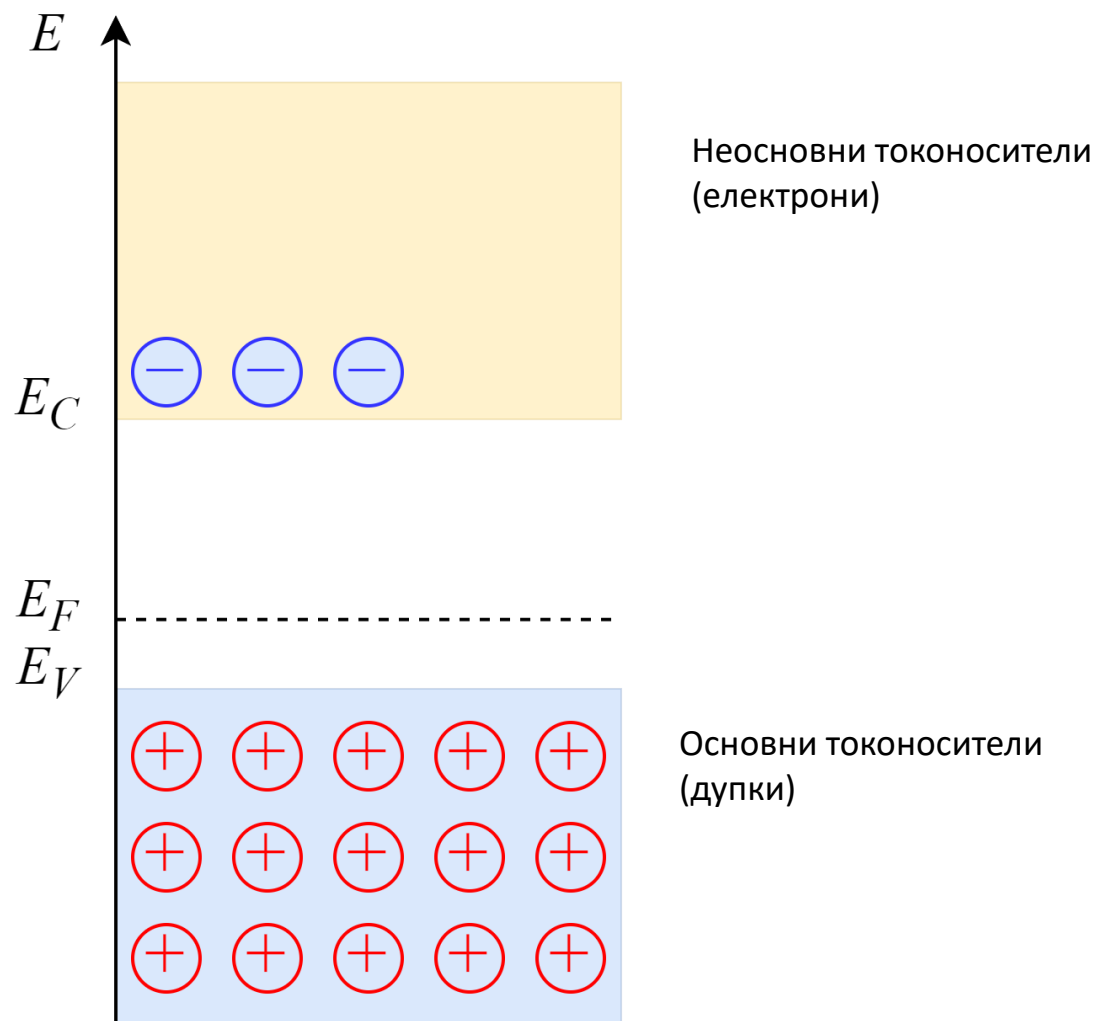


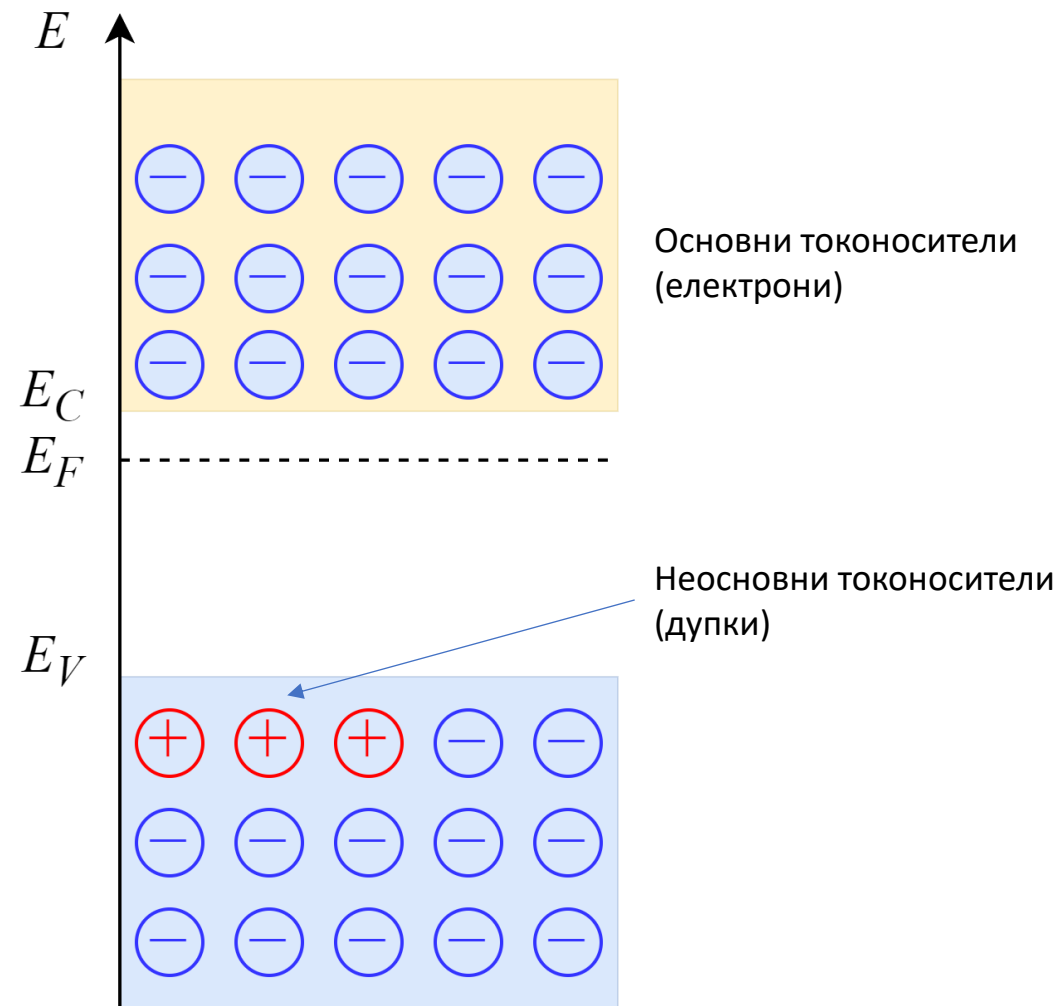


PN Преход

# Преговор – ниво на Ферми в примесни полупроводници

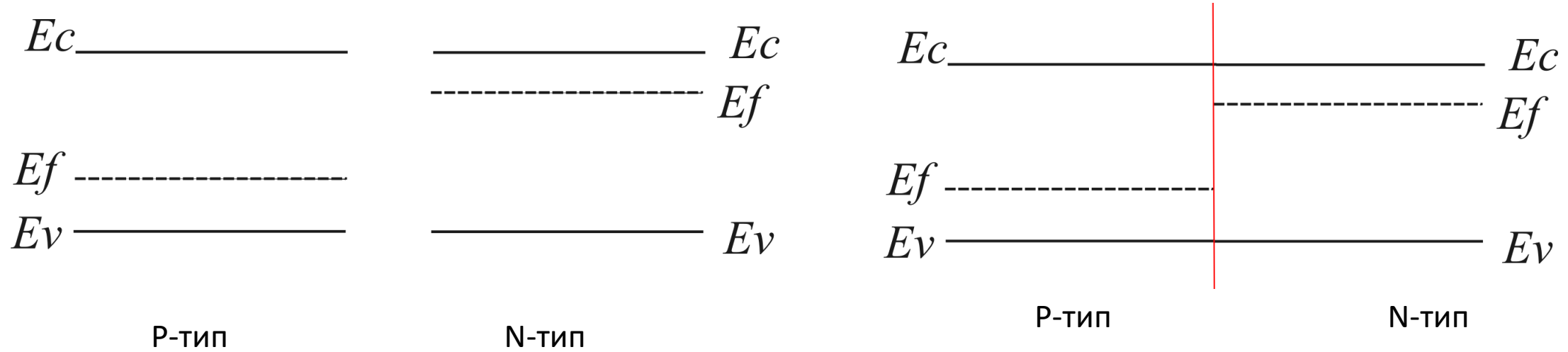


Р-тип полупроводник



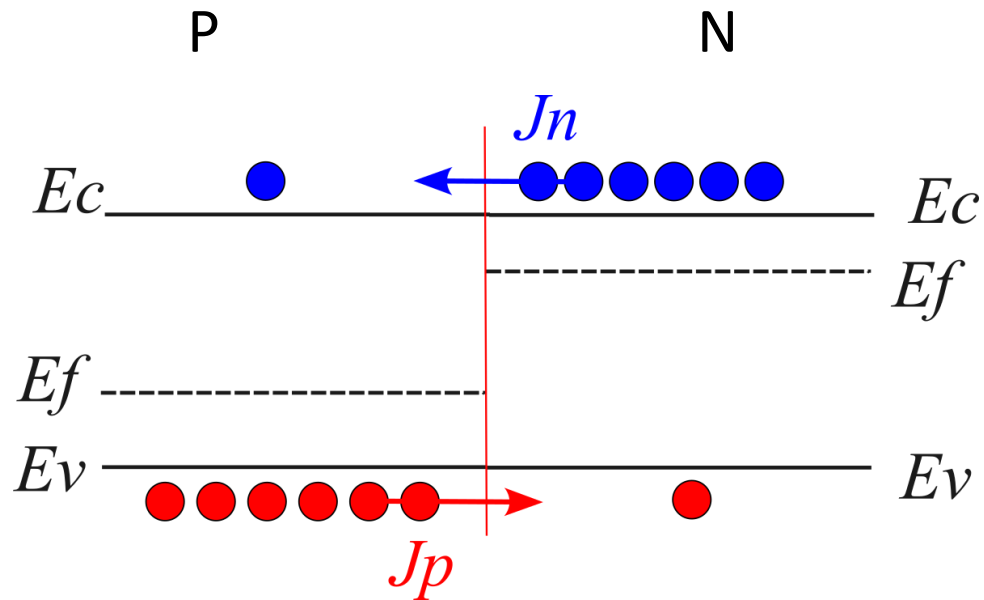
Н-тип полупроводник

## PN Преход



Какво ще стане ако вземем два различни типа полупроводникови кристали и ги доближим на разстояние, съизмеримо със стъпката на кристалната решетка?

## PN Преход



$$J_{nD} = qD_n \frac{dn}{dx}$$

$$J_{pD} = -qD_p \frac{dp}{dx}$$

Законът за дифузията е открит от Adolf Fick през 1855

