

Pásová teorie

Elektron v obalu **izolovaného atomu** může mít jen některé (diskrétní) hodnoty energie.

K očíslování energií se používají kvantová čísla určující jednotlivé stavy:

n - hlavní kvantové číslo, $n = 1, 2, 3, \dots$

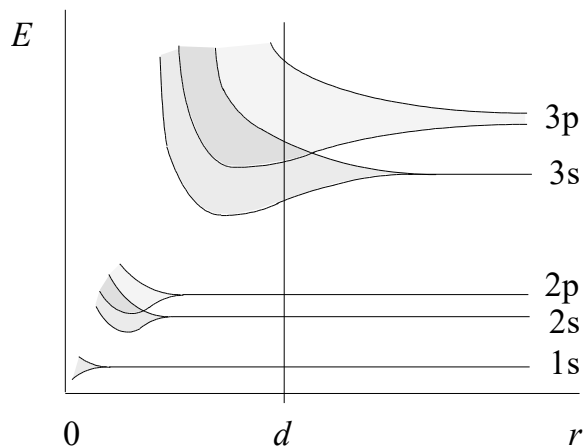
l - vedlejší kvantové číslo, $l = 0, 1, 2, \dots, n-1$

m - magnetické kvantové číslo, $m = \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$

m_s - spinové kvantové číslo $m_s = \pm 1/2$

Interakce s vnějším polem – přídavné energie - rozštěpení energetických hladin
(Starkův, Zeemanův jev)

Atomy s více elektrony - rozlišení energií i interakcemi jednotlivých elektronů obalu a dokonce i interakcemi s velmi slabým magnetickým momentem jádra (jemná a velmi jemná struktura spektrálních čar).



obr. 4

Krystalická látka – působí na sebe veliké množství elektronů – vznikají pásy energií
(obr. 4 r = vzdálenost atomů v krystalu)

Pásová teorie

Valenční pás

= energetický pás, vznikající z nejvyšší energetické hladiny valenčních elektronů

Vodivostní pás = energetický pás, vznikající z vyšší, původně neobsazené hladiny

Zakázaný pás = energetický pás bez dovolených energetických hladin
(odděluje pás vodivostní a valenční)

U krystalické látky může dojít ke 3 možnostem:

1. Valenční pás není zcela obsazen elektrony, některé energetické hladiny jsou v něm volné.
2. Původně zcela zaplněný valenční pás splývá s vodivostním pásem.
3. Valenční pás je zcela zaplněn, neobsahuje žádnou volnou hladinu, vodivostní pás je zcela prázdný.

1, 2 – elektrické vodiče

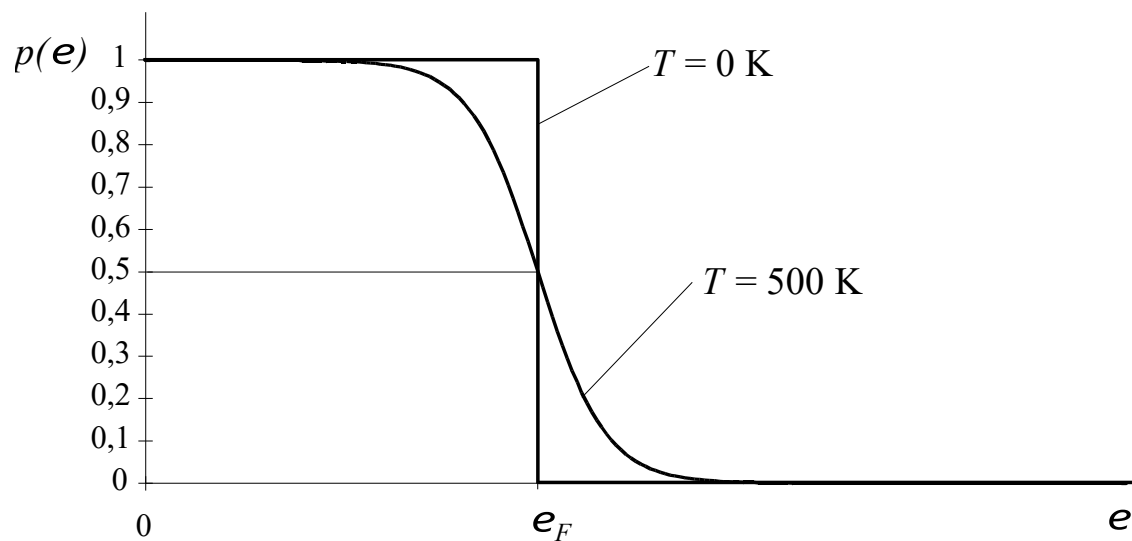
3 – elektrické izolanty

Vedení elektrického proudu v kovech

Elektrony v kovech (látky typu 1, 2) tvoří **elektronový plyn**, který se řídí Fermiho-Diracovou statistikou. Podle tohoto statistického rozdělení je energetická hladina ε ve vodivostním pásu obsazena při termodynamické teplotě T s pravděpodobností:

$$p(\varepsilon) = \frac{1}{e^{\frac{\varepsilon - \varepsilon_F}{kT}} + 1}$$

ε_F je Fermiho energie
 = hranice ve vodivostním pásu, pod níž jsou při $T \rightarrow 0$ všechny hladiny s $\varepsilon < \varepsilon_F$ obsazené, všechny hladiny s $\varepsilon > \varepsilon_F$ volné

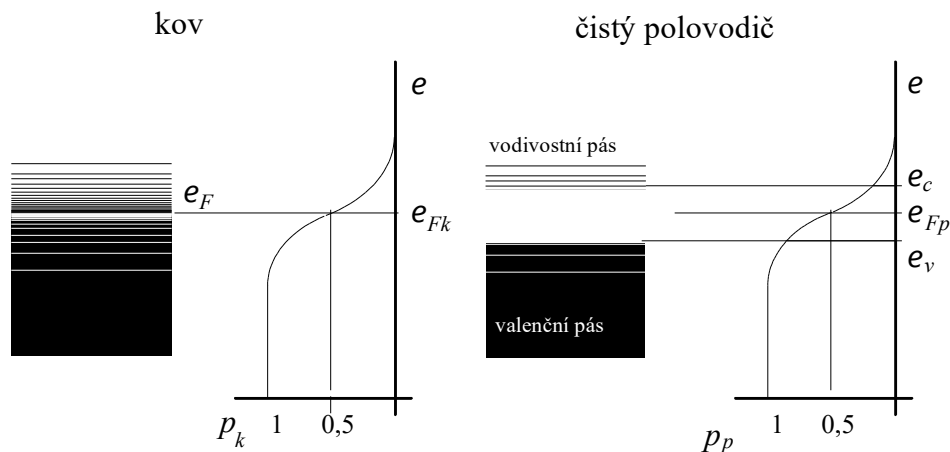


obr. 5

Vlastní vodivost polovodiče

Látky podle bodu 3 a šířkou zakázaného pásu $>2\text{eV} = \text{izolanty}$.

Pokud je šířka zakázaného pásu malá ($<2\text{eV}$), může již při pokojových teplotách nastat případ, při kterém se některému elektronu z valenčního pásu dodá kumulací energií tepelných kmitů mřížky tak velká energie, že může přejít do vodivostního pásu = **polovodič**



obr. 7

V čistém monokrystalu je koncentrace volných elektronů rovna koncentraci děr = **vlastní (intrinzní) vodivost polovodiče**

Střední doba života volného elektronu je od 10^{-9}s do 10^{-6}s . Po uplynutí této doby se elektron setká s dírou a dojde k rekombinaci. Energie se přitom uvolní ve formě fononu, který je pohlcen krystalovou mřížkou

Přejde-li elektron z valenčního do vodivostního pásu, stává se z něho **volný elektron** – může se volně pohybovat po krystalu.

Po takto excitovaném elektronu vznikne ve valenčním pásu volná pozice = **díra**, na jejíž místo se může přesunout jiný elektron valenčního pásu.

Příměsová vodivost polovodiče

Příměsový (nevlastní) polovodič = polovodič s příměsmi cizích atomů.

