

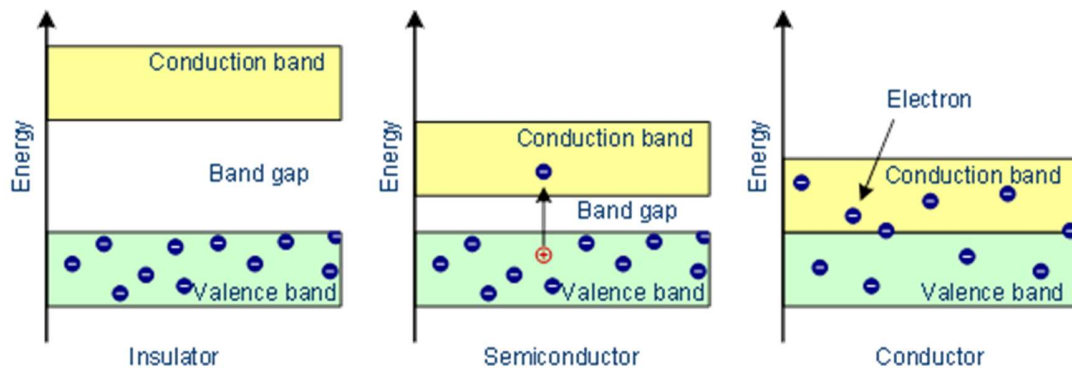
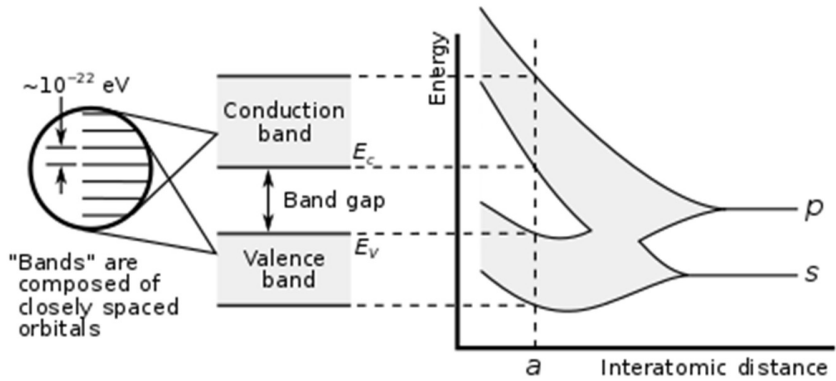
I. ZÁKLADNÉ POJMY

PÁSOVÁ ŠTRUKTÚRA TL

vodivostný pás (VoP)

zakázaný pás / energetická medzera (ZP) o šírke E_g

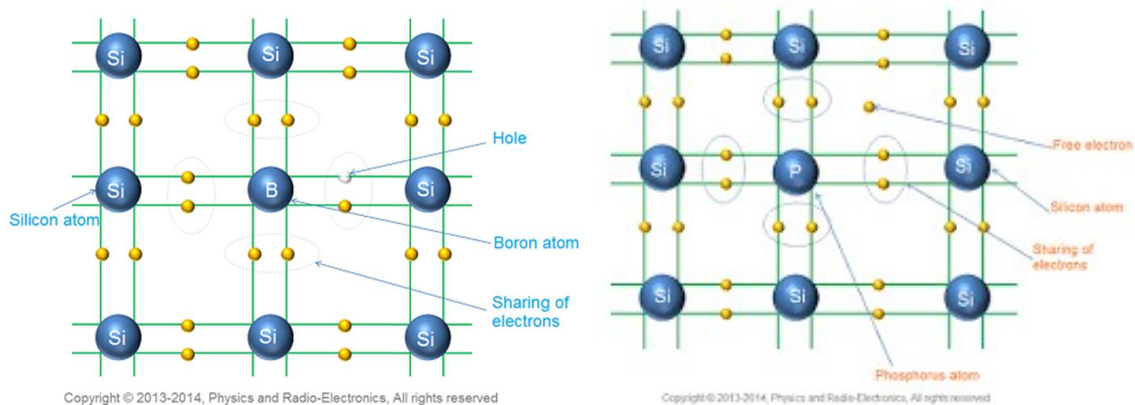
valenčný pás (VaP)



vo vodičoch/kovoch (K) – pohyb elektrónov v **čistočne** zaplnenom VoP

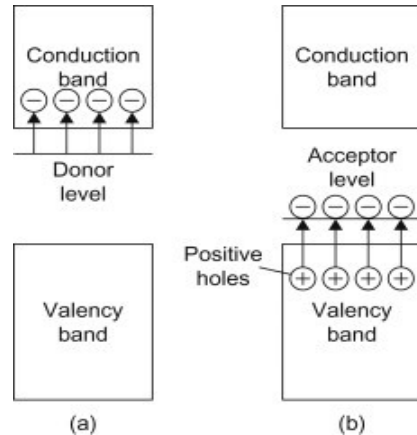
v **čistých – intrinsických** - polovodičoch (PV) - **tepelne** excitované elektróny do prázdneho VoP a **dieri** vo VaP – **vlastná** elektrónová a dierová vodivosť

dopované PV – **prímesné** atómy a prímesné energetické hladiny v ZP



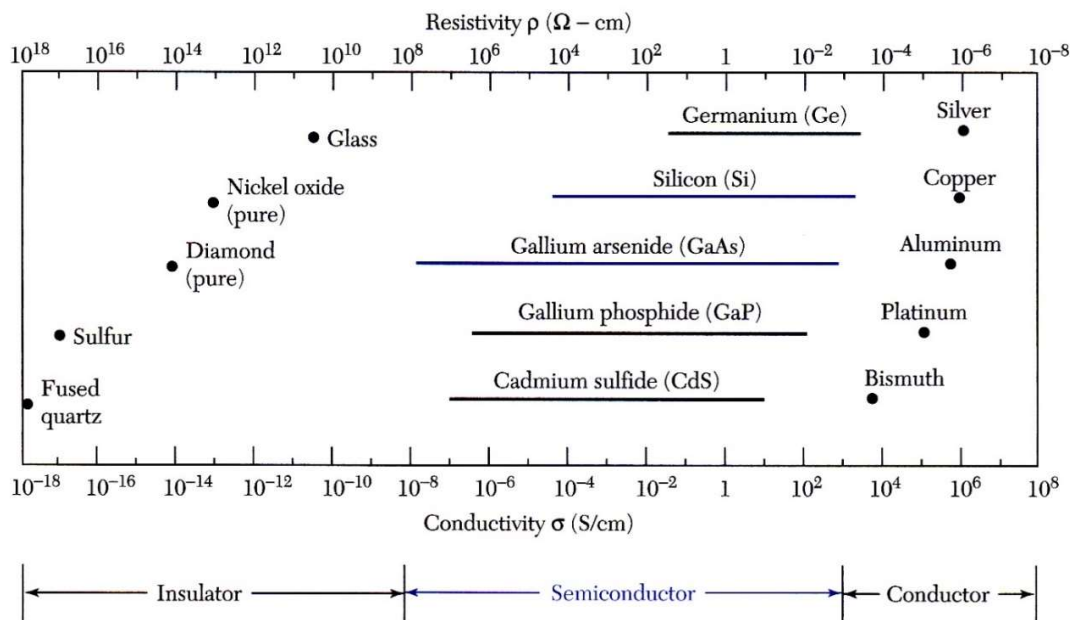
v dopovaných PV **typu n** – prímiesné **elektrónové - donorové** hladiny v ZP v blízkosti E_c - **dolného** okraja VoP

- tepelná excitácia elektrónov z týchto hladín do VoP



v dopovaných PV **typu p** – prímiesné **dierové - akceptorové** hladiny v ZP v blízkosti E_v - **horného** okraja VaP

- tepelná excitácia elektrónov z VaP **do** týchto hladín a vznik **voľných** dier vo VaP



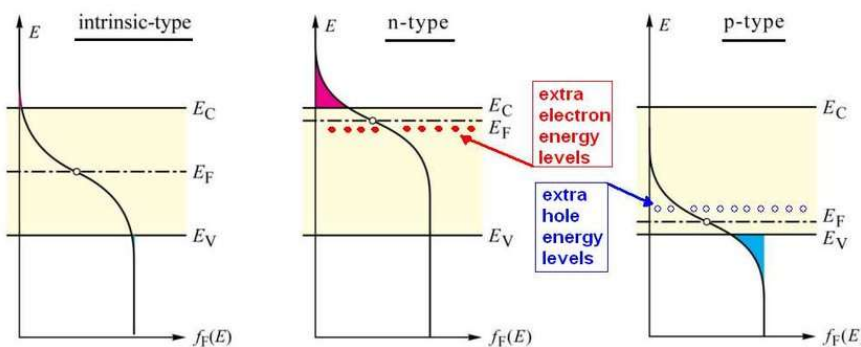
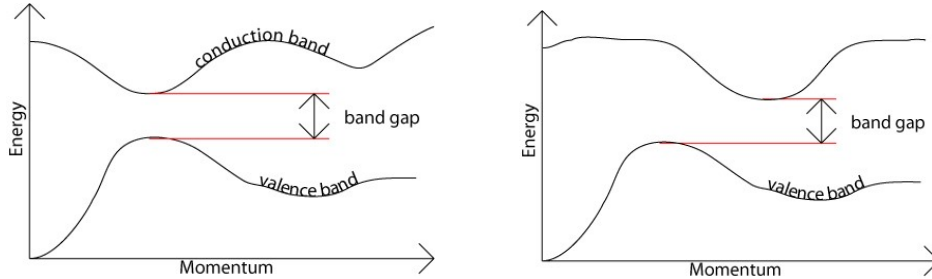
Nosiče náboja (elektróny, diery) v TL opisujeme pomocou rovinných vln s ostrými hodnotami vlnových vektorov \vec{k} a (kinetickú) energiami $E(\vec{k})$. Prítomnosť iónovej mriežky spôsobuje, že $E(\vec{k})$ pre jednotlivé pásy nie je parabolickou funkciou (ako pre voľné nosiče). Dno VoP a vrch VaP však môžeme aproximovať parabolickým vzťahom pre voľné častice

$$E(\vec{k}) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*} \quad \text{kde} \quad m^* = \hbar^2 \left(\frac{\partial^2 E(k)}{\partial k^2} \right)^{-1}$$

je **efektívna hmotnosť** elektrónov/dier pri okrajoch pásov (vo všeobecnosti odlišná, a líšiaca sa aj od m_e). Rýchlosť pohybu častíc a ich hybnosť sú

$$v_g = \frac{\partial E(k)}{\hbar \partial k} \quad (\text{grupová rýchlosť}) \quad , \quad p = \hbar k = m^* v_g.$$

Šírka ZP v PV je daná rozdielom minima VoP a maxima VaP, $E_g = E_c - E_v$. Tie však vo všeobecnosti nemusia odpovedať rovnakému k – hovoríme o **priamom/nepriamom** ZP.

