

1

Polovodiče – základní pojmy, vlastnosti. Přechody, diody, jejich struktura, vlastnosti a aplikace.

Vypracoval: Vojta

Polovodiče:

Rozdělení pevných látek na základě velikosti zakázaného pásu. Zakázaný pás (W_g) je mezi valenčním pásem (W_v) a vodivostním pásem (W_c). V zakázaném pásu nemůže být žádný elektron.

Prvek vede proud, pokud valenční pás není plně obsazen elektrony (\Rightarrow vodivostní pás obsahuje elektrony).

Velikost zakázaného pásu a měrná vodivost látek při teplotě 300K

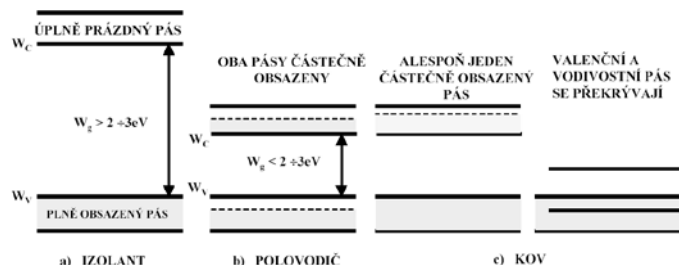
Izolanty: $W_g > 2$ až 3 eV $\rho = 10^{10}$ až $10^{20} \Omega\text{m}$

Polovodiče: $W_g < 2$ až 3 eV ($W_g \text{ Si}=1,12$ eV) $\rho = 10^{-2}$ až $10^9 \Omega\text{m}$

Vodiče (kovy): $\rho = 10^{-6}$ až $10^{-3} \Omega\text{m}$

U vodičů se valenční a vodivostní pás buď překrývá, nebo není jeden z nich plně obsazen.

S klesající teplotou měrný odpor *kovů* klesá (vodivost roste), naopak měrný odpor (vodivost) *polovodičů* roste (klesá). Při 0K *kovy* přecházejí do supravodivého stavu, *polovodiče* (i s příměsí) se chovají jako izolanty (valenční pás je plně obsazen).



Fermiho hladina: fiktivní hladina energie, při níž je 50%-ní pravděpodobnost, že se elektron vyskytuje nad nebo pod touto hladinou.

Vlastní (intrinsický) polovodič:

- Mezi polovodiče řadíme prvky 4. skupiny period. tab. prvků (\Rightarrow mají 4 valenční elektrony): Uhlík (C), Křemík (Si), Germanium (Ge), (Cín (Sn), Olovo (Pb))
- Mají kovalentní vazbu (je těsná a pevná). Koncentrace atomů křemíku $N_{\text{Si}}=5 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$
- Koncentrace nosičů náboje n_i v polovodiči je konstantní. Má stejný počet elektronů a děr. $n = p = n_i$ (n , p - koncentrace elektronu, děr; n_i - intrinsická koncentrace, $n_i \text{ Si} = 1,5 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-3}$ pro $T=300\text{K}$)
- W_F leží uprostřed zakázaného pásu
- Generace - dodáním tepelné energie dojde ke vzniku páru elektron-díra \Rightarrow polovodič může vést el. proud. Využívá ji například fotodiody.
- Rekombinace - elektron obsadí díru a dojde k zániku páru elektron-díra. Využívá ji například LEDka.

Nevlastní (extrinický) polovodič

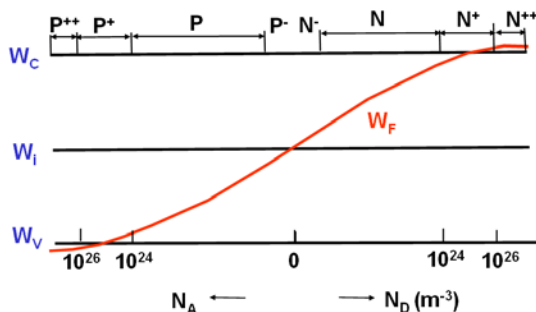
Polovodič typu P - přidáme prvek ze 3. skupiny (*akceptor* = příjemce valenčního elektronu): Bor (B), Hliník (Al), Galium (Ga), Indium (In), (*Thalium (Th)*)

Polovodiče typu N - přidáme prvek z 5. skupiny (*donor* = dárce valenčního elektronu): Dusík (N), Fosfor (P), Arsen (As), Antimon (Sb), (*Bismut (Bi)*)

Degenerovaný polovodič = hodně dotovaný polovodič (chová se téměř jako kov - vodič). Pro Si - $N > 10^{25}$.