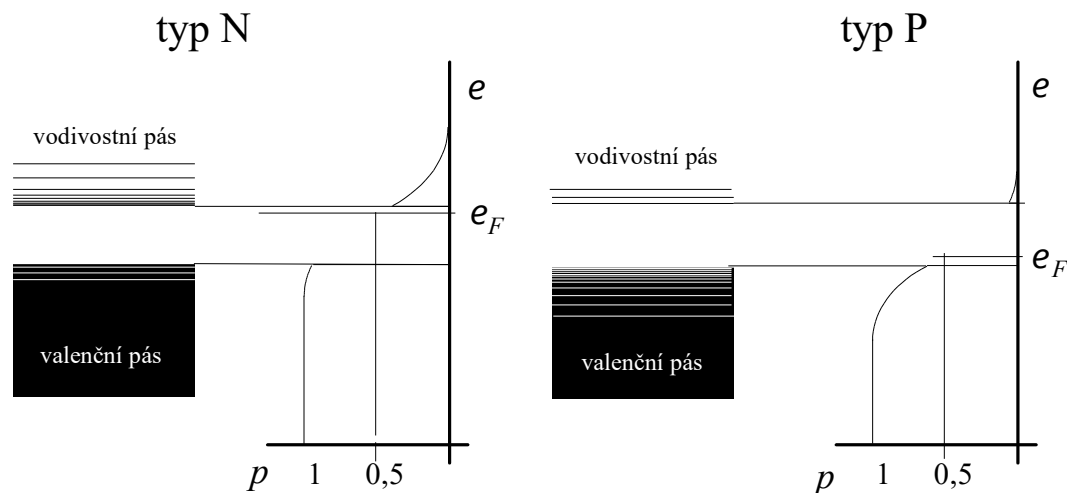
Příměsi mají diskrétní energetické hladiny, které se mohou nacházet i uvnitř zakázaného pásu.

Polovodič typu N – příměsi v blízkosti vodivostního pásu ve vzdálenosti desetin až tisícin elektronvoltů. Elektron přechází z této hladiny do pásu vodivostního již při velmi nízkých teplotách s pravděpodobností blízkou jedné. Z atomu příměsi se tak stane kladný iont, který je vázán v krystalické mříži a k vodivosti nepřispívá. Příměsi se označují jako donory a izolované hladině v blízkosti vodivostního pásu se říká donorová hladina. U čtyřmocného křemíku, jsou typickými donorovými příměsmi pětimocné prvky: P, As, Sb

Polovodič typu P – příměsi v blízkosti valenčního pásu. Elektron přechází při nízkých teplotách z valenčního pásu na příměsovou hladinu. Z atomu příměsi se tak stane záporný iont, ve valenčním pásu vzniká díra. Příměsi se označují jako akceptory a izolované hladině v blízkosti vodivostního pásu se říká akceptorová hladina. U čtyřmocného křemíku, jsou typickými akceptorovými příměsmi trojmocné prvky.

Příměsová vodivost polovodiče

Souhrnně se polovodiče typu P a N označují jako nevlastní nebo příměsové polovodiče, převládající nositelé elektrického proudu se označují jako **majoritní**, menšinové nositele pak označujeme pojmem **minoritní**. Vodivost příměsových polovodičů na rozdíl od **intrinzní** vodivosti vlastních polovodičů nazýváme vodivostí **příměsovou (extrinzní, nevlastní)**



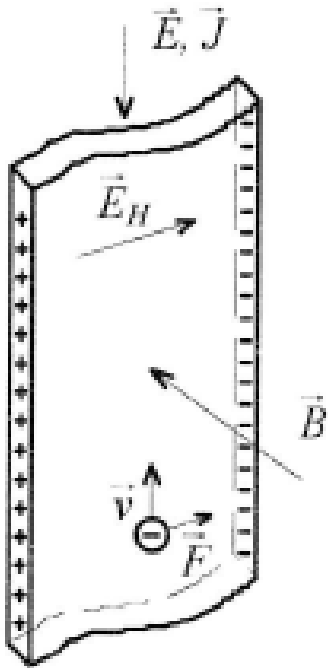
obr. 8

Nevlastní vodivost mohou vyvolat i poruchy v krystalové mříži. Některé polovodiče se vyskytují jen jako typ N: ZnO, BaO, TiO, jiné jen jako typ P: CuO, NiO, SnO, SbS, Se, Te

Některé polovodiče lze dotovat příměsmi obou druhů a vyvolat tak vodivost obou typů. Takovým polovodičům říkáme **amfoterní** a patří k nim Si, Ge, GaAs, GaP, PbS, PbTe, PbSe, SiC.

Hallův jev

Vznik příčného elektrického pole ve vodiči, kterým protéká elektrický proud a je umístěn v magnetickém poli.



Na elektrony (díry) pohybující se v magnetickém poli působí Lorentzova síla:

$$F = q \cdot v \times B$$

Pro elektron: $F = -e \cdot v \times B$

Pro díru: $F = +e \cdot v \times B$

Polovodič N: hromadění elektronů v pravé části. (viz obr)

Polovodič P: díry se pohybují opačným směrem + opačný náboj = směr Lorentzovy síly se nezmění - hromadění děr také v pravé části – opačná polarita Hallova napětí.