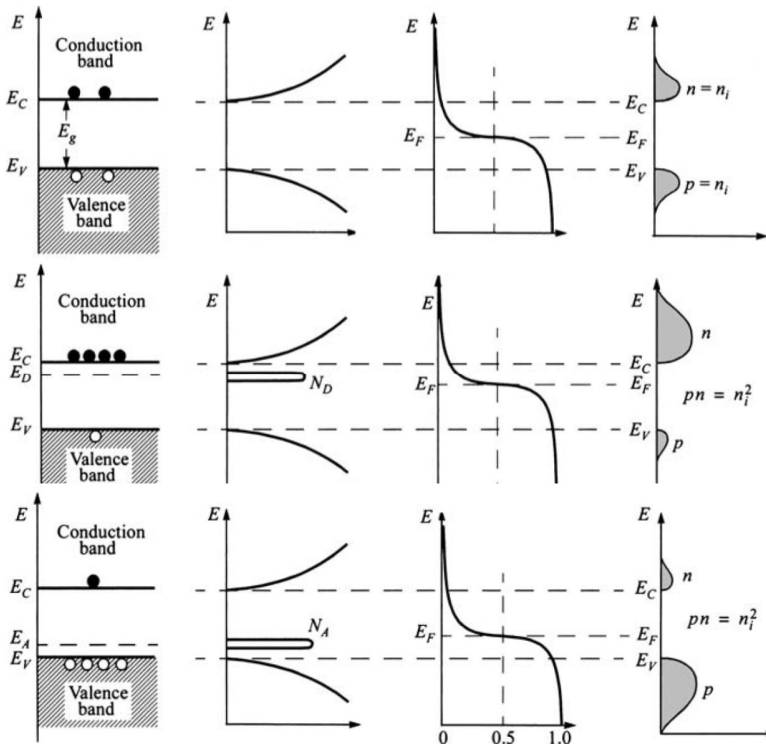


Fermiho energia
(chemický potenciál)

E_F v **intrinzičných** PV leží (približne) v strede ZP,

v PV **n-type** medzi E_c a prímiesnou hladinou E_D ,

v PV **p-type** medzi E_v a prímiesnou hladinou E_A .



Počet voľných nosičov náboja (e/d) závisí od **hustoty stavov** vo VoP/VaP a od **pravdepodobnosti ich obsadenia pri danej teplote** (Fermi-Dirac), a je úmerný

$$\exp\left\{-\frac{E_c - E_F}{k_B T}\right\} \text{ pre elektróny}$$

$$\exp\left\{-\frac{E_F - E_v}{k_B T}\right\} \text{ pre diery}$$

a je teda výrazne odlišný pre intrinzičné a dopované PV.

PV nazývame **nedegenerovaným**, ak je koncentrácia n/p dopantov menšia než hustota stavov vo VoP/VaP.

PV je **degenerovaný**, ak koncentrácia n/p dopantov dosahuje či prevyšuje hustotu stavov vo VoP/VaP. Prímesné hladiny sa rozširujú do pásov, môžu splynúť s VoP/VaP a “vytlačiť” E_F do týchto pásov – PV nadobúda **kovový** charakter.

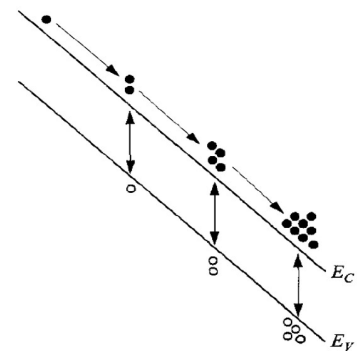
V elektrickom poli \mathcal{E} sa náboje q pohybujú **driftovou rýchlosťou** $v_d = \mu \mathcal{E}$, kde ich **mobilita** $\mu = \frac{ql}{\sqrt{3k_B T m^*}}$ závisí od strednej voľnej dráhy l . Celková vodivosť PV je daná koncentráciou elektrónov aj dier

$$\sigma = q(\mu_n n + \mu_p p)$$

Ak sú však rozmery súčiastok (alebo ich častí) menšie než l , transport je **balistický** (nedochádza k rozptylu), rýchlosťou $v_t \cong q \mathcal{E} t / m^*$.

Ak elektrické pole udelí nosičom kinetickú energiu $\cong E_g$, dochádza ku generácii párov elektrón-diera (*impact ionization*) a **lavínovitému zosilneniu** prúdu

(v pásovom diagrame homogénne elektrické pole znamená konštantný gradient energie - sklon pásov)



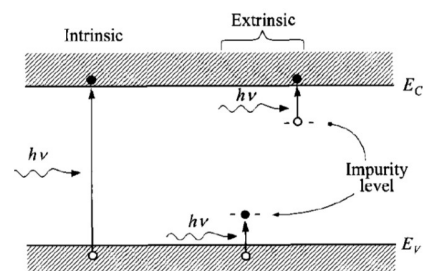
Pri nadmernej koncentrácii nosičov (vzhľadom k TD rovnováhe) dochádza k **rekombinácii** – uvoľnená energia sa vyžiari ako fotón alebo odovzdá iným nosičom ako Augerov jav.

Za účasti fotónov (absorpciou alebo emisiou fotónu) sú možné preskoky elektrónov medzi VoP a VaP (zo zaplneného do prázdneho stavu), preskoky medzi VoP, VaP a prímesnými hladinami/pásmi.

Pohltenie fotónov vedie k nárastu koncentrácie nosičov náboja (fotoelektrický jav) a k zvýšeniu vodivosti PV.

Hybnosť fotónov je zanedbateľná oproti hybnosti elektrónov, preskoky cez ZP len za účasti fotónov sú preto možné v PV

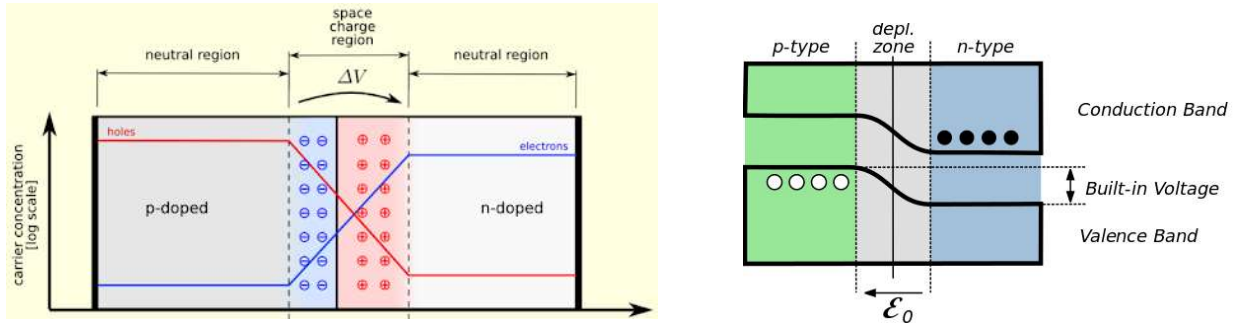
s **priamym** ZP (elektrónový stav pred a po preskoku sa nelíšia hybnosťou) – **priame prechody**. V PV s **nepriamym** ZP sú takéto preskoky možné len za súčasnej účasti **fonónov** (fotón dodá/odoberie energiu a fonón hybnosť) - **nepriame prechody** - sú oveľa menej pravdepodobné.



Rezistivita (merný odpor) PV je **teplotne závislá**. U intrinzických a slabo dopovaných PV s rastúcou teplotou rastie počet voľných nosičov a rezistivita **klesá**. Pri vysokých teplotách alebo u silne dopovaných (degenerovaných) PV sa koncentrácia nosičov nasycuje a rozhodujúcim faktorom sa stáva rozptyl nosičov na fonónoch (ako pri kovoch) a rezistivita **narastá**.

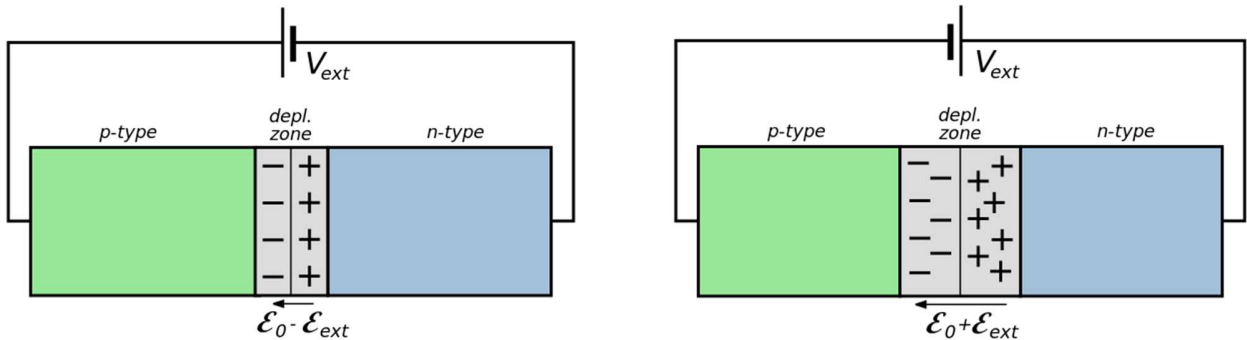
II. p-n PRECHOD

Difúziou majoritných nosičov cez rozhranie vzniká **ochudobnená vrstva** (o majoritné nosiče) – oblasť priestorového náboja, vytvárajúca elektrické pole – kontaktné napätie, ktoré ďalšiu difúziu zastaví.