Obrázek: Závislost polohy Fermiho hladiny na koncentraci příměsi.

(Jak chápat tento obrázek: Na tomto obr. je nakreslena Ferm. hladina W_F (=WF) pro čistý (intrinický) polovodič. Pokud bychom polovodič dotovali (vznikl by např. polovod. typu N), pak by se fermiho hladina posouvala k vodivostnímu pásu (degenerovaný polovodič může W_C hladinu „překonat“ \Rightarrow (tusim, že to znamená, že se valenční a vodivostní pás se překrývá - ještě zjistím))



Některé vzorce:

Pro vlastní polovodič platí:

$$n = p = n_i$$

$$n \cdot p = n_i^2$$

Pro dotovaný polovodič platí:

$$n \cdot p = n_i^2$$

$$n = p + N_D^+$$

$$p = n + N_A^-$$

$$p + N_D^+ = n + N_A^-$$

n - koncentrace elektronů

p - koncentrace děr

n_i - intrinická koncentrace

(=koncentrace páru elektron-díra)

N_D^+ - koncentrace atomů donorů

v krystalové mřížce křemíku

N_A^- - koncentrace atomů akceptorů

v krystalové mřížce křemíku

PN přechod:

P - koncentrace děr cca 10^{24} m^{-3} , koncentrace elektronů cca 10^9 m^{-3} .

N - koncentrace děr cca 10^{10} m^{-3} , koncentrace elektronů cca 10^{22} m^{-3} .

Protože koncentrace elektronů v N a koncentrace děr v P je rozdílná, není PN přechod (PN přechod = shodná koncentrace elektronů a děr) shodný s metalurgickým přechodem. Pro naše úvahy ale přechod idealizujeme \Rightarrow PN přechod je na metalurgickém přechodu.

V oblasti metalurgického přechodu nastávají jevy:

- difúze děr z P do oblasti N (díry po sobe zanechávají nepohyblivé akceptory, jejichž záporný náboj není kompenzován)
- difúze elektronů z N do P (elektrony po sobe zanechávají nepohyblivé donory, jejichž kladný náboj není kompenzován)

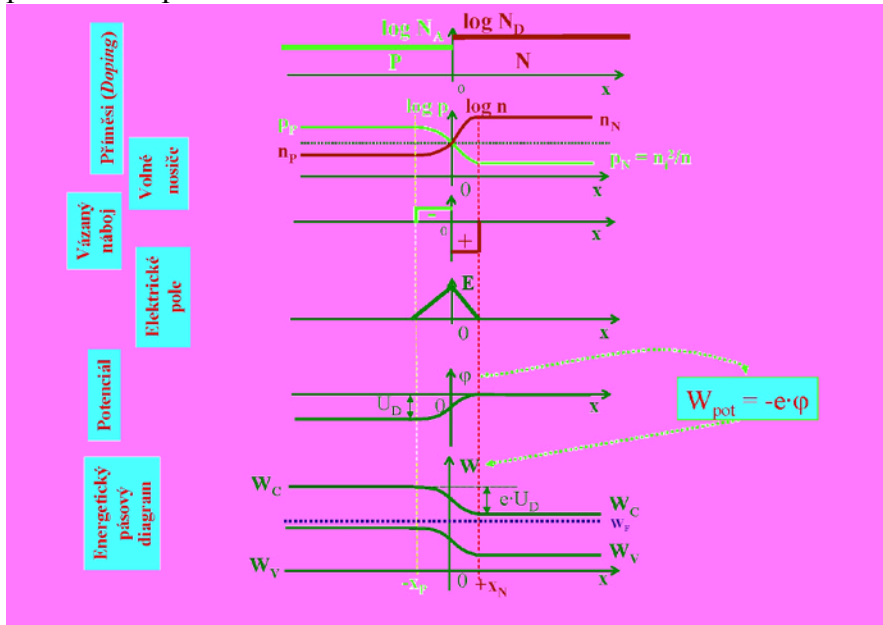
⇒ na přechodu vznikne nábojová dvojrstva (v P je záporná vrstva, v N kladná) s vysokou intenzitou el. pole. Tuto dvojrstvu nazýváme oblast prostorového náboje (OPN). V OPN nejsou pohyblivé nosiče náboje ⇒ chová jako dielektrikum (využití ve varikapu- viz dále)