Čistý polovodič: hromadění elektronů i děr v pravé části – rekombinace – snížení vodivosti - magnetorezistory

Velikost Hallova napětí:

$$U_H = E_H \cdot d$$

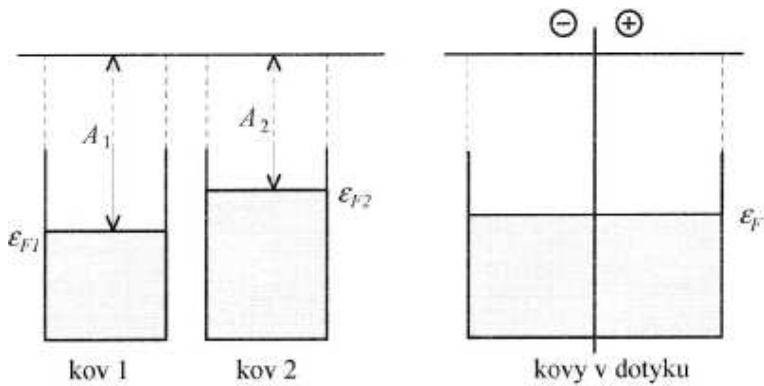
$$E_H = R_n \cdot B \cdot J$$

$$R_n = r \cdot \frac{1}{n_e \cdot e}$$

$$\left(R_p = -r \cdot \frac{1}{n_d \cdot e} \right)$$

Hallův jev je významnější u polovodičů než u kovů (nižší koncentrace nositelů náboje)

Rozhraní polovodič-kov

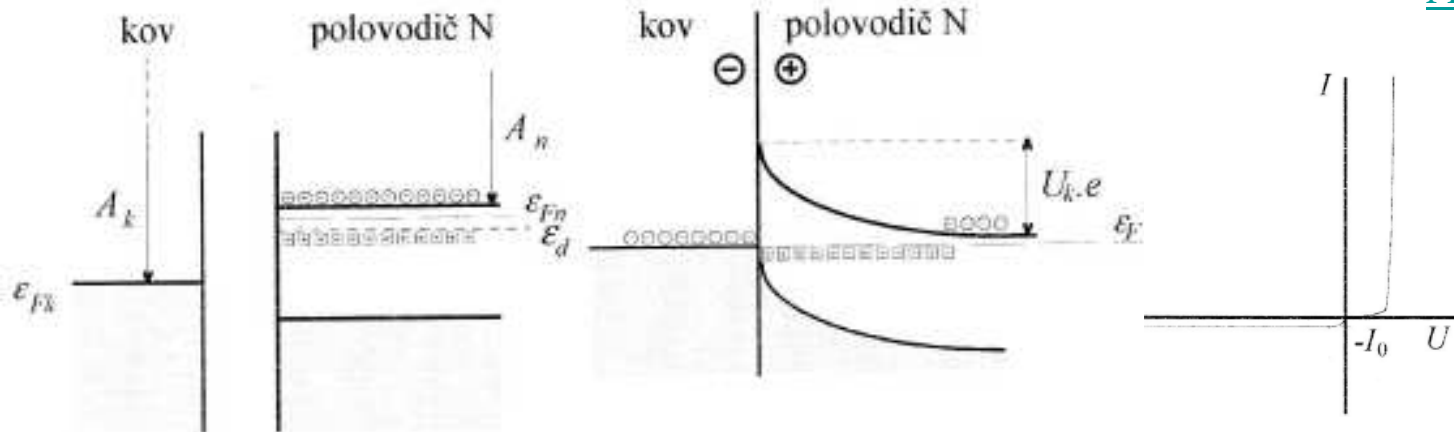


Dotyk dvou kovů – difúze elektronů z kovu s nižší výstupní prací do kovu s vyšší výstupní prací – vyrovnání fermiho hladin – vznik kontaktního napětí:

$$U_D = \frac{A_1 - A_2}{e}$$

[Animace kov-N](#)

[Animace kov-P](#)



$$J = J_0 \left(e^{\pm \frac{eU}{kT}} - 1 \right)$$

J_0 – limitní pr. h. v závěrném směru

Dotyk polovodiče N a kovu – difúze elektronů z polovodiče (nižší výstupní práce) do kovu (vyšší výstupní práce) – vyrovnání fermiho hladin – vznik difúzního napětí – energetická bariéra – hradlová vrstva