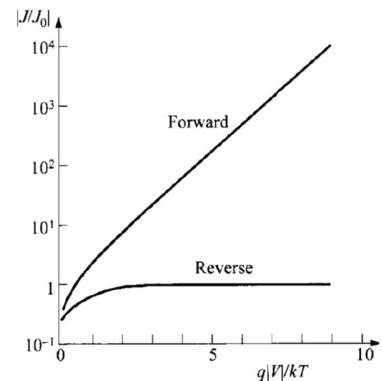
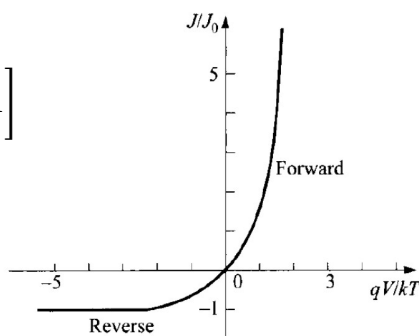


Vonkajšie napätie priložené v **priepustnom smere** vyvolá (po prekonaní kontaktného napätia) prúd **majoritných** nosičov naprieč prechodom do oblasti, v ktorej sa stávajú minoritnými a rekombinujú. Na druhej strane prechodu prebieha analogický pohyb (opačného náboja) opačným smerom.

Napätie v **závernom smere** umožňuje len zanedbateľný prúd **minoritných** nosičov naprieč kontaktom.

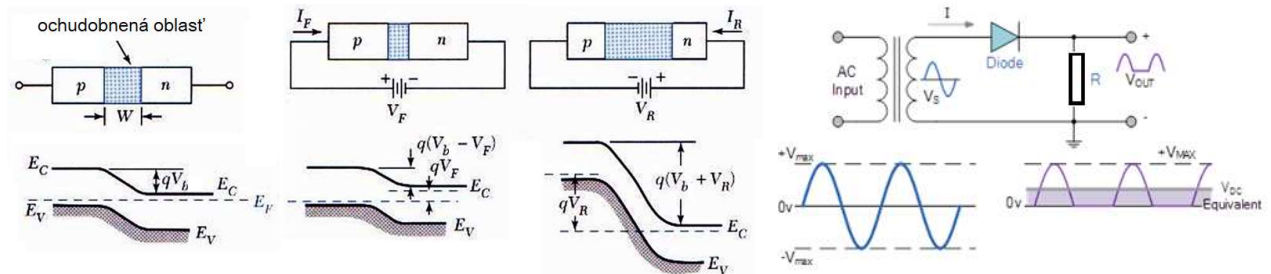


$$J = J_p + J_n = J_0 \left[e^{\left(\frac{qV}{k_B T}\right)} - 1 \right]$$



Pri veľkom **závernom** napätí záverný prúd produkuje teplo, ktoré vedie k zvyšovaniu koncentrácie minoritných nosičov a prúdu (kladná spätná väzba) – nastáva **prieraz** – záverný prúd **prudko** (lavínovito) rastie (deštrukcia prechodu).

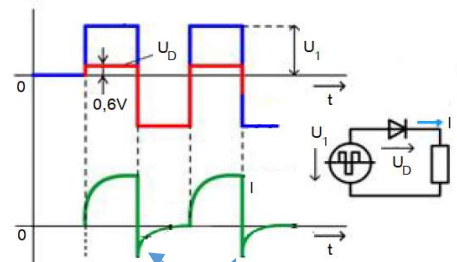
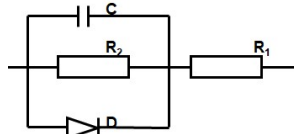
Usmerňovacie diódy. Nízky odpor v priepustnom smere ($\approx \Omega$) a vysoký v závernom ($\approx M\Omega$). Stratový výkon 0,1 – 10 W. Priečne napätie 50 – 2500 V. S rastúcou teplotou sa zvyšuje záverný prúd a znižuje dovolené záverné napätie. Prepínacia rýchlosť je limitovaná dobou života minoritných nosičov: 50 ns (nízkovýkonové) – 500 ns (vysokovýkonové).



Ochudobnená oblasť s elektrickým poľom predstavuje **kondenzátor v závernom smere**, jej šírka (aj kapacita) sa mení s priloženým napätím. Kapacita diódy a odpor v priepustnom smere určujú hraničnú frekvenciu pre vľ aplikácie.

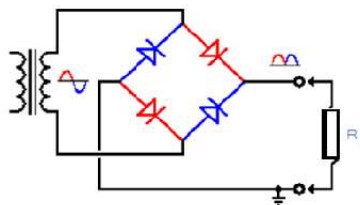
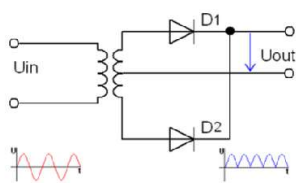
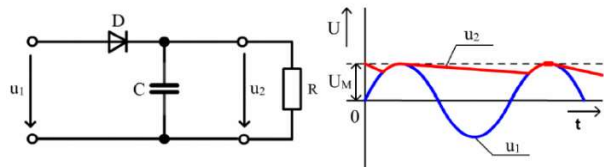
náhradná schéma

- R_1 – Odpor diódy v priepustnom smere
- R_2 – Odpor diódy v závernom smere
- C - Kapacita prechodu



vyprázdnenie oblasti pn-prechodu

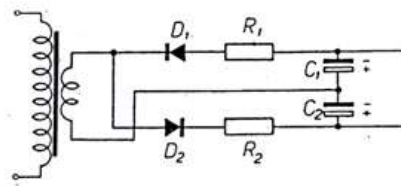
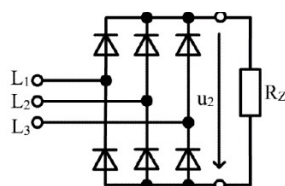
usmerňovač s vyhladzovacím kondenzátorom



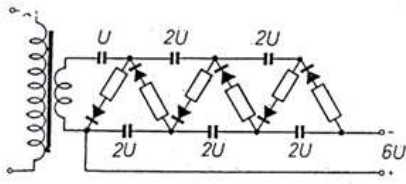
dvojcestný usmerňovač

v Graetzovom zapojení

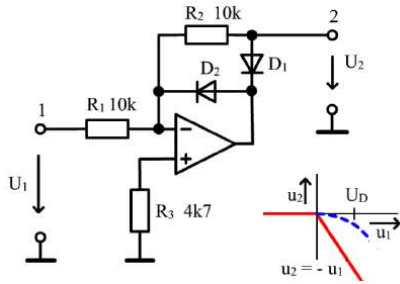
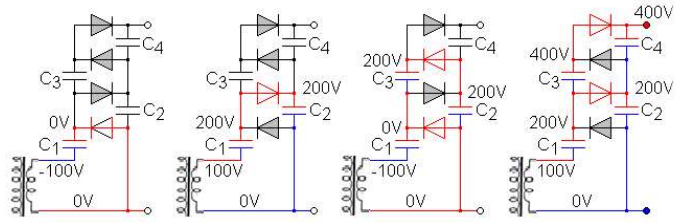
trojfázový dvojcestný usmerňovač



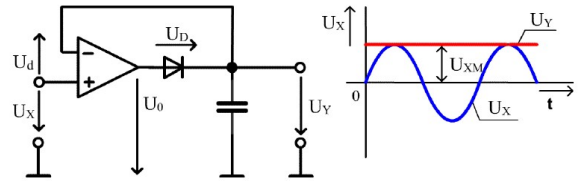
zdvojovač napätia



násobič napätia



ideálny jednocestný usmerňovač

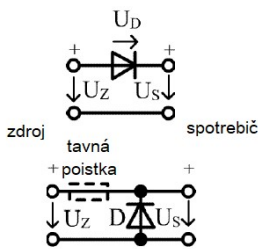
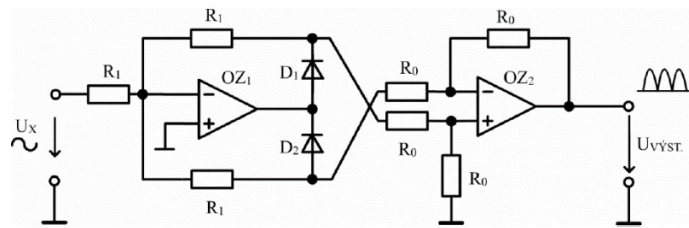


$$U_0 = U_d \cdot A = (U_X - U_Y) \cdot A \quad U_0 = U_D + U_Y$$

$$U_Y = [A/(A+1)] \cdot U_{XM} - [U_D/(A+1)] \approx U_{XM}$$

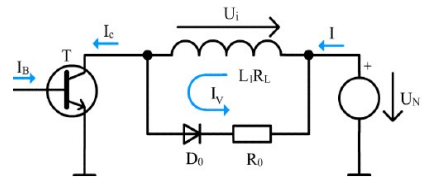
prevodník na špičkovú hodnotu napätia

ideálny dvojcestný usmerňovač

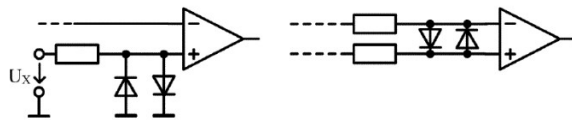


ochrana proti prepólovaniu

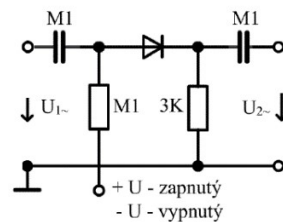
a proti nebezpečnému prepätiu
(napr. v indukčných obvodoch)



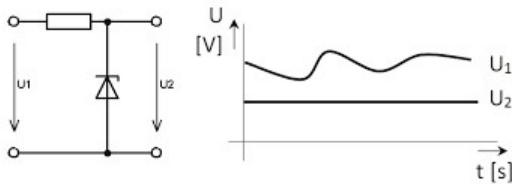
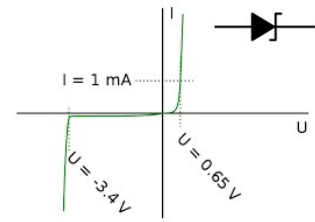
ochrana vstupov zosilňovačov slabých signálov
(pre signály < 0,6V majú diódy obrovský odpor)



spínač striedavého signálu riadený jednosmerným napätím

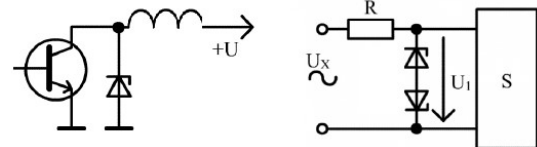


Zenerove diódy. Zväčša vysoko dopovaný Si. Prierazné záverné napätie je umelo znížené na niekoľko V (veľmi tenká ochudobnená oblasť $< 1 \mu\text{m}$, veľký napätový spád), čo umožňuje **tunelovanie** elektrónov z VaP p-oblasti do VoP n-oblasti. Prieraz je **nedeštruktívny**, záverný prúd prudko rastie pri prakticky konštantnom (prieraznom) napätí. **Záporný** teplotný koeficient prierazného napätia (šírka ZP klesá s rastúcou teplotou). Vhodné na stabilizáciu napätia a ochranu pred prepätím.