Závislost šířky OPN na úrovni dotace:

- Nízká úroveň dotace ⇒ široká OPN ⇒ malé prahové napětí
- Vysoká úroveň dotace ⇒ úzká OPN ⇒ velké prahové napětí

Protože v oblasti metalurgického přechodu platí rovnost $N_{A \times P} = N_{D \times N}$, pak *OPN zasahuje hlouběji do oblasti s nižší dotací.*

Důležité parametry usměrňovací diody: maximální proud v propustném směru, maximální povolené napětí v závěrném směru



Shockleyho rovnice ideálního PN přechodu:

$$J = J_0 \left(\exp \frac{eU}{kT} - 1 \right), \text{ kde}$$

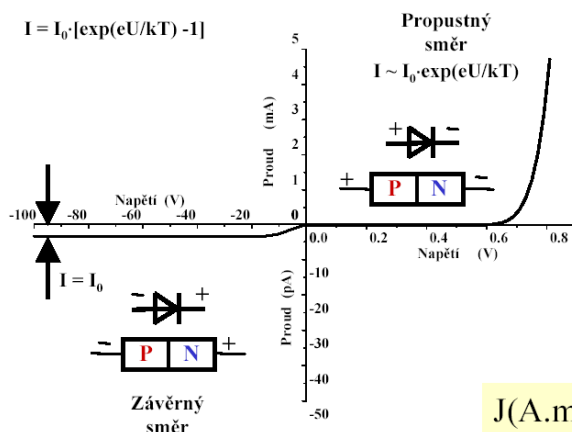
J_0 - hodnota proudové hustoty elektronů z P do N při závěrné polarizaci

e - elementární náboj ($1,602 \cdot 10^{-19}$ C)

U - přiložené napětí

k - boltzmannova konstanta ($1,381 \cdot 10^{-23}$ J/K)

T - teplota v K



Pojmy:

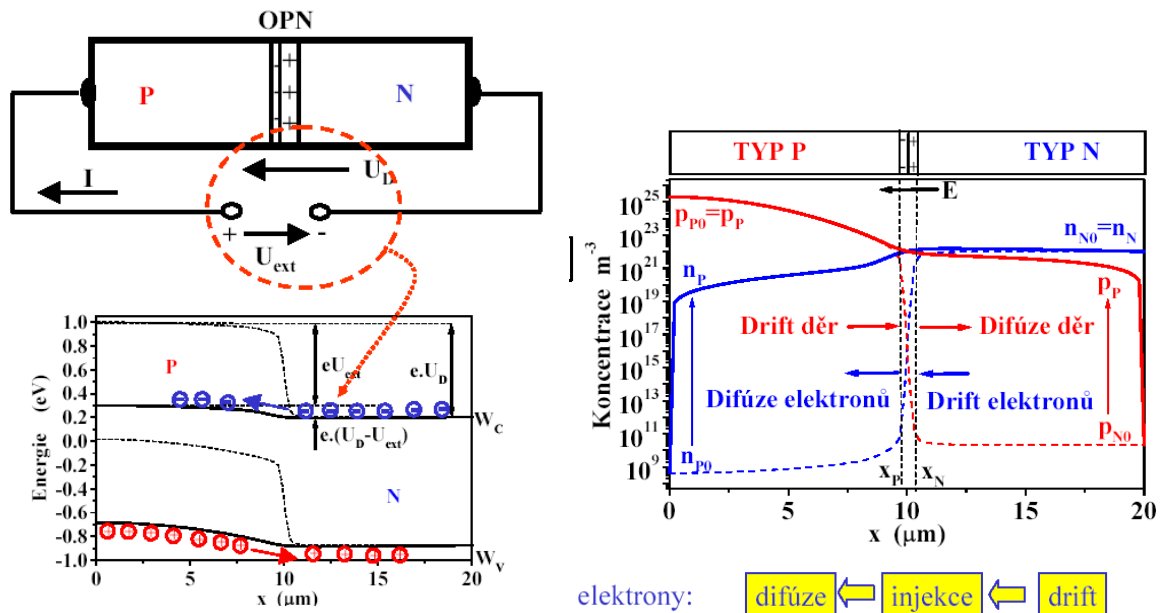
- *minoritní*: menšinové nosiče náboje (např. elektrony v P)
- *majoritní*: většinové nosiče náboje (např. díry v P)
- *difúze*: pohyb minoritních nosičů
- *drift*: pohyb majoritních nosičů
- *injekce*: pronikání majoritních nosičů (např. elektronů v N) do části, kde jsou v menšině (např. elektronů z N do P)
- *extrakce*: opak injekce
- *střední difúzní délka*: 50% délky jakou prodifundují elektrony nebo díry
- *střední volná dráha* τ : dráha mezi jednotlivými srážkami mezi pohyblivou částicí a krystalovou mřížkou
- *střední doba života elektronu*: průměrný čas mezi vznikem elektronu a jeho rekombinací
- *bariérová kapacita*: způsobená kapacitou OPN
- *difúzní kapacita*: způsobená změnou náboje minoritních nosičů při změně napětí ($C_{dif} = \Delta Q / \Delta U$)
- *driftová rychlost* μ : rychlost pohybu nosiče náboje
- *pohyblivost* ν : konstanta úměrnosti mezi driftovou rychlostí a intenzitou el. pole:

$$v = -\mu E \quad (\text{m/s; m}^2/(\text{Vs}), \text{V/m})$$

$$\mu = e \tau / m \quad e - \text{elementární náboj, } \tau - \text{střední volná dráha, } m - \text{efekt. hmotnost}$$

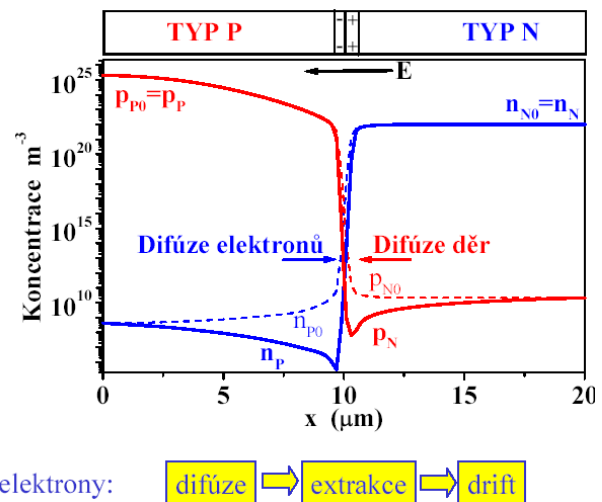
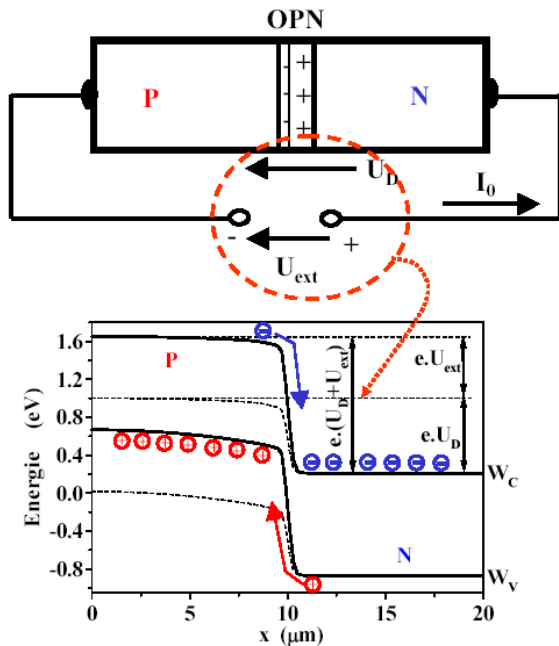
Dioda v propustném směru:

Po přiložení napětí dojde ke zúžení OPN, díry ve valenčním pásu P driftují k PN přechodu, kde překonají OPN \Rightarrow injekce děr do N. V polovod. N menšinové díry zrekombinují s většinovými elektrony. To samé se děje s elektrony v opačném směru ve vodivostním pásu. Celkový proud je dán součtem proudů elektronů a děr. OPN je zaplavena děrami a elektrony.



Dioda v závěrném směru:

Dojde ke zvýšení energetické bariéry a k rozšíření OPN. Majoritní díry ve valenčním pásu P nemohou překonat tak vysokou bariéru \Rightarrow díry nepronikají do N. Minoritní díry v N ve valenčním pásu překonají PN přechod \Rightarrow tvoří proud v závěrném směru. Totéž se děje s elektrony v opačném směru ve vodivostním pásu.



Děje v diodě:

Lavinový jev:

Nastává při závěrné polarizaci diody. Rostoucí závěrné napětí \Rightarrow rozšiřování OPN \Rightarrow na OPN přechodu je velké el. pole, protože má velký odpor \Rightarrow elektron, který se pohybuje OPN je urychlován el. polem, získá velkou energii \Rightarrow při kolizi s atomy Si vyrazí valenční elektrony (=nárazová ionizace) \Rightarrow vznik páru elektron díra \Rightarrow pohyb elektronu a díry v opačném směru \Rightarrow dochází k dalším kolizím \Rightarrow nárůst proudu nade všechny meze \Rightarrow zničení diody

U_{BR} - napětí při kterém dochází k lavinovému jevu. Hodnota U_{BR} je závislá na koncentraci: s rostoucími hodnotami koncentrace se zužuje OPN \Rightarrow růst maxima el. pole $E \Rightarrow U_{BR}$ klesá

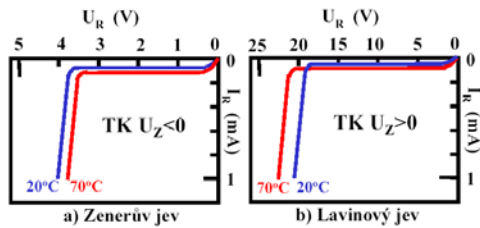
Tunelový (Zenerův) jev

Dochází k němu při závěrné polarizaci při větší koncentraci nosičů donorů a akceptorů (N_A a $N_D \approx 10^{24} \text{ m}^{-3}$) \Rightarrow úzká OPN \Rightarrow elektrony mohou překonat energet. bariéru tunelovým jevem.

Tunelový jev: elektron překoná energetickou bariéru, i když má nižší energii než představuje bariéra. Vysvětlení přináší kvantová fyzika. Tunelování skrz bariéru, která je dostatečně tenká (bariéra = šířka zakázaného pásu). Přechod valenčních elektronů z P na volné hladiny vodivostního pásu N \Rightarrow generace páru elektron-díra \Rightarrow zvětšení závěrného proudu.

Potřebujeme tenký PN přechod \Rightarrow Zenerův jev se vyskytuje u diod se Zenerovým napětím do cca 8V. Důvod: vyšší průrazné napětí vyžaduje nižší hodnoty koncentrace N_A a $N_D \Rightarrow$ větší šířka zakázaného pásu \Rightarrow malá pravděpodobnost tunelování.