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. Респективно, 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.

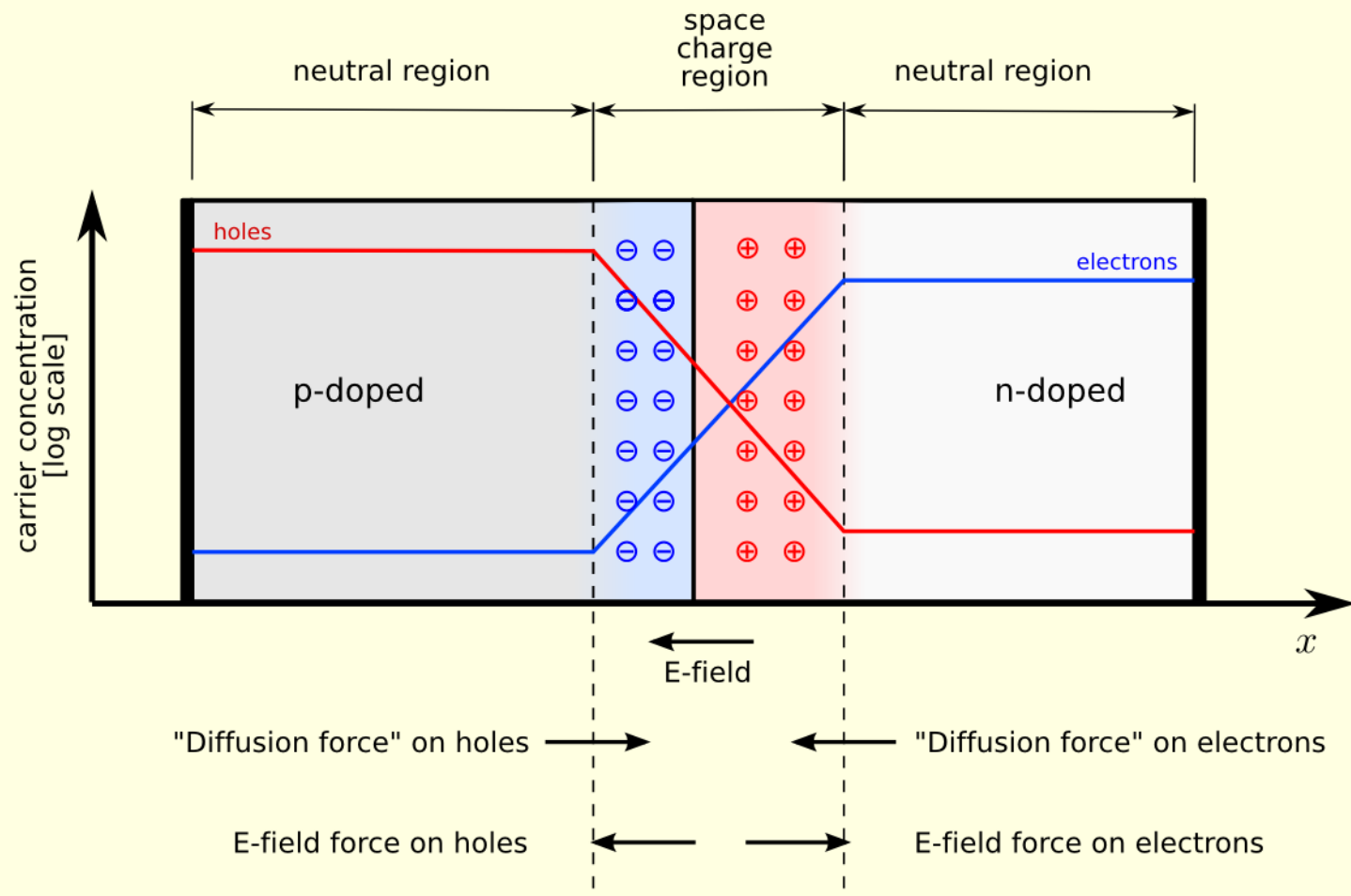
## PN Преход – Объемен Заряд

Когато електроните дифундират от N-областта, 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, т.е. имаме дрейфово движение на токоносителите. В областта непосредствено до металургичната граница се образува **обеднена област**.



$$J_{pE} = q p \mu_p E$$

$$J_{nE} = - q n \mu_n E$$

## PN Преход – Термично Равновесие

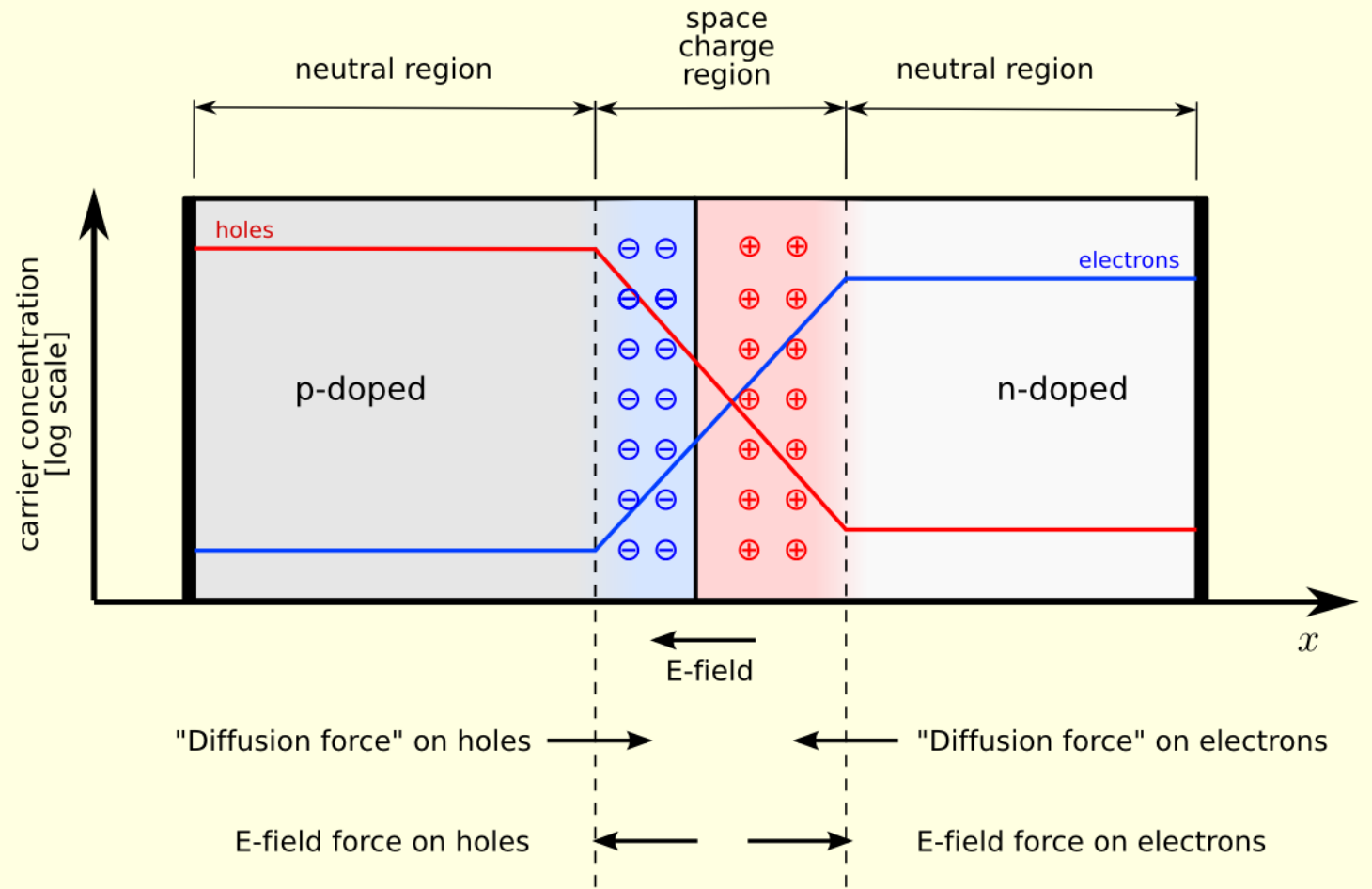
Върху електроните и дупките действа две противодействащи си сили:

- Дифузия, причинена от градиента на концентрацията, се стреми да ги придвижи през прехода
- Дрейфът, причинен от електрическото поле създадено в обеднената област, се стреми да ги отблъсне от прехода.

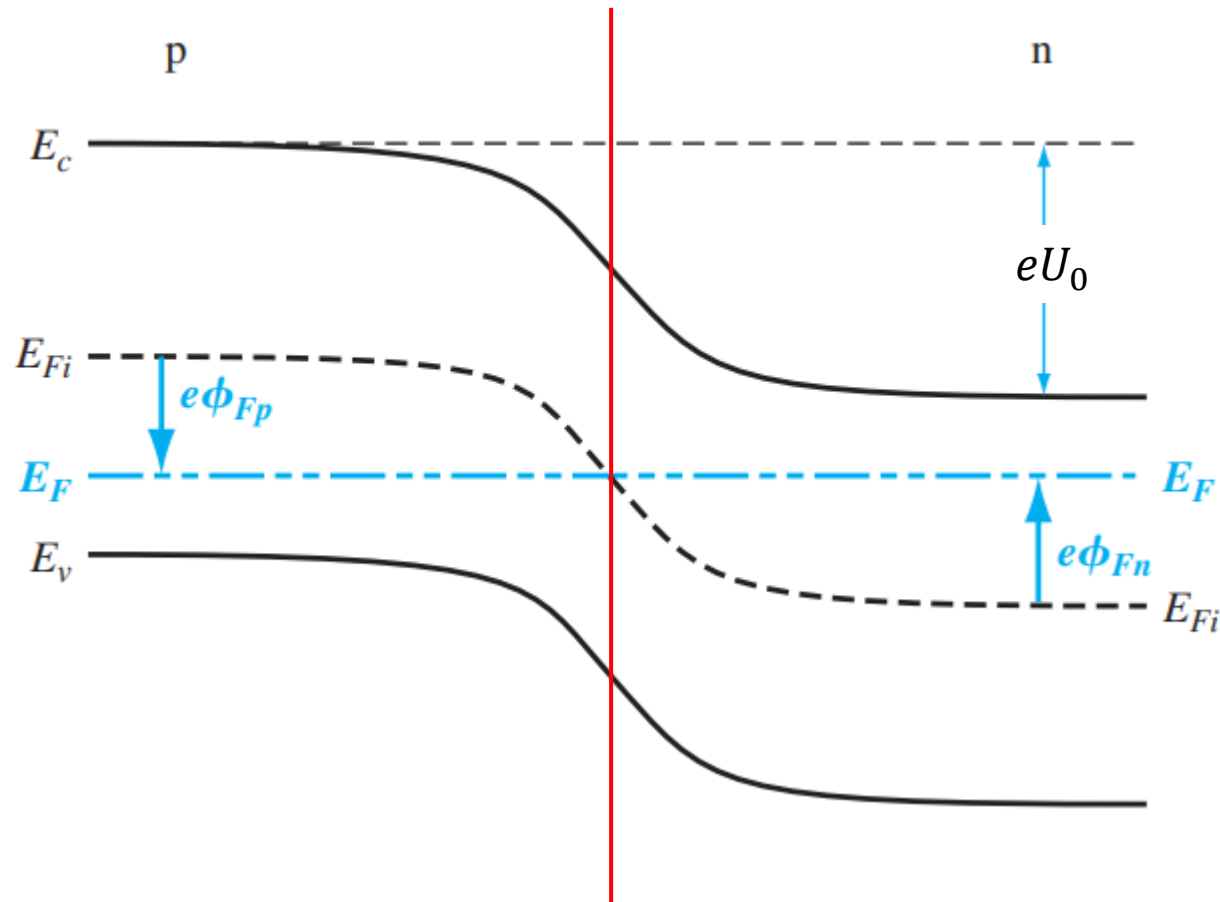
Когато дифузият и дрейфовият потоци на токоносителите се изравнят, настъпва равновесие и ток не тече.

$$J_{nE} + J_{nD} = 0$$

$$J_{pE} + J_{pD} = 0$$



## Зонна диаграма на PN преход в термично равновесие



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

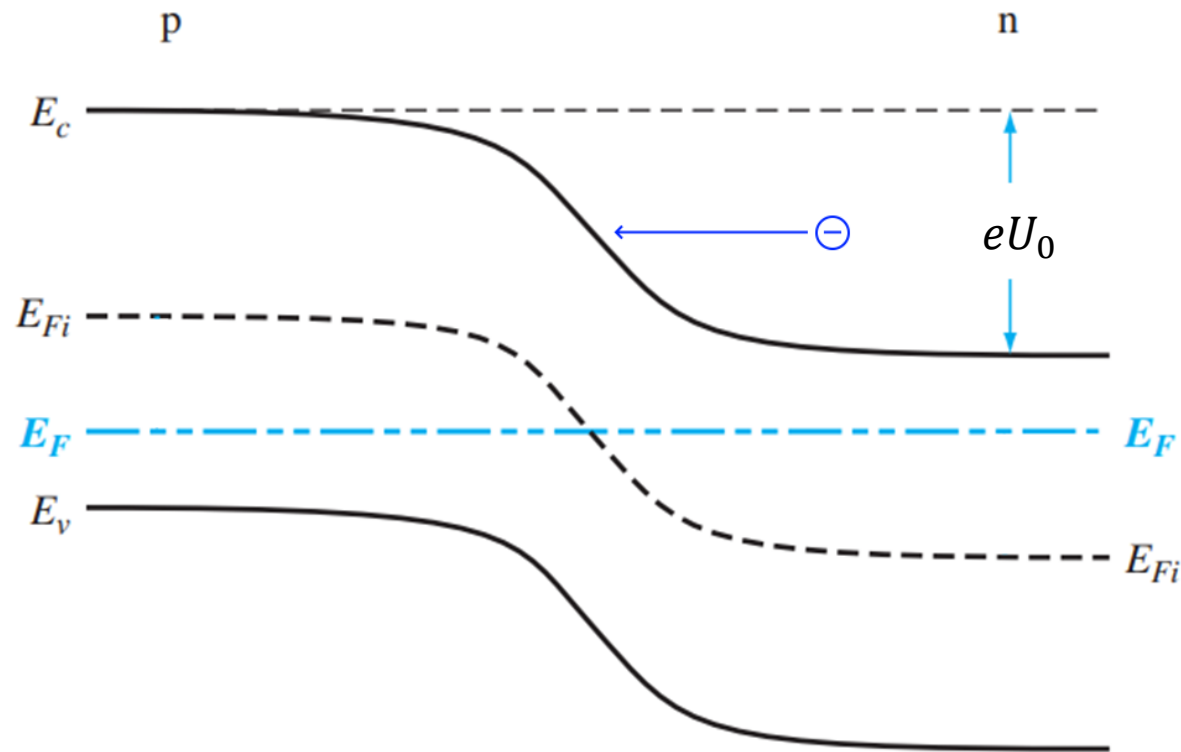
$$\varphi_t = \frac{kT}{e} = 0.0259 \text{ V} \quad \text{при } T=300\text{K}$$

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

Новото на Ферми трябва да бъде едно и също за целият кристал.