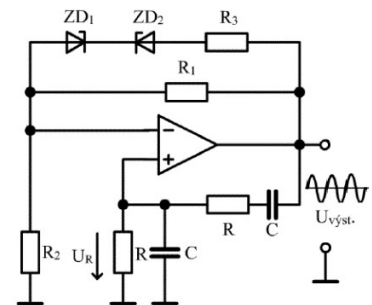


stabilizácia jednosmerného napätia

rôzne zapojenia ochrany
(obmedzenia napätia)

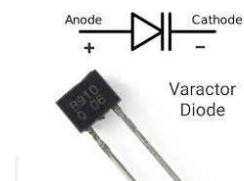


stabilizácia amplitúdy oscilátora s Wienovým deličom



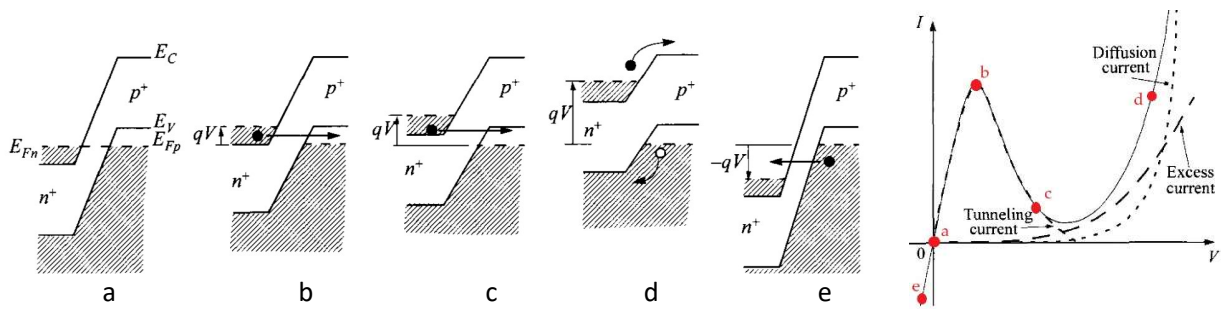
Lavínové diódy. Podobné zenerkám (aj symbolom), **nedeštruktívny** prieraz v závernom smere je daný lavínovou generáciou nosičov, pri väčších záverných napätíach. **Kladný** teplotný koeficient prierazného napätia (stredná voľná dráha klesá s rastúcou teplotou).

Varikapy/varaktory. Hrúbka ochudobnenej oblasti a tým aj kapacita sa dá riadiť záverným napätím (*variable capacitor/reactor*). S gradientom dopovania rastie $\frac{dC}{dV}$. Vhodné do rf aplikácii (ladený rezonančný obvod).



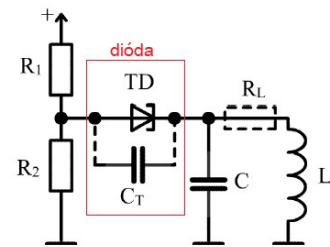
Tunelové (Esakiho) diódy. Veľmi ostrý prechod (hrúbka ochudobnenej vrstvy $\approx 10 \text{ nm}$) vytvorený silným dopovaním – PV sú **degenerované** - E_F sa nachádza vnútri dovolených pásov. Tunelovanie v **priepustnom** smere pri malých napätíach.



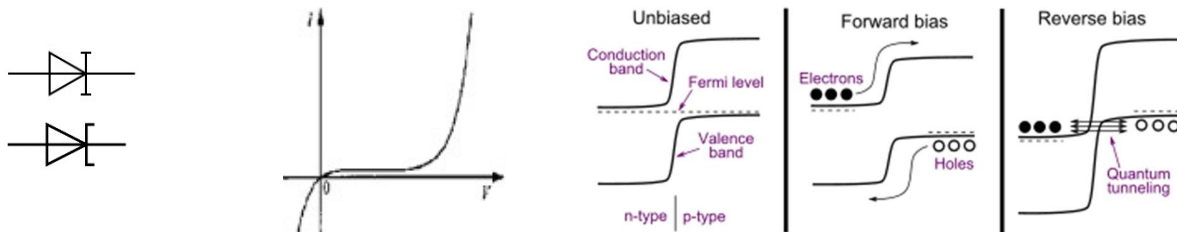


(a) rovnovážny stav, (b) **tunelovanie** do dostupných voľných stavov vo VaP, (c) nedostatok dostupných voľných stavov na danej energii, (d) normálny - **difúzny** - priepustný režim, (e) normálny záverný režim. Nadprúd (excess c.) súvisí s tunelovaním prostredníctvom prímiesných stavov v ZP (nečistoty).

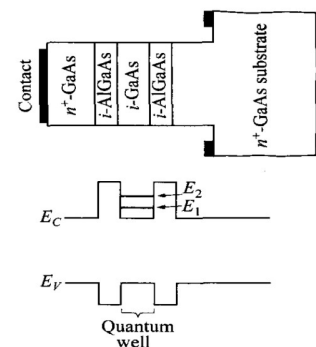
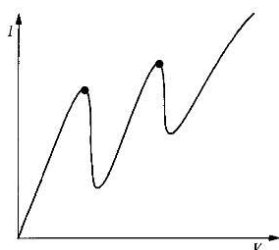
Prakticky zaujímavou je oblasť so **záporným** diferenciálnym odporom. Záporný dynamický odpor kompenzuje straty (R_L). Rezistory R_1 a R_2 nastavujú pracovný bod. V tomto režime sa (v určitom intervale frekvencií) oscilujúci prúd **zosilňuje**.



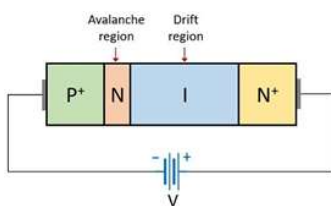
Inverzné diódy. Ak PV nie sú celkom degenerované, **tunelový** prúd medzi pásmi pri malom závernom napätí môže prevýšiť **difúzny** prúd v priepustnom smere. Malá kapacita prechodu a krátke prepínacie časy (nie sú limitované rekombináciou minoritných nosičov, ako v priepustnom smere) ich predurčuje na vF aplikácie.



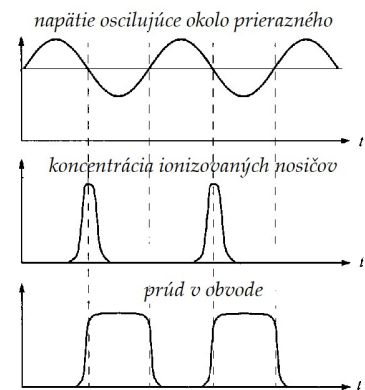
Rezonančné tunelové diódy. Ak sa technologicky (heteroštruktúry z rôznych PV pomocou MBE, MOCVD) vytvorí nespojitosť E_C alebo E_V , vznikne kvantová (potenciálová) jama (\approx nm). Tunelovanie medzi elektródami prebieha cez kvantované hladiny v jame – pravdepodobnosť tunelovania má **rezonančný** charakter pre energie častíc (určené priloženým napätím) odpovedajúce týmto hladinám. Patria k najrýchlejším súčiastkám s aplikáciami v THz oblasti pri malých prúdoch (oscilátory, rýchle logické obvody).



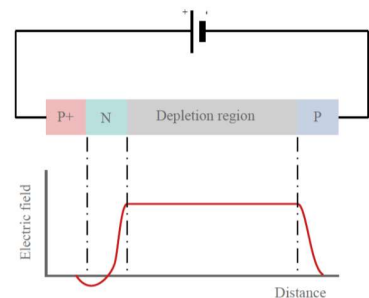
Lavínové priedetové diódy IMPATT (*impact-ionization avalanche transit time*). Napätie priložené v **závernom** smere zvyšuje intenzitu elektrického poľa v prechode a spôsobuje **prieraz** a **lavínovú** ionizáciu nosičov náboja. Majoritné nosiče následne **driftujú** vysoko odporovou (slabo dopovanou alebo intrinzickou) oblasťou (smerom od prechodu). Ak na jednosmerné záverné napätie tesne pod prierazom naložíme oscilujúce napätie, k prierazu dochádza periodicky. Postupný lavínový nárast počtu nosičov však **zaostáva** za napätím. Optimálnym nastavením dĺžky driftovej oblasti možno dosiahnuť, že prúd dodávaný do obvodu je v protifáze s napätím – **dodáva** výkon do zdroja (**záporný** dynamický odpor).



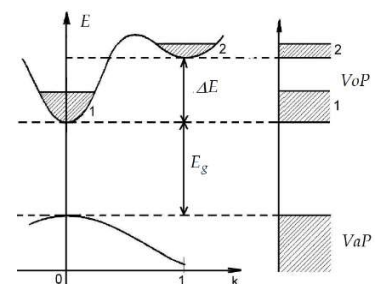
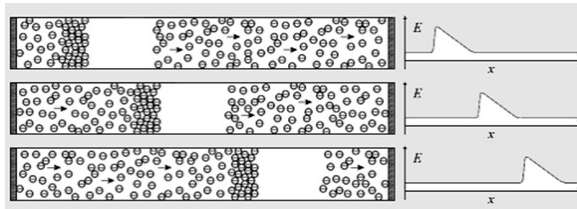
Generátory v oblasti 30 - 300 GHz s vysokým výkonom (\approx kW, najvyššie spomedzi tuholátkových generátorov). Relatívne veľký šum (lavína) limituje ich použiteľnosť ako zosilňovače.