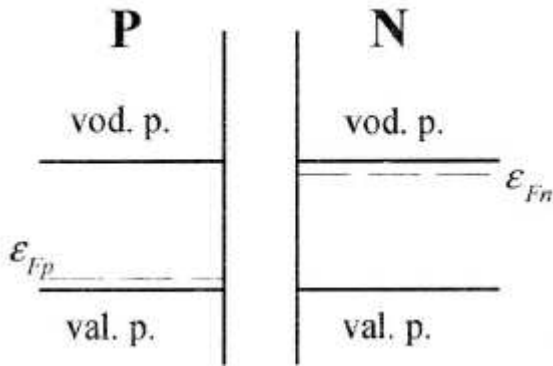
Připojení vnějšího napětí – zvyšování a snižování energetické bariéry – usměrňující účinky

Usměrňující účinky pouze v případě $A_K > A_n$ nebo $A_K < A_p$

Přechod P-N

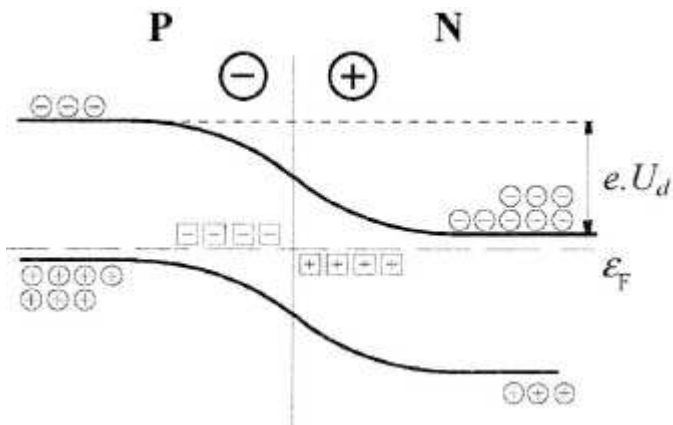
Pro zjednodušení uvažujeme kontakt dvou původně oddělených částí P a N
 P-N přechod však musí být vytvořen v jednom monokrystalu!!

Nutný předpoklad: $A_n < A_p$

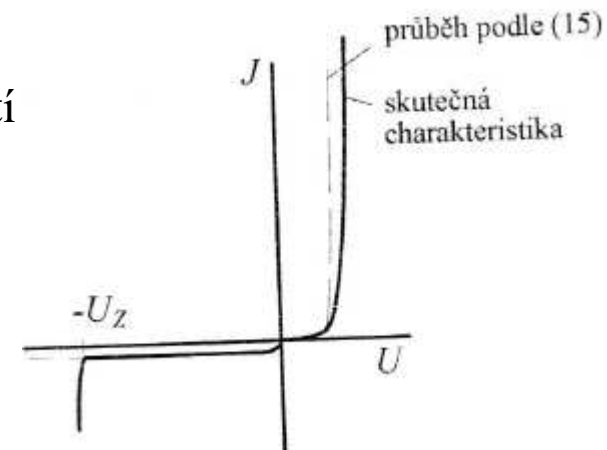


[Animace P-N](#)

Dotyk částí N a P – difúze elektronů do P, difúze děr do N
 – rekombinace – vyrovnání fermiho hladin – vznik
 difúzního napětí – energetická bariéra – hradlová vrstva

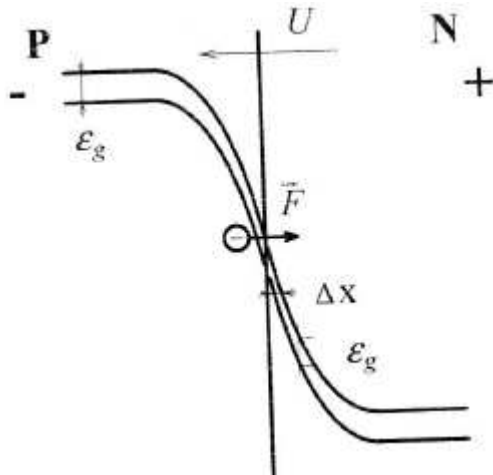


Připojení vnějšího napětí
 – zvyšování a snižování
 energetické bariéry –
 usměrňující účinky



Zenerův a lavinový jev

- Nárůst proudu v závěrném směru po překročení určitého napětí $U \gg U_D$



Zenerův jev - zvyšování napětí – silné elektrické pole –
malá šířka energetické bariéry – kvantově mechanický jev
– tunelový jev

[Animace zenerův jev](#)

[Animace lavinový jev](#)