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 срещат „бариера“ когато се опитат да преминат в зоната на проводимост на P областта. Височината на тази бариера е  $eU_0$

При стайна температура (25 °C / 300K) бариерният потенциал за Si диоди е приблизително 0.7V.





Adolf Fick

$$J_D = -qD \frac{dq}{dx}$$

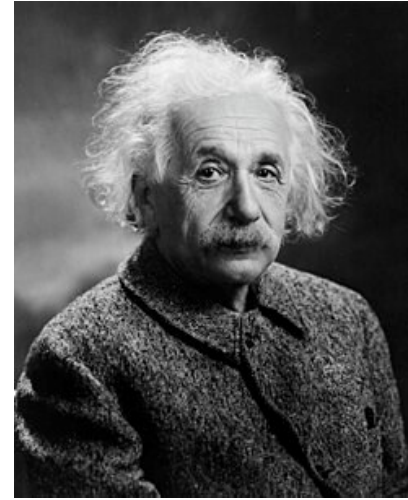
Закон за дифузията



Georg Simon Ohm

$$J_E = q\rho\mu E$$

Зако на Ом -  
Връзка между  
електрическо поле  
и ток



Albert Einstein

$$D = \varphi_T \cdot \mu$$

Връзка между  
коефициент на  
дифузия и  
подвижност на  
токоносителите.

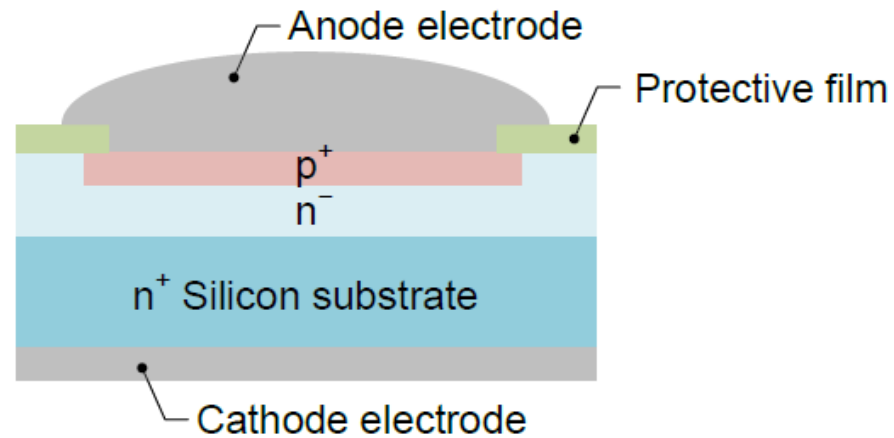


William Shockley

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

Уравнение на идеален PN-преход

# Формиране на PN преход



PN прехода се формира в полупроводников 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 р областите, се нарича металургичен граница.

Най-често, легирането се извършва посредством йонна имплантация.

При допирането на P и N полипроводници:

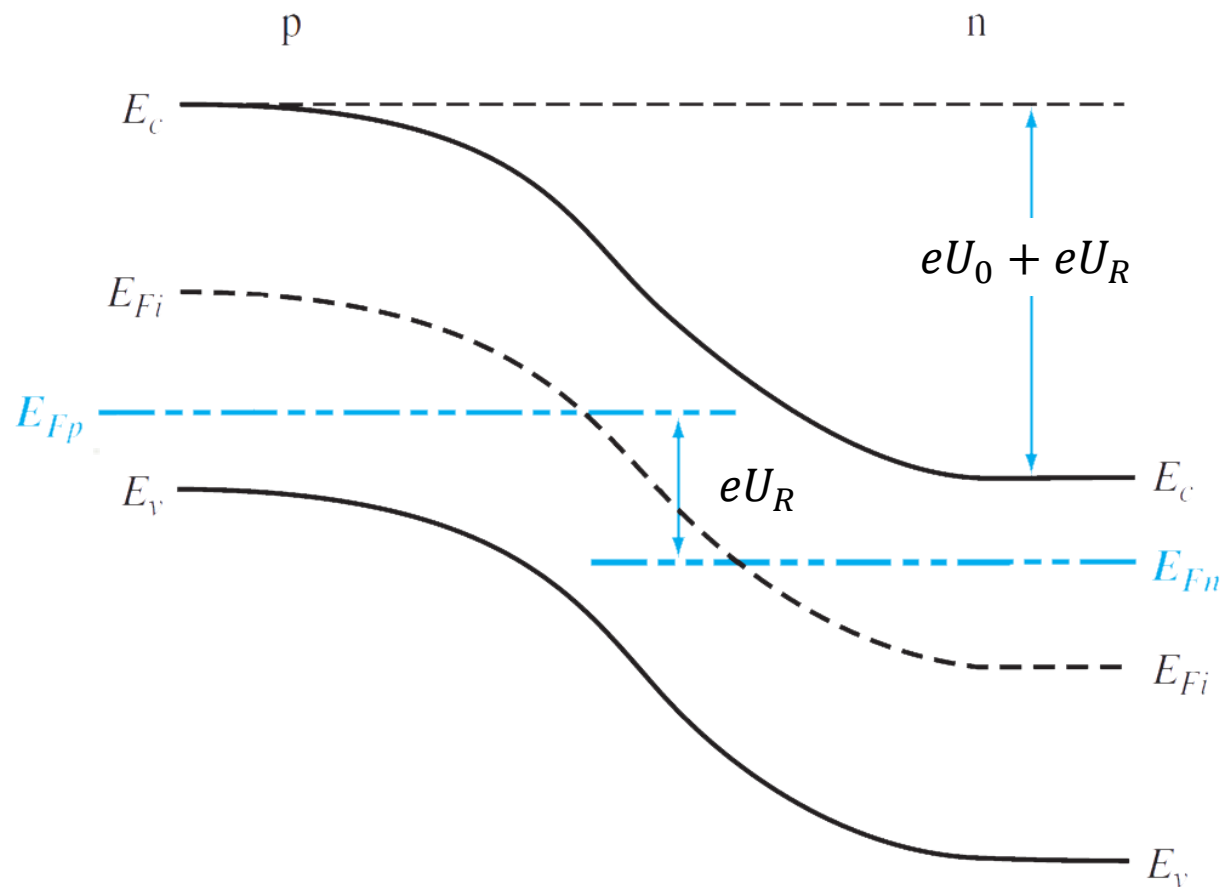
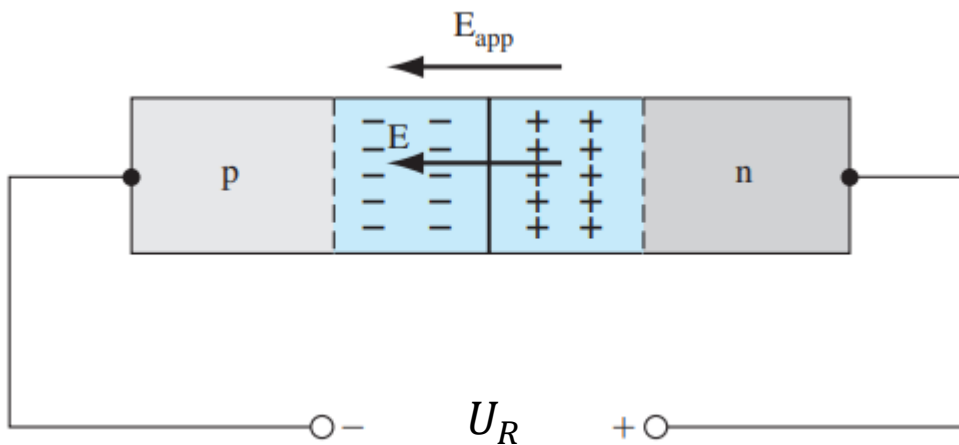
- Започва да тече дифузен ток: електрони от N към P областта и дупки в обратната посока
- Това създава обеднена област от фиксирани йони около PN прехода
- Тази област създава електрическо поле, което причинява дрейфов ток
- Равновесие се постига когато дрейфовият ток се изравнява с дифузият
- Това състояние се представя чрез изравняване на нивата на Ферми и чрез бариерен потенциал

В следващата лекция ще видим какво се случва когато приложим външно напрежение към PN преход намиращ се в равновесие.

Как можем да понижим потенциалната бариера и през PN прехода да протече ток или да я направим по висока.

Ще видим как работи диодът.

Обратно включване на PN 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 кристала.**

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.