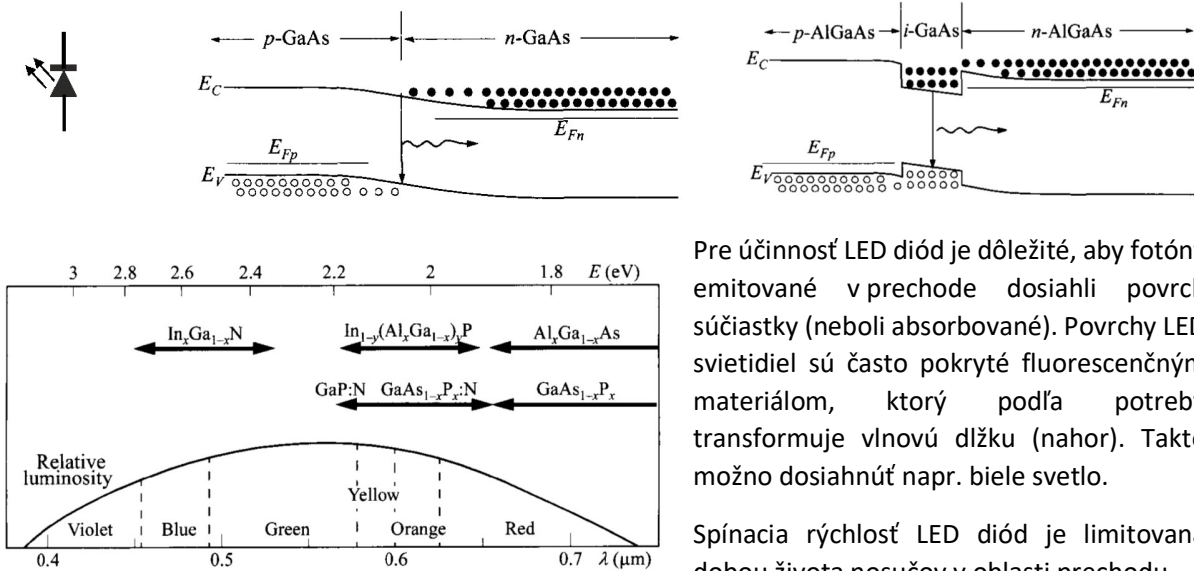
Priedetové diódy BARITT (*barrier injection transit time*). Ide o dvojicu pn-prechodov zapojených proti sebe. Priložené vonkajšie napätie je sústredené na prechode v závernom smere a jeho nárast rozširuje ochudobnenú oblasť. Pri istom napätí sa okraj tejto oblasti spojí s okrajom ochudobnenej oblasti druhého prechodu (zapojeného v priepustnom smere). **Tepelne** ionizované nosiče v závernom prechode sú injektované do prechodu v priepustnom smere, pričom driftujú oblasťou ochudobnenou o nosiče – nedochádza k lavínovej ionizácii. Fázový posuv prúdu voči budiacemu striedavému napätíu, závisiaci od doby priedetu, vedie na **záporný** diferenciálny odpor – podmienku zosilnenia oscilácií. Malé výkony (v pásme okolo 50 GHz) ale nízky šum (absencia lavíny).



Gunnove diódy. V niektorých PV (GaAs, InP) má dno vodivostného pásu dve minimá (v k -priestore) s rôznou pohyblivosťou elektrónov (rôzne m^*). V slabom elektrickom poli \mathcal{E} a pre $k_B T \ll \Delta E$ sú všetky elektróny „ľahké“ (v minime 1), a ich driftová rýchlosť je $v_d = \mu_1 \mathcal{E}$. S nárastom \mathcal{E} však rastie ich energia obsadzujú minimum 2 – stávajú sa „ťažšími“. S nárastom napätia teda klesá prúd – **záporný** dynamický odpor. V okolí prahovej hodnoty \mathcal{E} fluktuácie nábojovej hustoty spôsobia priestorovú moduláciu pohyblivosti elektrónov a vznik nábojových domén (vnútri domén je vyššie \mathcal{E} znižujúce ich mobilitu, mimo domén zas nižšie \mathcal{E} spomaľuje drift) – vzniká ustálený drift domén materiálom (štruktúra **neobsahuje** pn-prechod). Vstup nábojovej domény do vonkajšieho obvodu vyvolá napäťový pulz na štruktúre a tvorbu novej domény. Perióda prúdových pík je daná dobou priedetu domény štruktúrou. Mikrovlnné generátory, až do THz, vysoké výkony (pulzne kW).



Diódy LED (*light emitting diode*). Do pn-prechodu sú v **priepustnom** smere injektované minoritné nosiče z oboch strán, a ich nadmerná koncentrácia vedie k ich **rekombinácii** vyžiarením fotónov. Vložením nedopovanej medzivrstvy (s užším ZP) môžeme zvýšiť nadmernú koncentráciu (lokalizujeme nosiče v jame), skrátiť ich dobu života a tým zvýšiť účinnosť vyžarovania.

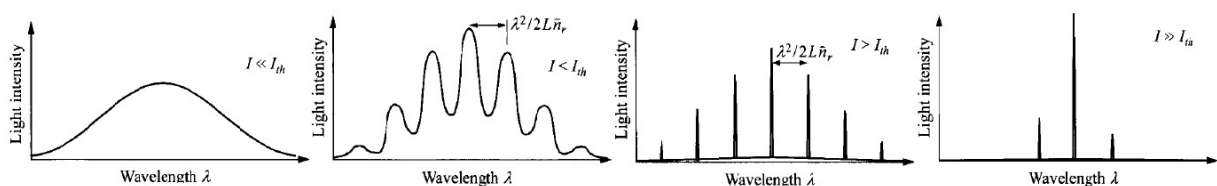
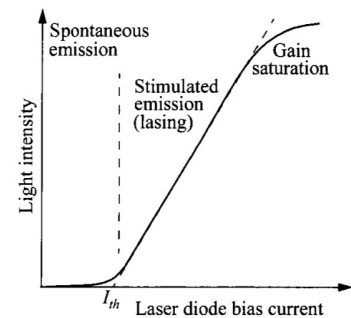


Pre účinnosť LED diód je dôležité, aby fotóny emitované v prechode dosiahli povrch súčastky (neboli absorbované). Povrchy LED svietidiel sú často pokryté fluorescenčným materiálom, ktorý podľa potreby transformuje vlnovú dĺžku (nahor). Takto možno dosiahnuť napr. biele svetlo.

Spínacia rýchlosť LED diód je limitovaná dobou života nosičov v oblasti prechodu.

Laserové diódy. Nerovnovážna koncentrácia nosičov vytvorená ich injektovaním do prechodu vytvára podmienky pre ich činnosť. Oblasť pn-prechodu musí byť ohraničená odrazivými rozhraniami (Fabryho-Perotov rezonátor). Koncentrácia injektovaných nosičov a teda aj optický výkon sú priamo úmerné napájacemu prúdu (v priepustnom smere). Pod prahovou hodnotou I_{th} ide o bežný režim LED diódy, nad I_{th} nastáva **stimulovaná** emisia – prítomnosť rezonátora vedie k zužovaniu emisných čiar. Aplikovaním tlaku (vplyv na šírku ZP aj rozmery rezonátora) je možné ladenie vlnovej dĺžky v určitom rozsahu.

Miniaturizáciou aktívnej oblasti do mikroskopických rozmerov je možné dosiahnuť kvantový režim (kvantové jamy či supermriežky), čím sa zníži prah stimulovanej emisie, zvýši kvantová účinnosť, zníži citlivosť na teplotu a zvýši rýchlosť aj rozsah preladovania vlnovej dĺžky.

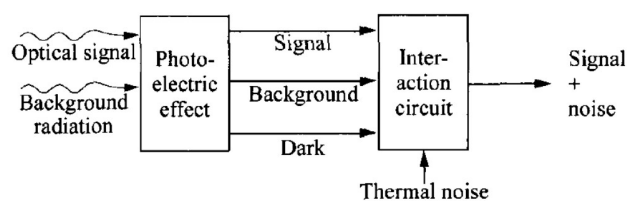


Fotodiódy. Elektrické pole v ochudobnenej oblasti pn-prechodu separuje fotónmi vygenerované páry elektrón – diery, ktoré vyvolávajú prúd vo vonkajšom obvode. Kvantová účinnosť (nárast prúdu na počet absorbovaných fotónov) narastá s veľkosťou ochudobnenej oblasti. Na druhej strane, rozmery tejto oblasti (doba prieletu) limitujú rýchlosť odozvy. Fotodiódy pracujú obvykle pri **závernom** napätí nedosahujúcom lavinový prieraz (kratšia doba prieletu a menšia kapacita prechodu zvyšujú rýchlosť odozvy). Prechod je často modifikovaný medzivrstvou intrinzického PV (p-i-n) kvôli nastaveniu kvantovej účinnosti a doby prieletu.

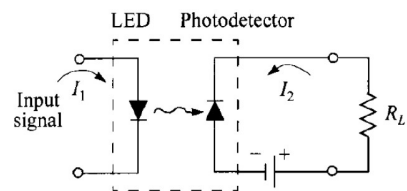


Citlivosť je limitovaná šumami a tzv. **tmavým prúdom**. Ten možno redukovať v *hetero*-prechode (materiály s rôznou šírkou ZP).

Lavinové fotodiódy. Pracujú pri **prieraznom závernom** napätí, lavinový prieraz spôsobuje výrazné zosilnenie prúdu za cenu zvýšeného šumu.

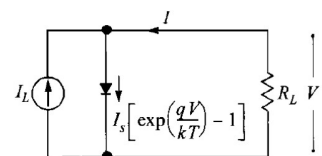


Oblúbeným využitím LED a fotodiód je **optočlen** – súčiastka slúžiaca k elektrickému oddeleniu obvodov. Doplnením o optický kábel medzi diódami dosiahneme prenos rýchlosťou svetla bez parazitných indukovaných napätí na vodičoch.



Fotovoltaické články. Elektrické pole v ochudobnenej oblasti fotodiódy **bez** napájacieho napätia separuje fotónmi generované páry elektrón - diery (elektróny do n-oblasti, diery do p-oblasti), teda generuje prúd cez externú záťaž v **závernom** smere (paralelný prúdový zdroj I_L v náhradnej schéme).

