки

$U_0 = \varphi_{B0} - \varphi_n$  - бариерен потенциал



# Зонна диаграма – право и обратно включване



Зонните диаграми при право и обратно включване на прехода на Шотки са подобни на тези при pn прехода. Подобна е и волт-амперната характеристика.

Съществена разлика, е че токът в прехода на Шотки се формира само от електрони – т.е. от основни токоносители. Следователно, той зависи по-слабо от температурни промени.