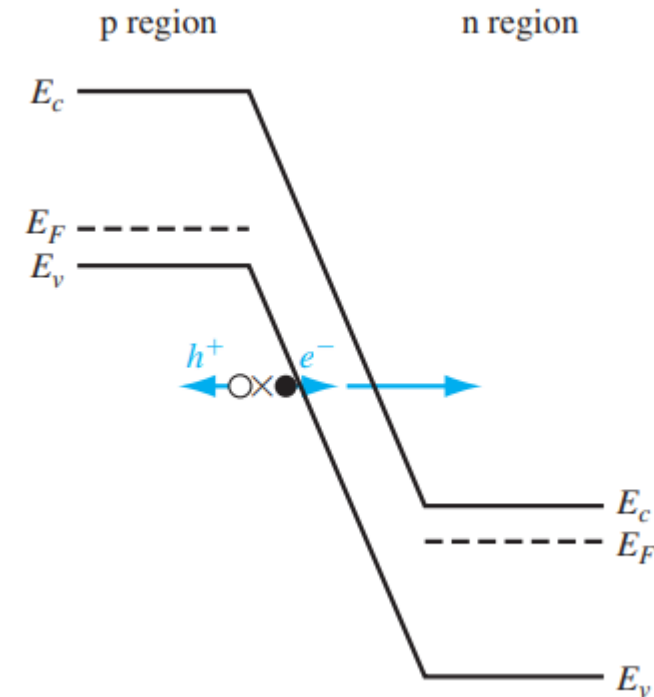
Приложеното напрежение в тази точка се нарича напрежение на пробив.

Съществуват няколко механизма на пробив:

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

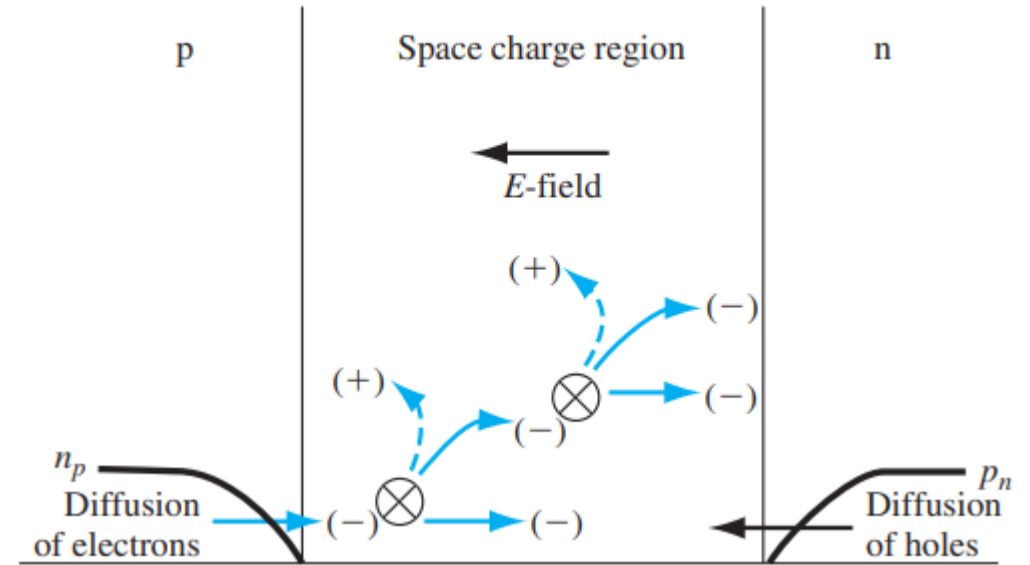
В силно легиран преход, енергийните зони от двете страни на прехода са достатъчно близки една до друга.

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.

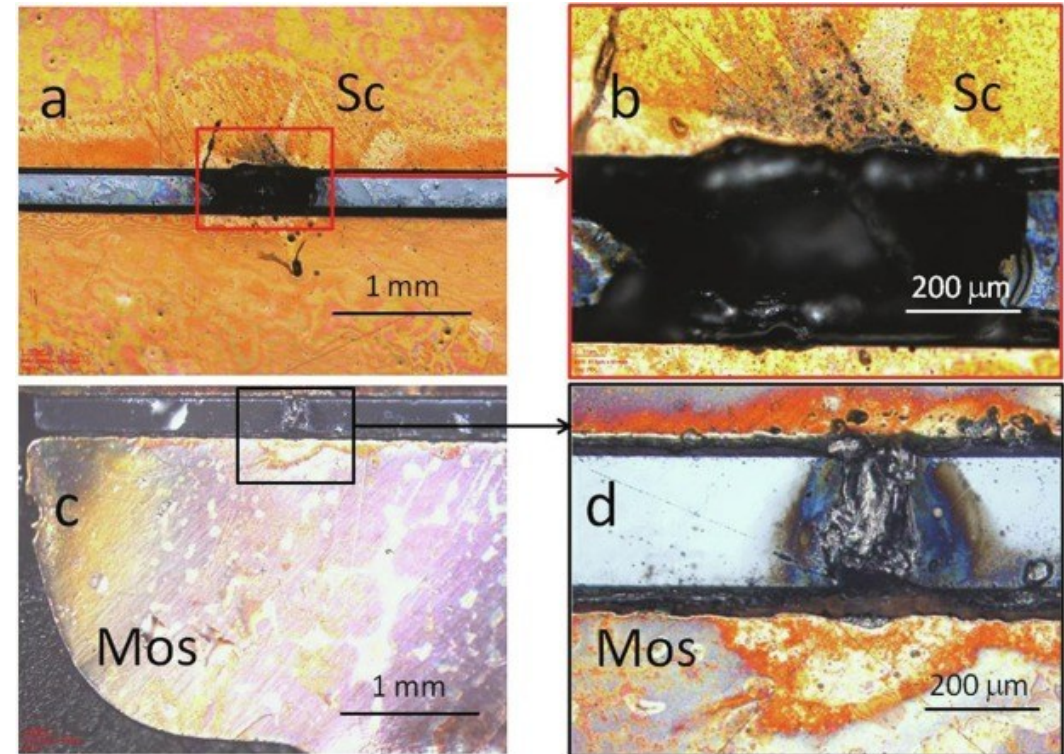


# Топлинен пробив

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**.

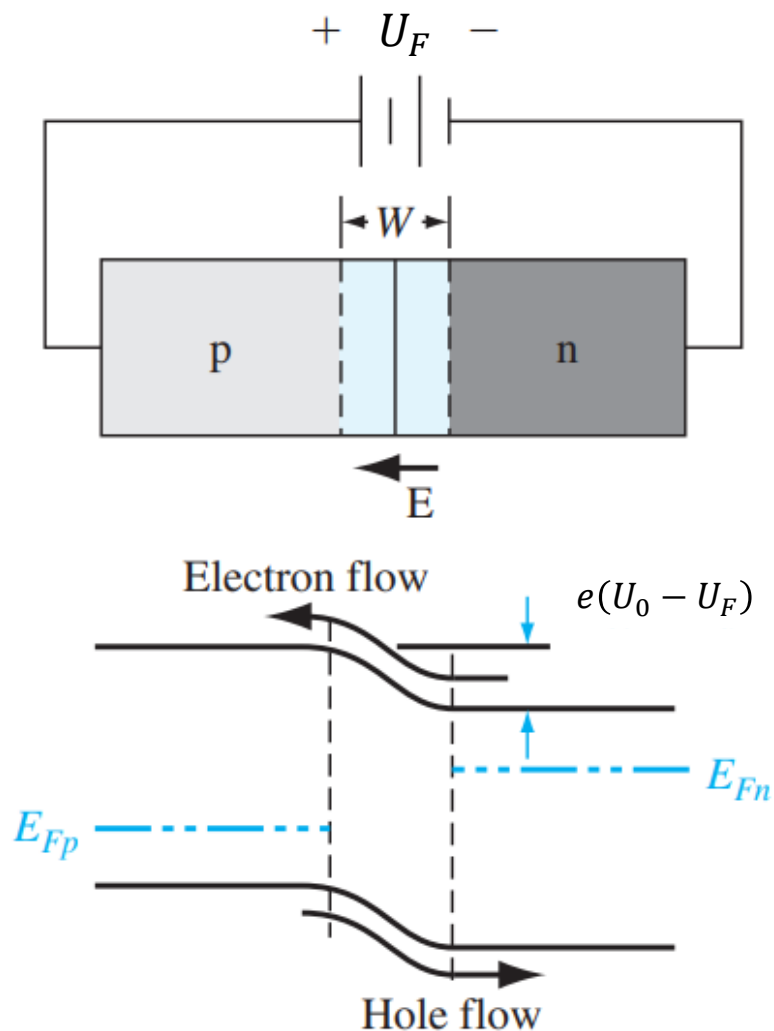
Рано или късно, това ще доведе до необратимо разрушаване на PN прехода.