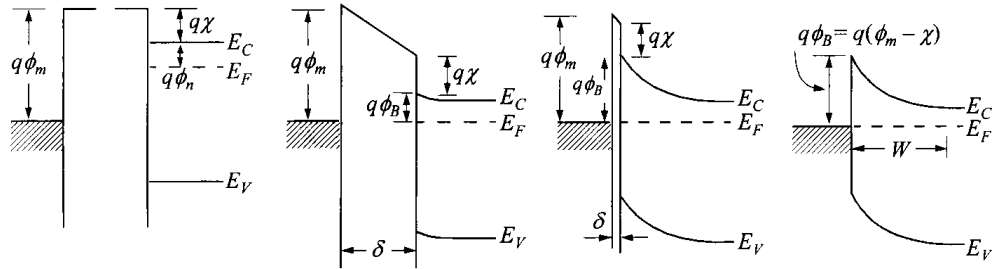
Prúd do záťaže je $I = I_s \left[\exp \left\{ \frac{qV}{k_B T} \right\} - 1 \right] - I_L$ a napätie naprázdno ($I = 0$) je $V = \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_s} + 1 \right)$





III. PRECHOD KOV - POLOVODIČ

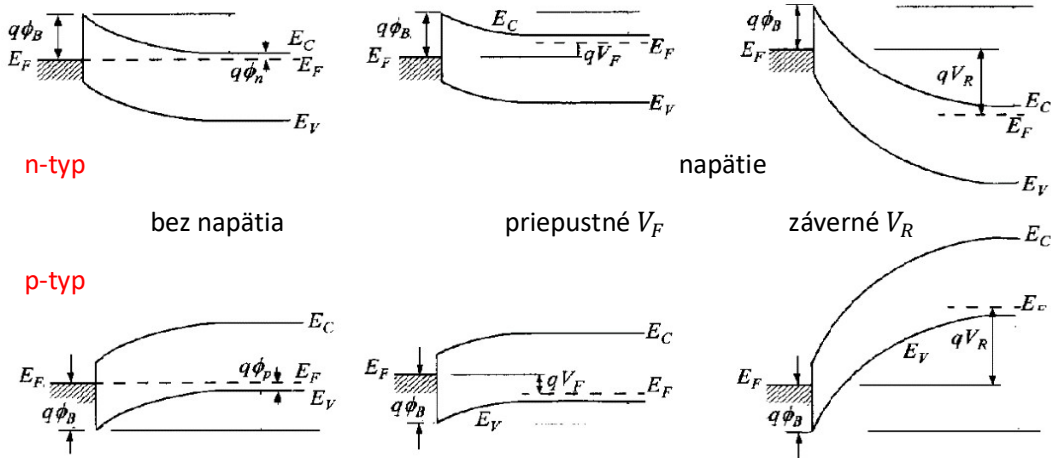
Prepojením kovu K a PV (n-tyt na obr.) cez vonkajší obvod dochádza k vyrovnaniu E_F (v n-PV sa E_F zníži o rozdiel výstupných prác z K a PV). Výstupná práca = rozdiel energií voľnej častice a častice na E_F . Stenčovaním bariéry medzi nimi ($\delta \rightarrow 0$) sa formuje potenciálová **Shottkyho bariéra** s **kontaktným napätím** ϕ_B .



Povrch K je záporne nabitý a oblasť zakrivenia pásov je ochodobnenou oblasťou s elektrickým poľom (kladný priestorový náboj v n-PV) o šírke W . Pre p-PV je priebeh **opačný**. Pre $\delta \rightarrow 0$ platí

$$q\phi_B = q(\phi_m - \chi) \quad \text{pre n-tyt}$$

$$q\phi_B = E_g - q(\phi_m - \chi) \quad \text{pre p-tyt}$$



n-tyt

bez napätia

napätie

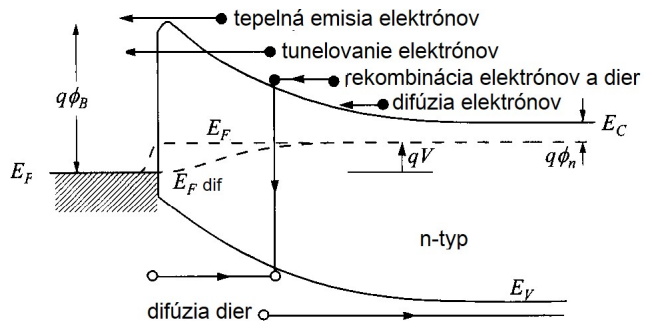
priepustné V_F

záverné V_R

p-tyt

Shottkyho bariéra má **usmerňujúci** účinok – v **závernom** smere je príliš vysoká na prenikanie majoritných nosičov medzi PV a K.

Základné mechanizmy transportu prúdu v **prie-pustnom** smere pre n-tyt (obr.)



Shottkyho diódy majú v porovnaní s pn-prechodom menšiu potenciálovú bariéru, a teda väčšie prúdy v priepustnom i závernom smere, menšie prahové (v priepustnom smere, $\approx 0,2V$) aj prierazné (v závernom smere) napätia. Vyššia mobilita elektrónov ich predurčuje na vf aplikácie.

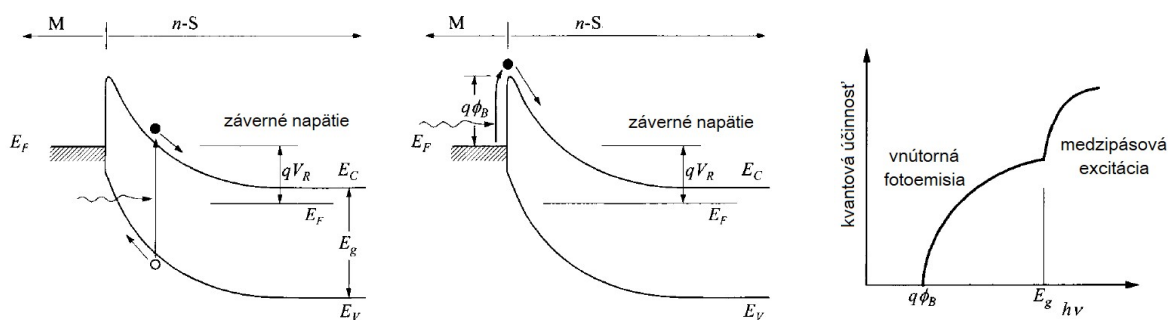


Diódy MIS (metal-insulator-semiconductor). Vložením tenkej ($\approx nm$) vrstvy izolantu (napr. oxidu kovu) vzniká **tunelový** kontakt obmedzujúci najmä tepelno-emisnú zložku prúdu.

Fotodiódy MS. Fotóny generujú nosiče náboja dvoma mechanizmami:

$h\nu > E_g$ - generácia páru elektrón-diera v PV – **medzipásová excitácia**

$h\nu < E_g$ - **vnútorná fotoemisnia** v kove – pohltitím fotónu je elektrón excitovaný (v náhodnom smere), pri správnom smere a prevýšení energetickej bariéry prispieva k fotoprúdu.



Tmavý prúd je spôsobený termoemisiou majoritných nosičov, v porovnaní s p-n diódami nemajú zotrvačnosť spôsobenú záchytným difundujúcich minoritných nosičov – vhodné na ultrarýchle aplikácie (100 GHz) vo viditeľnej a UV oblasti.

Lavínové fotodiódy MS. Pri veľkom závernom napätí pracujú v režime lavínového prierazu – veľké zosilnenie prúdu, za cenu zosilnenia šumu.

Fotočlánky MS a MIS. Výhodné z technologického hľadiska (výroba) aj kvôli vyššiemu výstupnému prúdu.

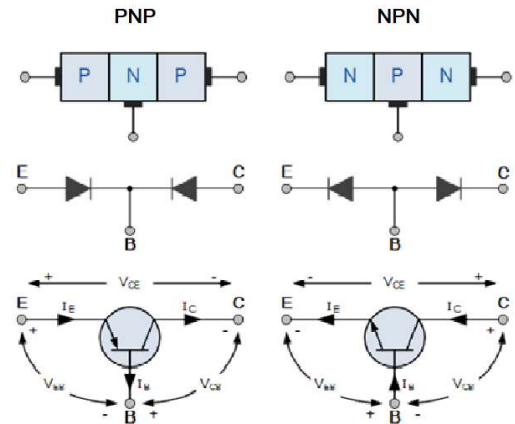
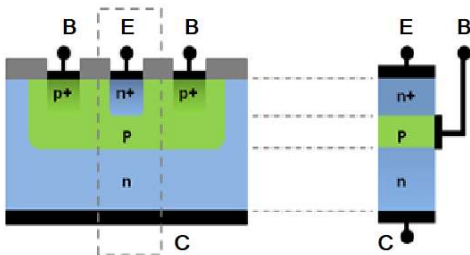
IV. BIPOLÁRNE TRANZISTORY

Bipolárne tranzistory (*transfer resistor*). Dvojica pn prechodov zapojených proti sebe: **PNP** alebo **NPN**.

E - **emitor** – silne dopovaný polovodič (10^{19})

B - **báza** – úzka vrstva ($\approx 0.2 \mu\text{m}$)
stredne dopovaného polovodiča (10^{17})

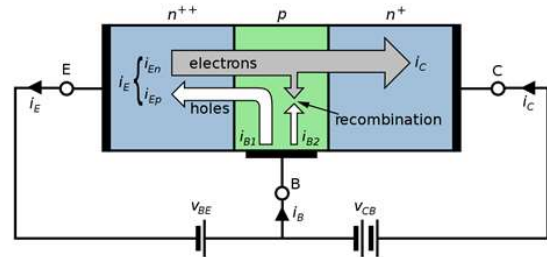
C - **kolektor** – slabo dopovaný polovodič (5×10^{15})



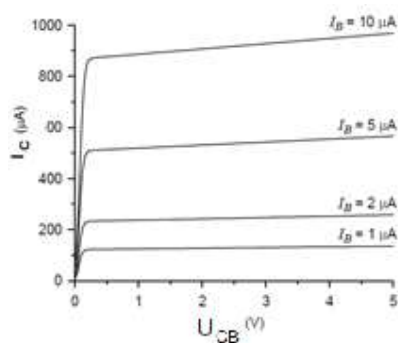
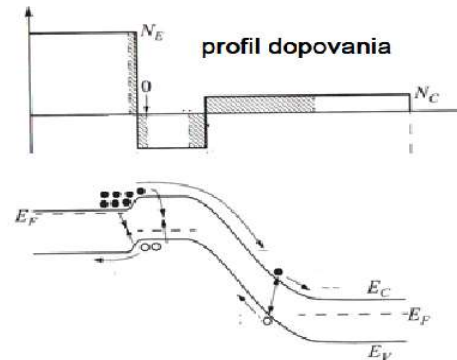
V aktívnom režime je:

prechod BE v **priepustnom** smere (malý odpor) – ochudobnená oblasť mierne zúžená (oproti TD rovnovážnemu stavu) s veľkým napäťovým spádom

prechod CB v **závernom** smere (veľký odpor) – ochudobnená oblasť výrazne rozšírená



BE prechodom v priepustnom smere preteká prúd elektrónov i diei (odtiaľ názov **bipolárny**) v pomere závislom od dopovania. Ak elektróny predifundujú (ako minoritné nosiče) tenkou B do ochudobnenej oblasti CB prechodu, elektrické pole ochudobnenej oblasti ich urýchli do C (tam sú majoritnými nosičmi). V ideálnom prípade je pomer $\frac{I_C}{I_B} = \beta$ rovný pomeru prúdov elektrónov a diei BE prechodom.