Pro napětí nad 8V dochází k průrazu jen lavinovým jevem. Pro $U_{BR} < 8V$ nastává Zenerův a lavinový jev současně. Jelikož šířka zakázaného pásu klesá s rostoucí teplotou, je teplotní koeficient Zenerova napětí záporný (=se vzrůstající teplotou klesá Zenerovo napětí), tedy opečný než u lavinového jevu. Při hodnotě přibližně kolem 6V se teplotní vlivy obou mechanismů vzájemně kompenzují.



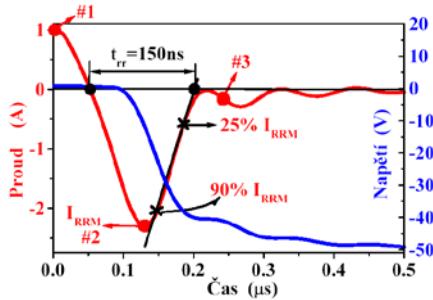
Zenerova dioda:

V propustném směru se chová jako obyčejná Si dioda. Je konstruována tak, aby v závěrném směru došlo k nedestruktivnímu průrazu po celé ploše přechodu (dochází k lavinovému nebo Zenerově jevu, podle toho na jaké napětí je konstruována - viz odstavec výše). Má větší dotaci $N_A = N_D = \text{cca } 10^{25} \text{ m}^{-1}$

Důležité parametry diody: ztrátový výkon, jmenovité napětí v závěrném směru

Závěrné zotavení diody (t_{rr}):

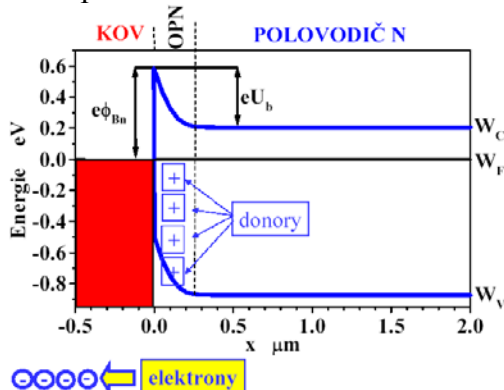
Udává, jak rychle dokáže přepnout z propustného do závěrného směru a blokovat tak průchodu proudu. Je to způsobeno tím, že přechod je zaplaven nosiči náboje, které je potřeba při změně polaroty vyklidit (docela pěkně je to znázorněno na slajdech od Vobeckýho). Čím větší bude závěrné napětí, tím je kratší doba zotavení.



Poznámka: Zdá se mi, že tu dobu t_{rr} v každé knížce definují trochu jinak. Takhle to bylo v elektronice (tzn. 90% a 25% a tím přímku).

Přechod kov-polovodič (= Schottkyho dioda):

Obvykle přechod kov-polovodič *typu N*. Narozdíl od diody s PN přechodem, kde byl proud tvořen jak elektrony, tak děrami, tak u přechodu je proud tvořen *pouze elektrony*. Při spojení kovu s polovodičem N dojde k ustanovení termodynam. rovnováhy \Rightarrow elektrony z vyšších energetických stavů v N přejdou do nižších energetických stavů v kovu (elektrony z polovodiče přejdou do kovu, kde jich je ale více než v polovodiči) \Rightarrow v N vznikne vyprázdňená oblast (OPN), kde budou nepohyblivé ionizované donory (mají kladnou polaritu) \Rightarrow na přechodu vznikne silné elektrické pole



Přechod v propustném směru:

Proud je tvořen majoritními (většinovými) elektrony z vodivostního pásu. Při přiložení napětí dojde ke zúžení OPN, snížení energet. bariéry \Rightarrow elektrony z vodivostního pásu N přecházejí do kovu (emise majoritních nosičů přes bariéru). Díry z N se na vedení proudu neuplatní.