Право включване на РN преход

## Право включване



Прилагаме положително напрежение към Р областта и отрицателно към N областта.

Нивото на Ферми в Р-областта сега е по-ниско от това в N-областта. Общата потенциална бариера вече е намалена:

$$E = e(U_0 - U_F)$$

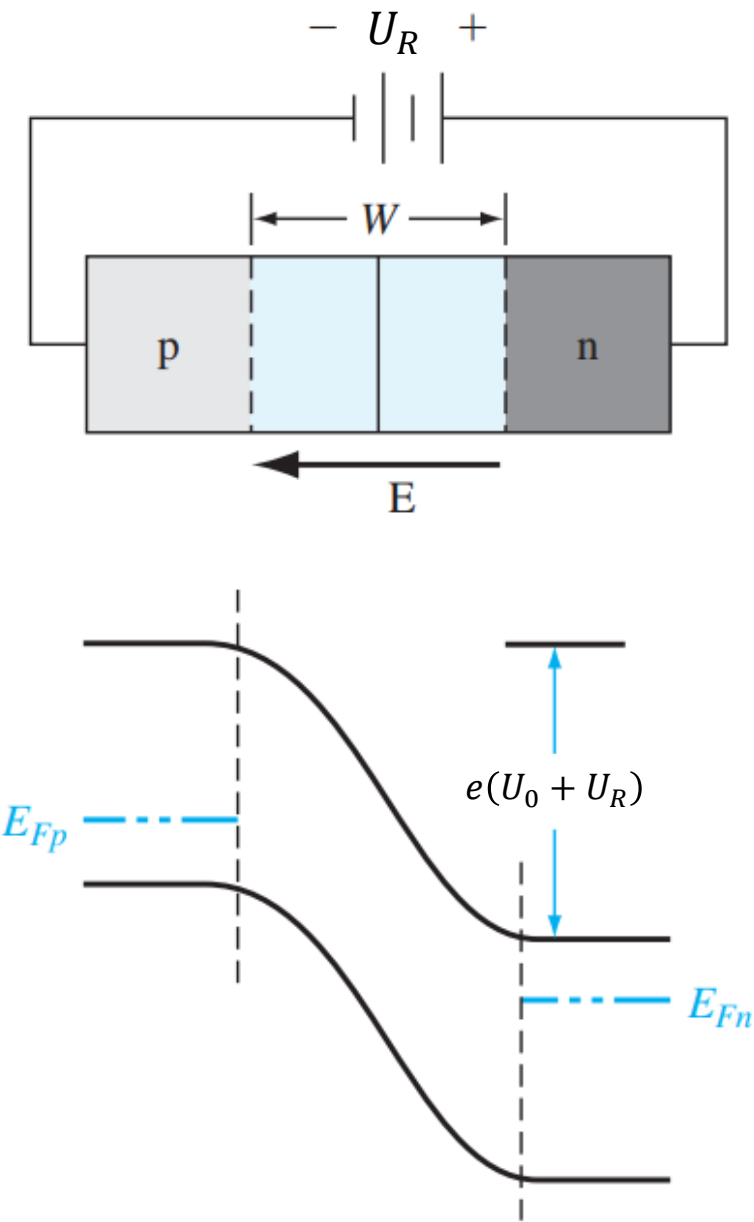
Намаленият бариерен потенциал вече не е в състояние да спре **дифузията** на токоносители:

- Дупки от Р-областта в N-областта
- Електрони от N-областта в Р-областта

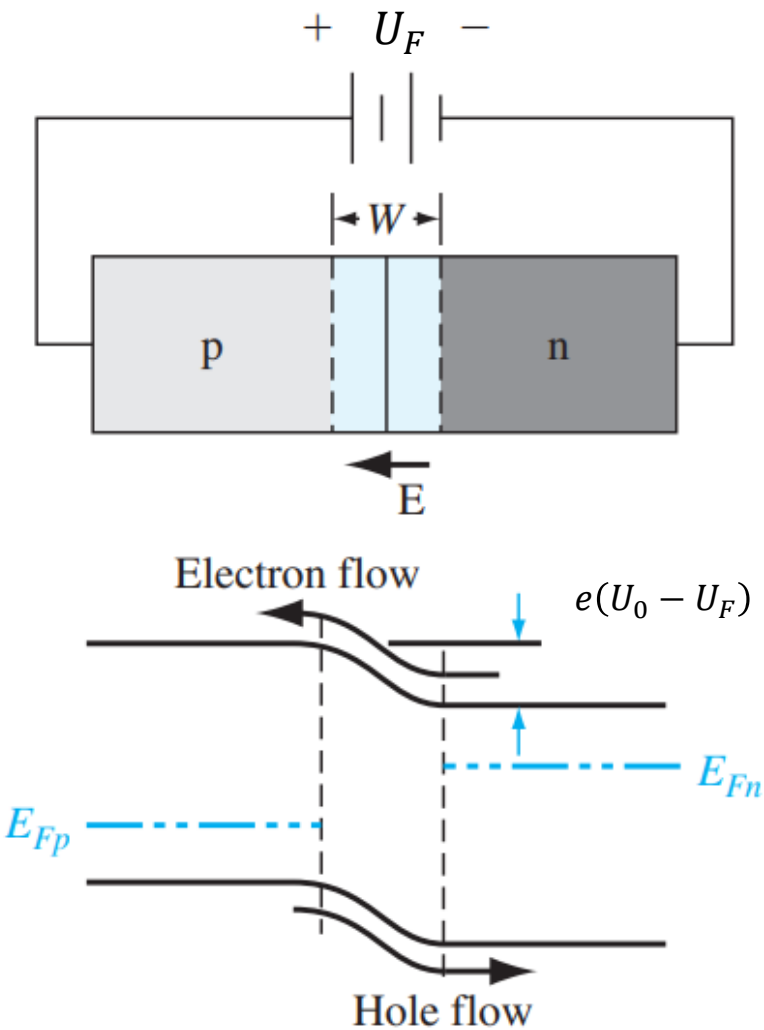
През PN прехода ще протече ток в **права посока: Р -> N**.

Сравнение

Обратно включване



Право включване



Влияние на температурата

## Влияние на температурата - обратно включване

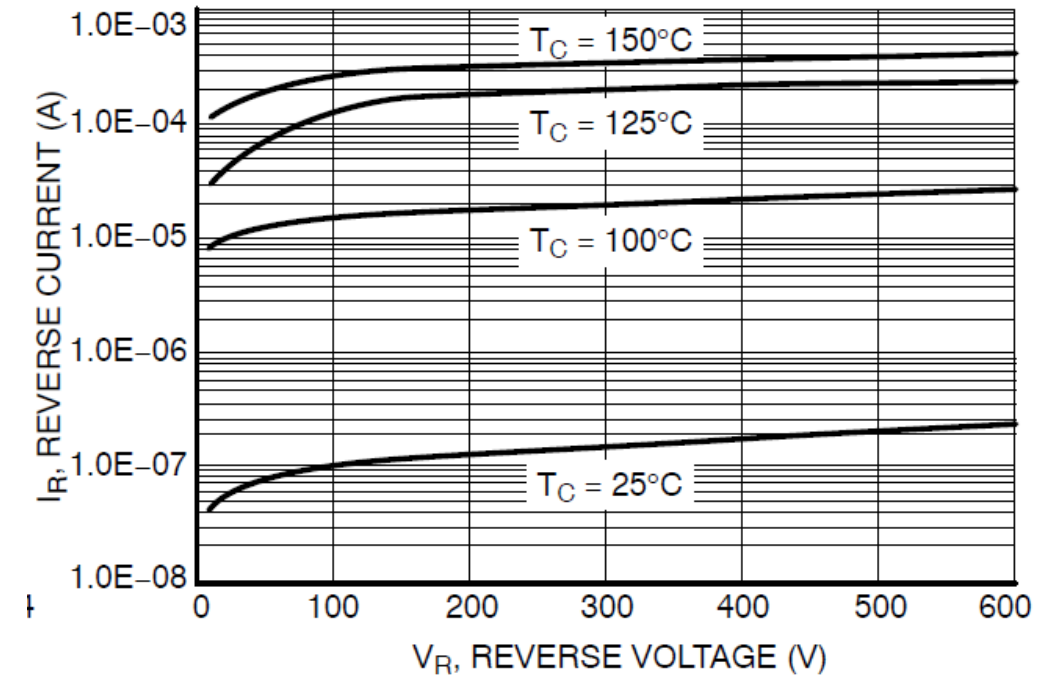
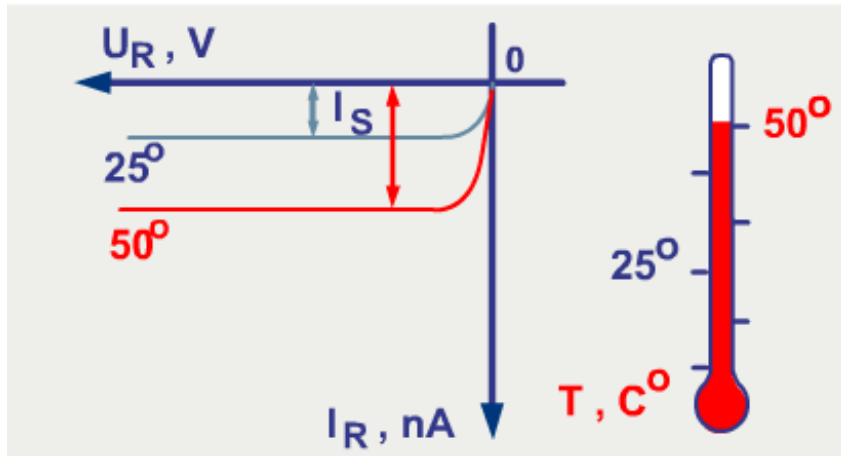
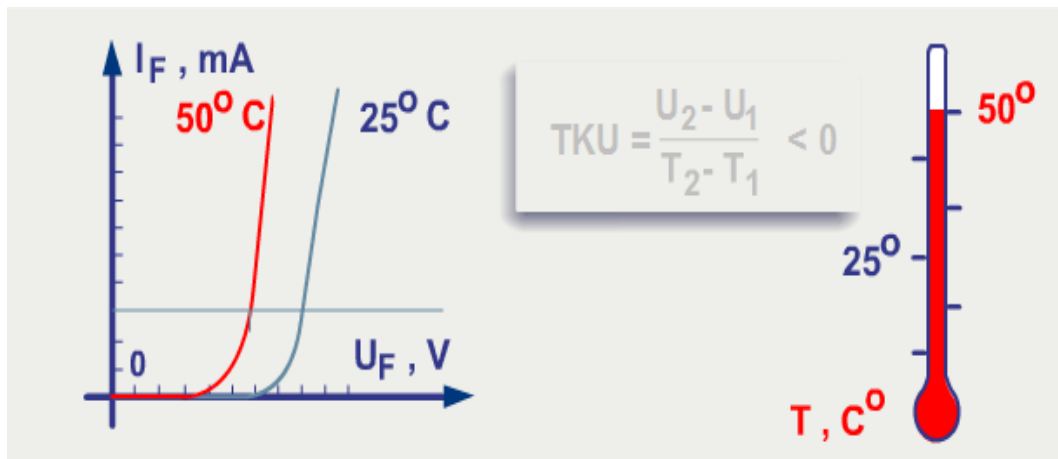