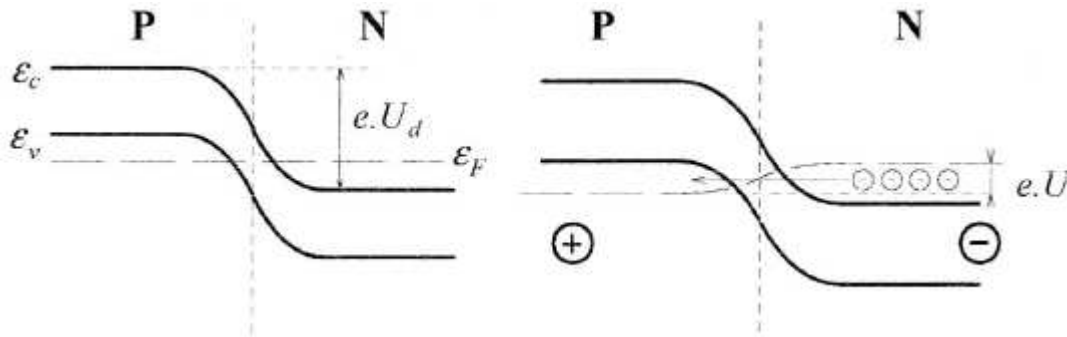
Lavinový jev – P-N přechodem procházejí minoritní
nositelé – jejich urychlování elektrickým polem – při
srážce generují nové nositele – tzv. vnitřní ionizace

Tyto dva jevy nelze rozlišit dle V-A charakteristiky.

Při nižších napětích – zenerův jev

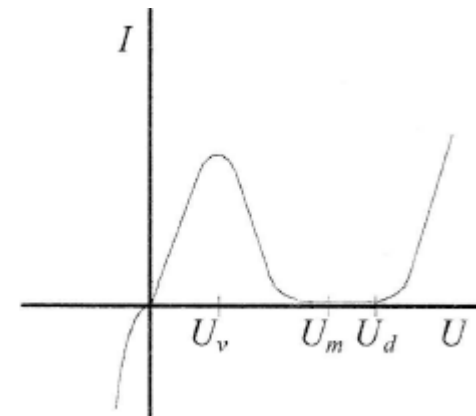
Při vyšších napětích – lavinový jev (nad 6V)

Tunelový jev v propustném směru



[Animace tunelový jev](#)

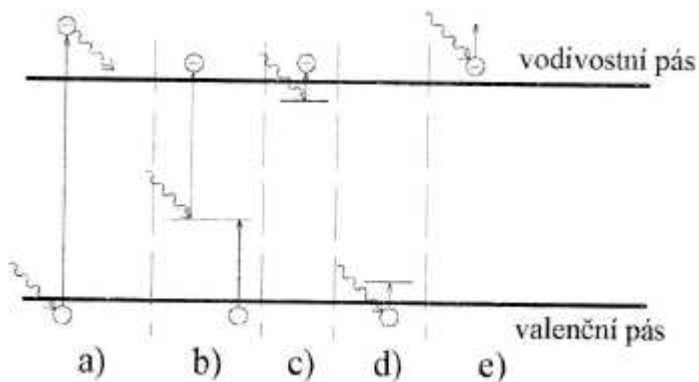
Silně dotované polovodiče – fermiho hladina ve valenčním a vodivostním pásu – tunelování při malém napětí v propustném směru



Fotoelektrické jevy

Vnější fotoelektrický jev – (jako u kovů) elektron přijme energii fotonu a opouští materiál

Vnitřní fotoelektrický jev – excitace elektronu z různých energetických hladin
generování nositelů – zvýšení vodivosti



[Animace fotoelektrický jev](#)

Fotovoltaický jev – generování nositelů v P-N přechodu – nositelé putují ve směru difúzního napětí – P se stává kladným pólem, N záporným

Elektroluminiscenční jev – rekombinace elektronů a děr v rekombinačních centrech – vyzáření fotonu