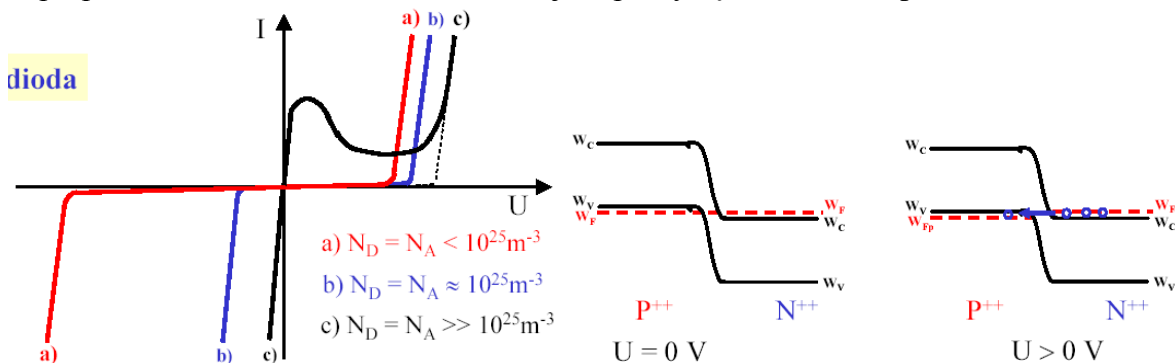
Přechod v závěrném směru:

Při přiložení závěrného napětí dojde k rozšíření OPN a zvětšení bariéry \Rightarrow diodou teče velmi malý proud.

Tunelová dioda:

Dnes se prakticky nepoužívá, takže jen stručně. Vznikne spojením dvou degenerovaných polovodičů ($N_A = N_D \gg 10^{25} \text{ m}^{-3}$). Nosiče mohou tunelovat i v propustném směru.

V propustném směru tak vzniká úsek, kde je záporný *diferenciální* odpor.



K obrázku: a) „obyčejná“ dioda - b) Zenerova dioda - c) tunelová dioda. Všimněte si koncentrací donorů a akceptorů. Vpravo - energetický pásový diagram a naznačená možnost tunelování.

Parametry diod (hodnoty berte jako hodně orientační):

Druh diody	Prahové napětí (propustný směr)	Závěrný proud	Průrazné napětí v záv. směru	Vlastnosti
Křemíková dioda	0,65 - 0,7 V	jednotky nA	max 2000 V	Levné
Germaniová dioda	0,25 V	desítky μA	max 100 V	Vysoká pohyblivost nosičů (použití ve VF technice - dnes nahrazeno Schottkyho diodou)
Schottkyho dioda	0,35 V	desítky nA	max 600V	žádné závěrné zotavení \Rightarrow rychlé vypínání
Zenerova dioda	0,9 V	jednotky nA	3 - 300 V	Stabilizační účinky
Tunelová dioda	viz text	v záv. směru se chová jako odpor	v záv. směru se chová jako odpor	Záporný diferenciální odpor

Kapacitní dioda (varikap):

Využívá toho, že v OPN nejsou žádné volné nosiče náboje \Rightarrow chová se jako dielektrikum a že šířku OPN lze měnit přiloženým závěrným napětím.

Jelikož platí $C = \varepsilon \frac{S}{d_{OPN}}$ a $d_{OPN} = f(U_{záv})$ pak $C = f(U_{záv})$

Užití: pro doladování rezonančních obvodů v TV a rozhl. přijímačích.

Co by se zde ještě mohlo hodit vědět (odkaz na knížku elektronika Vobecký+Záhlava,r.2001):

Jak vypadá jednocestný usměrňovač (str. 92)

Jak vypadá můstkový usměrňovač (=Gretzův můstek) - str. 94

Vědět, jak vypočítat odpor k LEDce (= nastavit pracovní bod u diody)

Vědět, jak vypočítat odpory k Zenerově diodě - str. 96.

Vzorec pro Fermi-Diracovu rozdělovací fci (str.15) a Maxwell-Boltzmannovu rozdělovací fci (str. 16)

Přeskoky elektronů mezi pásy přímé a přes rekombinační centra (mělo by být vypracované v otázce č. 2 - pokud nebude, tak to ještě doplním)

Literatura:

Slajdy Vobeckého na předmět elektronika (jestli je někdo nemá, tak je můžu někam uložit)

Slajdy Jiráska na součástky

Vobecký, Záhlava: Elektronika, rok 2001

Jan Mařátko: Elektronika, rok 1997