Figure 2. Typical Reverse Current

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



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

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

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.

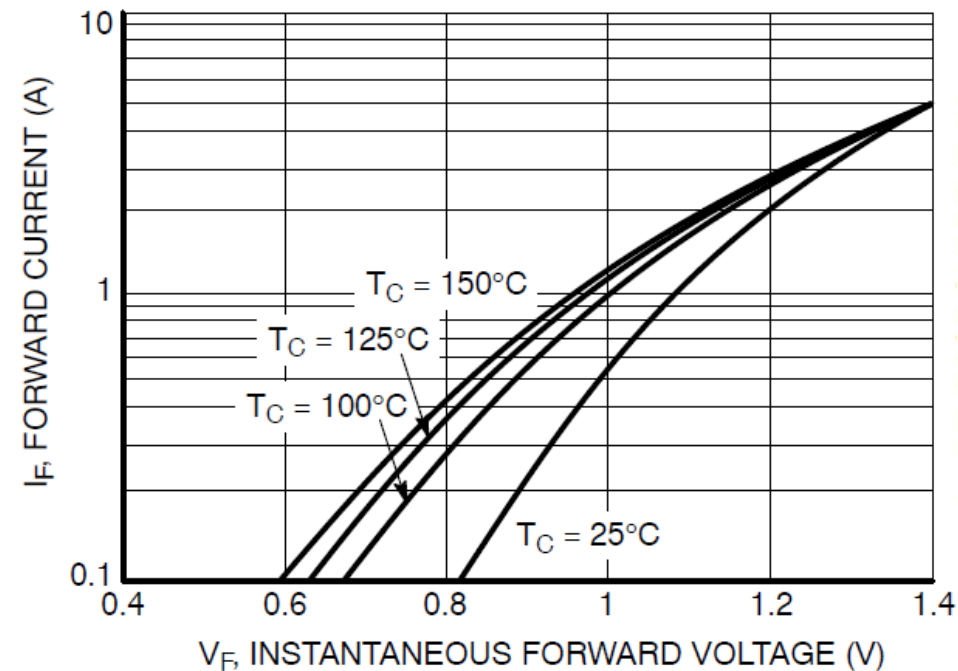


Figure 1. Typical Forward Voltage

Преход метал-полупроводник  
Преход на Шотки

# Зонна диаграма

Преди контакт:

нивото на Ферми в N-полупроводникът е над това в метала.

След осъществяване на контакт:

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

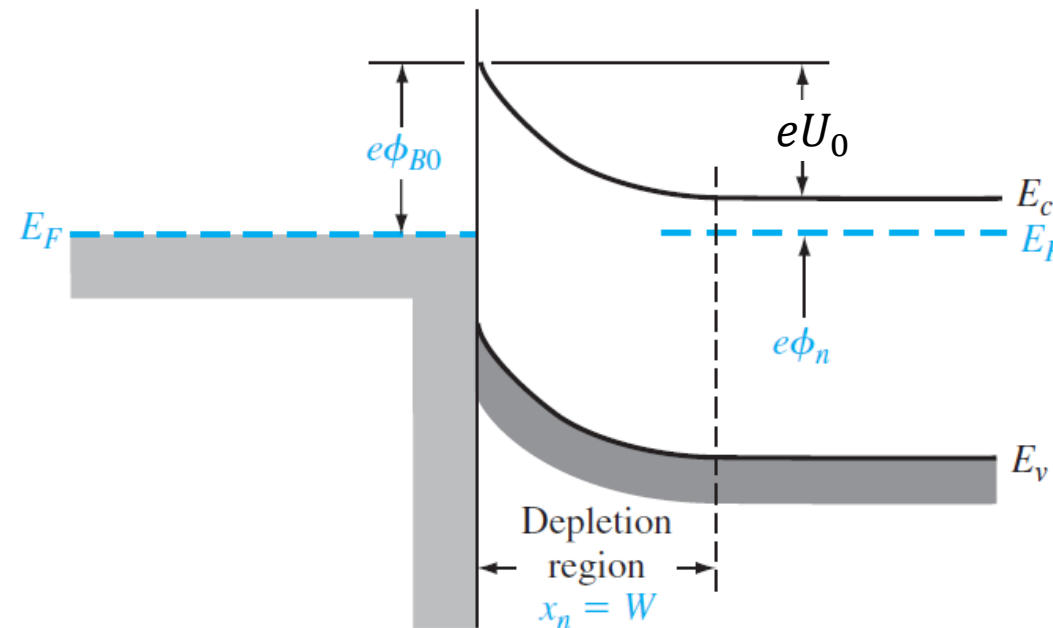
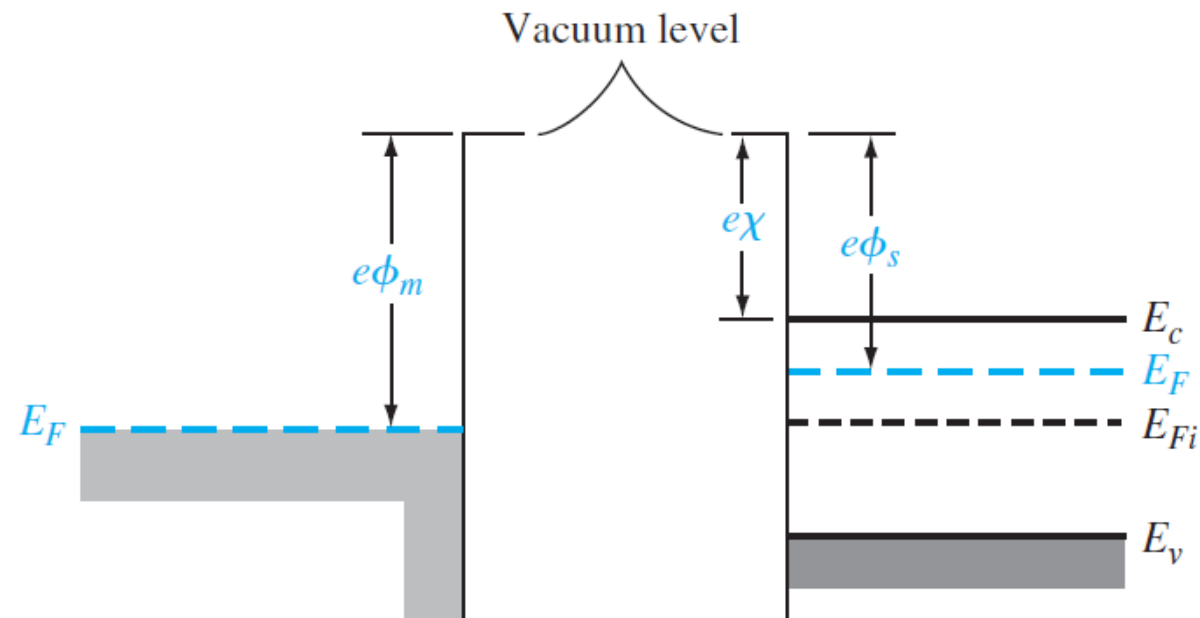
$\varphi_m$  - работна функция на метала