Tranzistorový jev

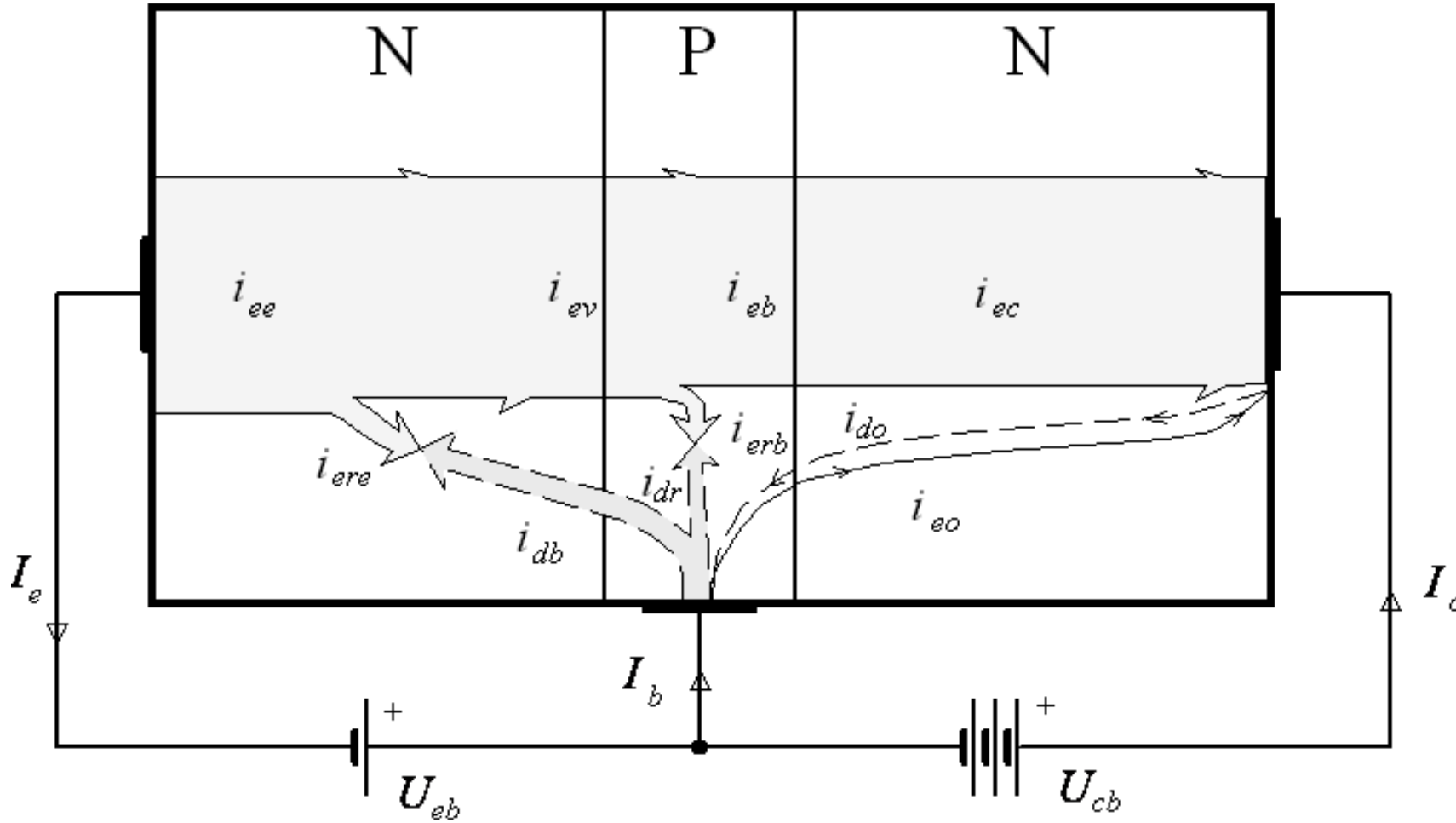
Podmínky vzniku:

1. Monokrystal se dvěma přechody PN (struktura PNP nebo NPN).
2. Prostřední oblast - **báze**, musí být velmi tenká.
3. Koncentrace majoritních nositelů v jedné z krajních oblastí musí být výrazně větší než koncentrace majoritních nositelů v bázi - **emitor**, druhá krajní oblast - **kolektor**.
4. Přechod mezi emitorem a bází musí být polarizován vnějším napětím do propustného směru.
5. Přechod mezi kolektorem a bází musí být polarizován vnějším napětím do závěrného směru.

Přechod emitor-báze je polarizován v propustném směru, elektrony z emitoru procházejí do báze kde rekombinují s děrami, díry báze procházejí do emitoru, kde rekombinují s volnými elektrony. Protože je oblast emitoru mnohem silněji dotována, volných elektronů vysílaných z emitoru je mnohem více než děr vysílaných z báze. V oblasti báze se hromadí volné elektrony. Oblast báze je velmi tenká, velký potenciálový spád mezi bází a kolektorem strhává volné elektrony do oblasti kolektoru.