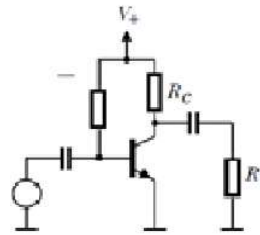


$$I_E = I_C + I_B \cong I_C = \alpha I_E \quad \alpha \cong 1 \quad \beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \cong 100$$

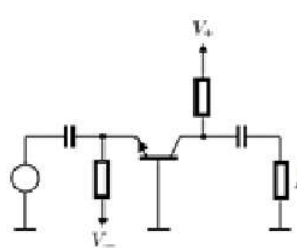
S nárastom U_{CB} sa rozširuje ochudobnená oblasť BC, čím sa báza zužuje. Pri dostatočne veľkom V_{CB} prechod CB zachytí všetky minoritné elektróny v báze, injektované z prechodu BE (nedochádza k rekombinácii v báze), a I_C sa nasýti.

Základné zapojenia tranzistora (NPN)

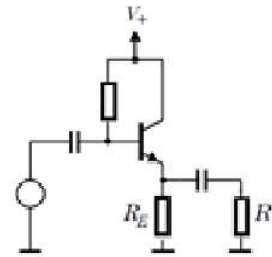
so spoločným emitorom (SE)



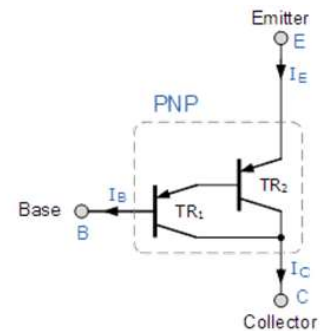
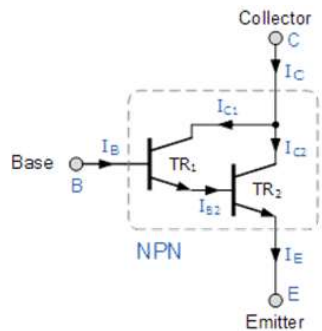
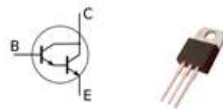
so spoločnou bázou (SB)



so spoločným kolektorom (SC)



Darlingtonovo zapojenie



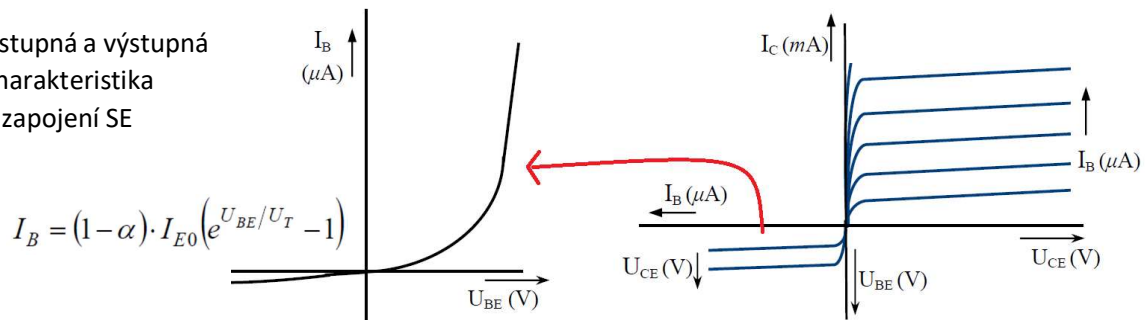
$$I_C = I_{C1} + I_{C2} = \beta_1 I_B + \beta_2 I_{B2}$$

$$I_{B2} = I_{E1} = I_{C1} + I_B = \beta_1 I_B + I_B$$

$$I_C = \beta_1 I_B + \beta_2 (\beta_1 + 1) I_B = (\beta_1 + (\beta_1 \beta_2) + \beta_2) I_B$$

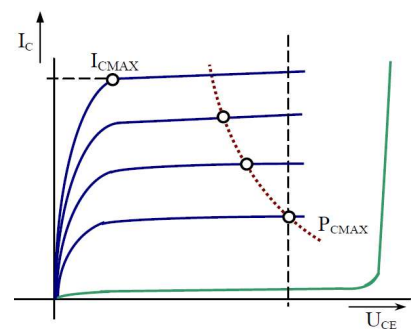
$$I_C \approx \beta_1 \beta_2 I_B$$

Vstupná a výstupná charakteristika v zapojení SE



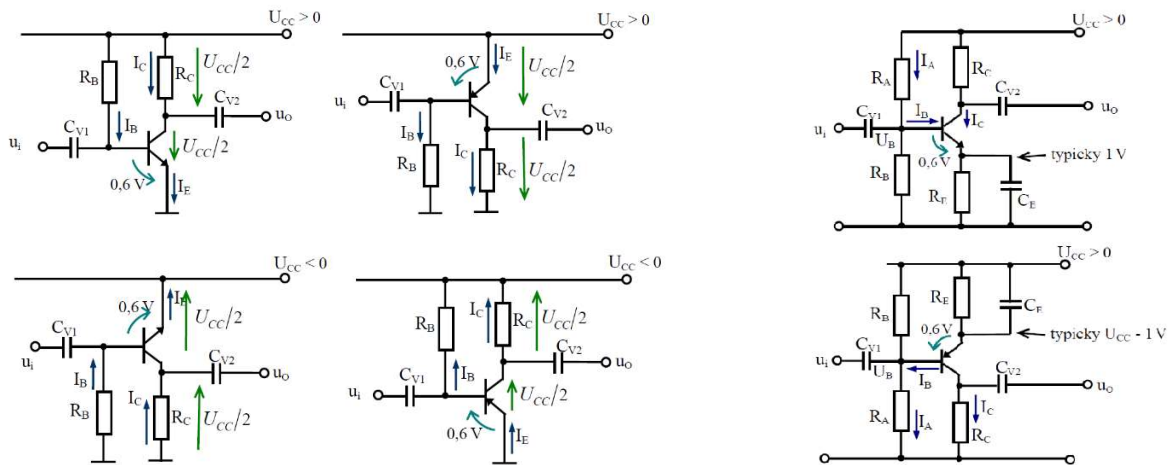
Napájacie napätie (V_+ , V_{CC} v schémach) nesmie presiahnuť prizerzné napätie prechodu CB !!! Kolektorový prúd nesmie presiahnuť maximálnu hodnotu, pri ktorej nastane prizeraz (nárazová ionizácia).

Výkonová strata v tranzistore (prakticky v prechode CB) $P = I_C U_{CE}$ nesmie presiahnuť parabolu hraničného výkonu.



Vysokofrekvenčné použitie je limitované kapacitami pn-prechodov (v kombinácii s vstupným odporom určujú hraničnú frekvenciu) a dobou preletu minoritných nosičov bázou.

Pre malé striedavé signály je treba nastaviť **pracovný bod** v osvedčených zapojeniach.



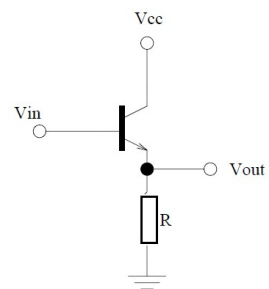
Emitorový sledovač.

Keďže pre jednosmerné napätia platí $U_{in} = U_{out} + 0,6V$, pre striedavé zložky musí platiť $u_{in} = u_{out}$ (jednotkový prenos napätia).

Prúdové zosilnenie je však $i_{out} = i_E = (1 + \beta) i_B = (1 + \beta) i_{in}$.

Vstupná impedancia je $Z_{in} = \frac{u_{in}}{i_{in}} = \frac{u_{out}}{i_{out}} (1 + \beta) = \frac{u_E}{i_E} (1 + \beta) = R(1 + \beta)$.

Vstupná impedancia sa teda zväčší faktorom ≈ 100 , a rovnakým faktorom sa zmenší výstupná impedancia.

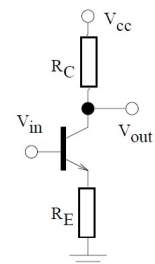


Napätový zosilňovač SE.

jednosmerné napätia $U_{in} = U_E + 0,6V$ $U_{out} = U_C = U_{cc} - I_C R_C$

premenné veličiny $u_{in} = u_E$ $u_{out} = -i_C R_C \approx -i_E R_C = -\frac{u_E}{R_E} R_C$

napätové zosilnenie $\frac{u_{out}}{u_{in}} = -\frac{R_C}{R_E}$

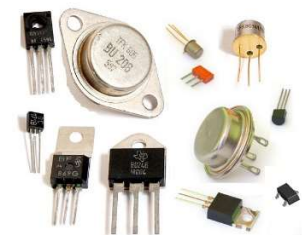
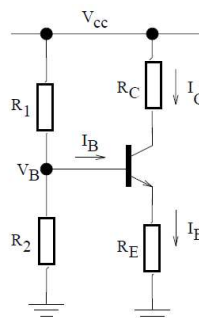


Prúdový zdroj.