$\varphi_s$  - работна функция на полупроводника

$\chi$  – електронен афинитет на полупроводника

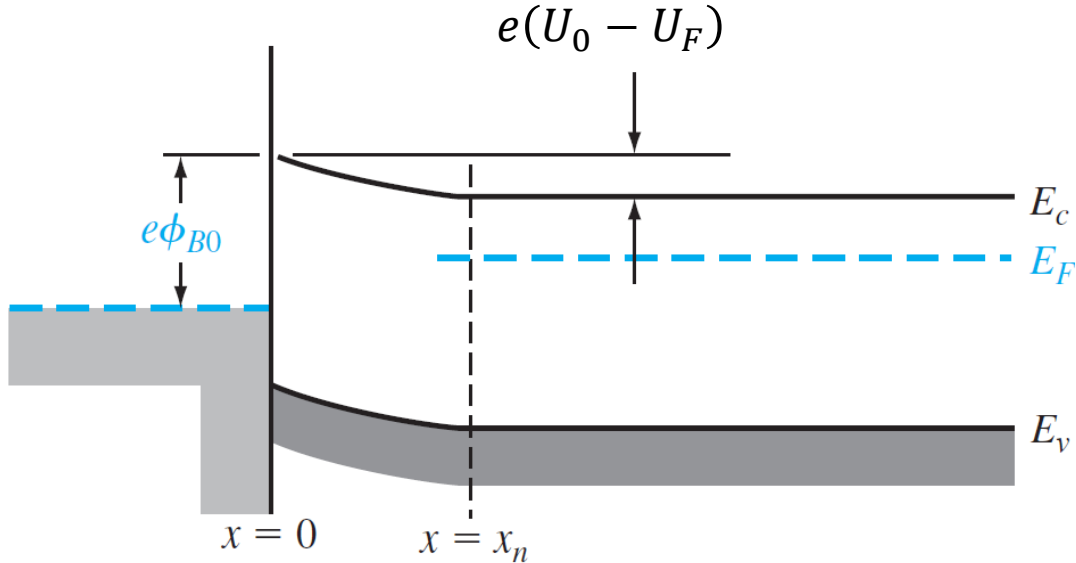
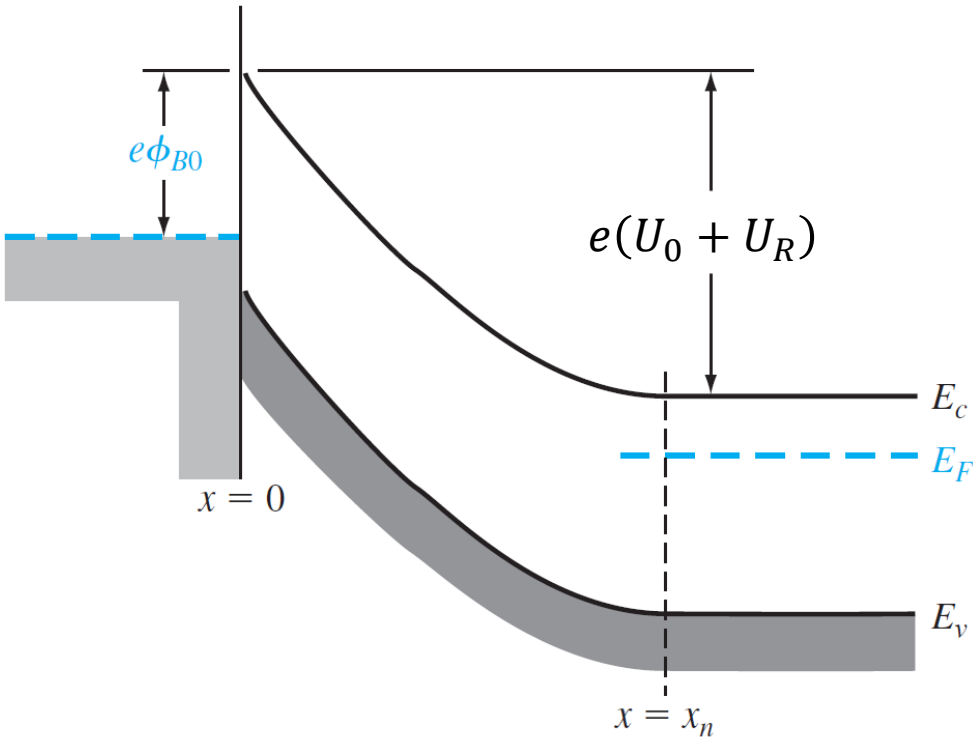
$\varphi_{B0} = \varphi_m - \chi$  – бариера на Шотки

$U_0 = \varphi_{B0} - \varphi_n$  - 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 карактеристика.

Съществена разлика, е че токът в прехода на Шотки се формира само от електрони – т.е. от основни токоносители.

# Сравнение на PN преход и преход метал-полупроводник

|                                 | PN преход   | Преход метал-полупроводник   |
|---------------------------------|---|--|
| компоненти                      | P-тип полупроводник и N-тип полупроводник   | Метал и полупроводник (N или P тип)  |
| Формиране на преход             | Причинява се от градиент на концентрацията. Електроните дифундират от N към P, дупките от P към N, създавайки обеднена област от двете страни на прехода. | Причинява се от разликата в работните функции на метал и полупроводник. Обеднената област се намира от страната на полупроводника. |
| Токоносители                    | Биполярно устройство: както основните така и неосновните токоносители са съществени. Токът в права посока се образува от неосновни токоносители.          | Еднополярно устройство: Проводимостта се обуславя само от основните токоносители.  |
| Пад на напрежени в права посока | Напрежението необходимо да преодолее бариерният потенциал и да започне инжектиране на неосновни токоносители. ~0.6V - 0.9V за силиций                     | Височината на бариерата е по-ниска. Падът на напрежението в права посока е ~0.2V - 0.4V  |
| Скорост на превключване         | По-ниска. Определя се от времето за разнасяне на неосновните токоносители – trr   | По-висока. Няма неосновни токоносители, които да трябва да бъдат разнасяни. Скоростта е ограничена само от капацитета на прехода.  |
| Обратен ток                     | Много малък – наноампери са силиций   | По-висок от този на PN прехода поради по-ниската потенциална бариера.  |
| Поведения                       | Изправител (диод с PN преход)   | Изправител (диод на Шотки) или омичен контакт. Зависи от легирането на полупроводника  |

# Шотки Преход или Омичен Контакт?

Поведението на преход метал-полупроводник се определя от работните функции на метала и полупроводника.

Работната функция представлява енергията необходима за преместване на електрон от материала във вакуум.

## **Шотки преход**

**Условие:** Работната функция на метала е по-голяма от тази на полупроводника.

**Какво се случва:** Електроните преминават от **полупроводника в метала** докато нивата на Ферми се изравнят.

**Резултат:** Потокът от електрони остава фиксиран положителен заряд в полупроводника, създавайки обеднена област и енергийна бариера. Тази бариера възпрепятства движението на електрони от полупроводника към метала.

**Поведение:** Преходът се държи като диод. Малко напрежение, приложено в права посока, преодолява парьерния потенциал и позволява протичането на ток. Напрежение, приложено в обратна посока, повишава бариерния потенциал и възпрепятства протичане на ток. Това е **диод на Шотки**.

# Шотки Преход или Омичен Контакт?

## Омичен преход

**Условие:** Работната функция на метала е по-малка от тази на полупроводника.

**Какво се случва:** Електроните преминават **от метала в полупроводника** докато нивата на Ферми се изравнят.

**Резултат:** Потокът от електрони създава излишък от електрони в полупроводника. Не се създава обеднена област и енергийна бариера, която да възпрепятства движението на електрони.

**Поведение:** Преходът се държи като обикновен проводник. Токът може да протича безпрепятствено и в двете посоки. Това е **омичен контакт**.

Дали ще се получи диод на Шотки или омичен контакт, зависи от концентрацията на примесите в полупроводника