[Animace tranzistorový jev](#)

Tranzistorový jev



$$I_e = i_{ee} = i_{ev} + i_{db}$$

$$I_e = i_{ec} + i_{dr} + i_{db}$$

$$I_b = i_{dr} + i_{db} - i_{do} - i_{eo}$$

$$I_b = i_{dr} + i_{db}$$

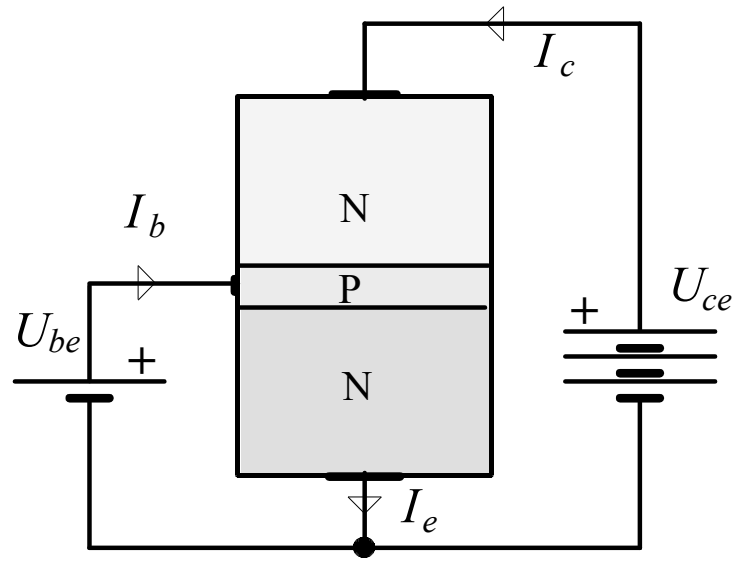
$$\alpha = \frac{I_c}{I_e}$$

$$I_c = i_{ec} + i_{do} + i_{eo}$$

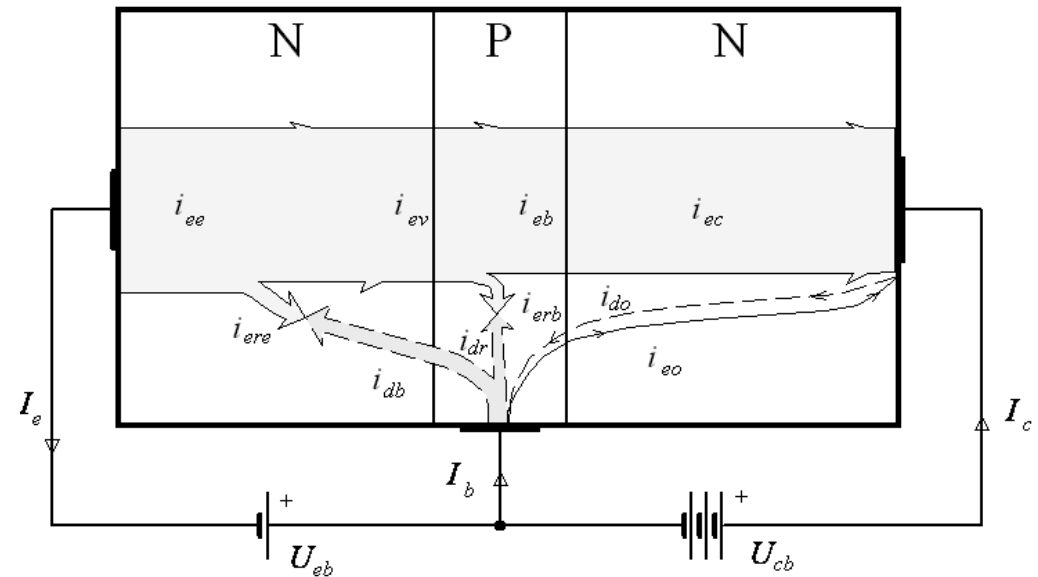
$$I_c = i_{ec}$$

α = proudový zesilovací čísel tranzistoru v zapojení se společnou bází, (0,9 až 0,999)

Tranzistorový jev



obr. 29



$$\beta = \frac{I_c}{I_b} = \frac{I_c}{I_e - I_c} = \frac{\frac{I_c}{I_e}}{1 - \frac{I_c}{I_e}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

β = proudový zesilovací činitel tranzistoru v zapojení se společným emitorem, (10 až 1000)