$U_E = I_E R_E = (1 + \beta) I_B R_E$ $I_B = \frac{U_E}{(1 + \beta) R_E}$

$I_C = \beta I_B = \beta \frac{U_E}{(1 + \beta) R_E} = \frac{\beta}{1 + \beta} \frac{U_B - 0,6V}{R_E} \approx \frac{U_B - 0,6V}{R_E}$

Záťažou je rezistor R_C a prúd nezávisí od R_C .



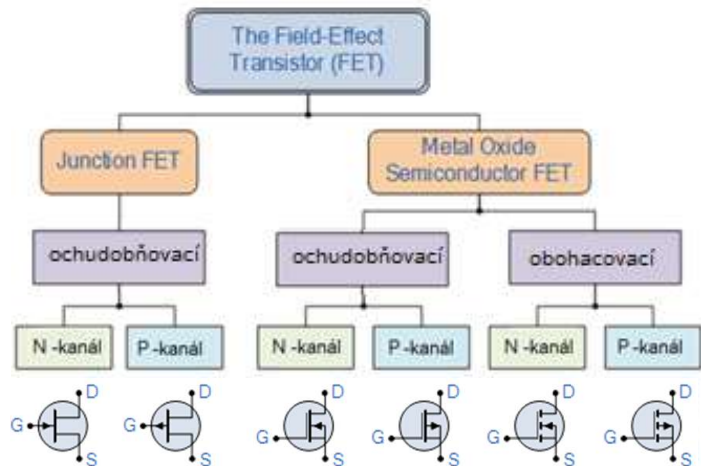
V. UNIPOLÁRNE TRANZISTORY

Medzi emitorom **S** (*source*) a kolektorom **D** (*drain*) existuje vodivý kanál s nosičmi náboja len jednej polariry (odtiaľ názov unipolárny). Vodivý kanál môže byť **zabudovaný** alebo **indukovaný**.

Vodivosť kanálu je riadená **kapacitne** – elektrickým poľom, prostredníctvom izolovaného **hradla G** (gate):

n-kanál – vodivosť sa zvyšuje pre $U_{GS} > 0$

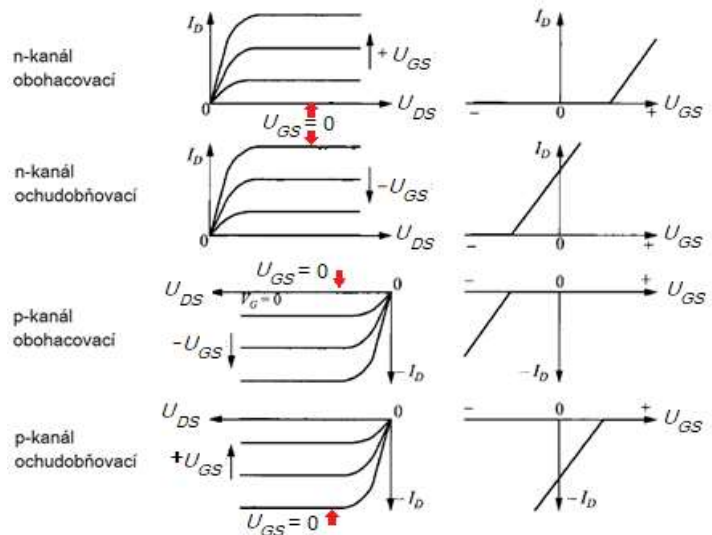
p-kanál – vodivosť sa zvyšuje pre $U_{GS} < 0$



FETy sú konštruované v dvoch režimoch:

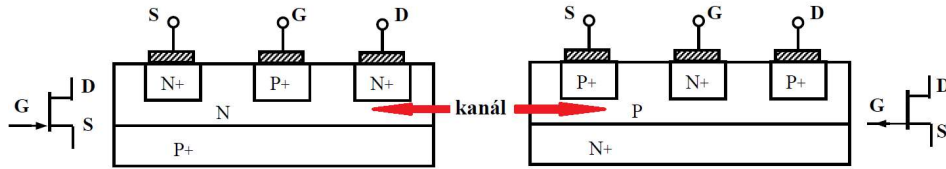
obohacovací („normally off“) – pre $U_{GS} = 0$ je kanál nevodivý, na vytvorenie vodivého kanálu treba $U_{GS} \neq 0$.

ochudobňovací („normally on“) – pre $U_{GS} = 0$ je kanál vodivý, nevodivým sa stane pri $U_{GS} \neq 0$.



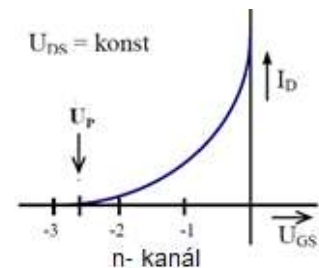
V porovnaní s bipolárnymi tranzistormi majú FETy vyššiu vstupnú impedanciu (hradlo je izolované) a vyššiu spínaciu rýchlosť (absencia minoritných nosičov vo vodivom kanáli). Rastúca teplota pri vysokých výkonoch vedie k zníženiu mobility nosičov a k saturovaniu rýchlosti – FETy sú preto stabilné pri výkonových aplikáciách. Absencia minoritných nosičov vylepšuje šumové vlastnosti (žiadny rozptyl minoritných nosičov na povrchoch a rozhraniach).

JFET tranzistor (*junction*). Spravidla sú konštruované pre **ochudobňovací** režim „normally on“ so zabudovaným kanálom. Hradlo predstavuje pn-prechod (vytvorený implantáciou alebo difúziou).



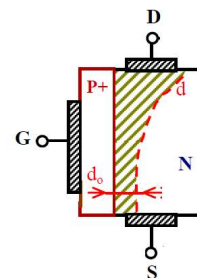
Musí platiť $U_{GS} \leq 0$ pre n-kanál ($U_{GS} \geq 0$ pre p-kanál), aby bol pn-prechod GS zatvorený ($I_G \approx 10^{-12}A$ v závernom smere, vstupný odpor $R_{GS} > 10^{12}\Omega$). Pre prípad otvorenia prechodu musí byť prúd (v priepustnom smere) obmedzený vonkajším rezistorom, inak hrozí zničenie.

Pri malom napätí U_{DS} (> 0 pre n-kanál, < 0 pre p-kanál) je prúd kanálom I_D malý a priamo úmerný U_{DS} . S nárastom $|U_{GS}|$ sa rozširuje ochudobnená vrstva v okolí hradla (nosiče náboja v kanáli sú odtlačané) – efektívny prierez kanála sa znižuje a odpor R_{DS} rastie. Po dosiahnutí **prahového** (*pinch-off*) napätia U_p sa kanál úplne priškrtní a $I_D \rightarrow 0$, $R_{DS} \approx 10^5\Omega$.

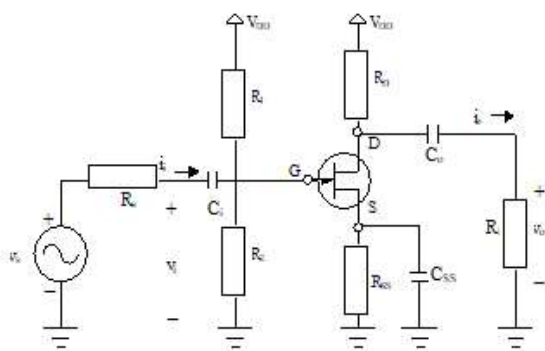


V úplne otvorenom stave $U_{GS} = 0$ je odpor kanálu $R_{DS} \approx 10^1 - 10^3\Omega$.

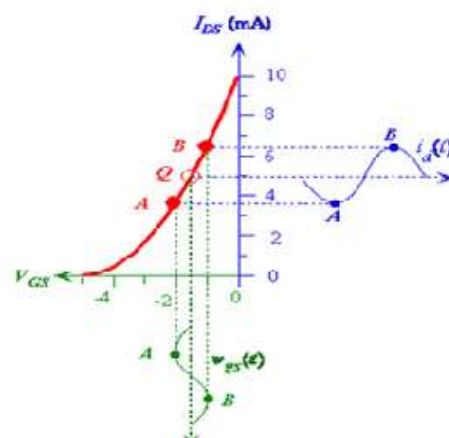
S postupným nárastom $|U_{DS}|$ (pri $U_{GS} \approx 0$) rastie I_D , súčasne sa polarizuje bázový prechod v **závernom** smere - rozširuje sa ochudobnená oblasť aj v okolí D, čím rastie R_{DS} (čo by znamenalo pokles I_D) - I_D sa ustáli – oblasť **saturácie**.



Ak $|U_{DS}|$ prekročí **prierazné** napätie, nastáva deštrukcia nárazovou ionizáciou.



zosilňovač



MESFET tranzistory (*metal-semiconductor*). Hradlo je tvorené Shottkyho kontaktom kov-kanál (namiesto pn prechodu). Princíp činnosti je rovnaký ako u JFETov. Príprava MESFETov je technologicky jednoduchšia. Výhodou je vyššia rýchlosť Shottkyho bariéry a nízky vstupný odpor hradla a nízky šum (v aplikácie, rýchle logické spínacie prvky). Prierazné napätie je však nižšie než u JFETov v dôsledku tunelovania a lavínového zosilnenia.

HFET tranzistory (*heterostructure*). Špecifikom je rozhranie medzi silno dopovanou podhradlovou vrstvou a slabo dopovaným kanálom. Nosiče náboja so silno dopovanej vrstvy difundujú do slabo dopovanej a vytvoria hetero-rozhranie. V tomto úzkom rozhraní (priestorovo oddelenom od silno dopovaného materiálu) predstavujú **2D-elektrónový plyn** s oveľa vyššou pohyblivosťou (nedochádza k rozptylu na nečistotách - dopantoch).

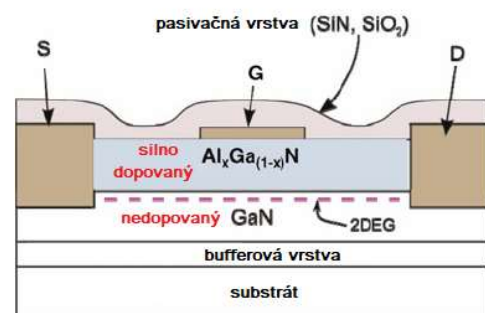
Používajú sa aj názvy:

MODFET (*modulation-doped*)

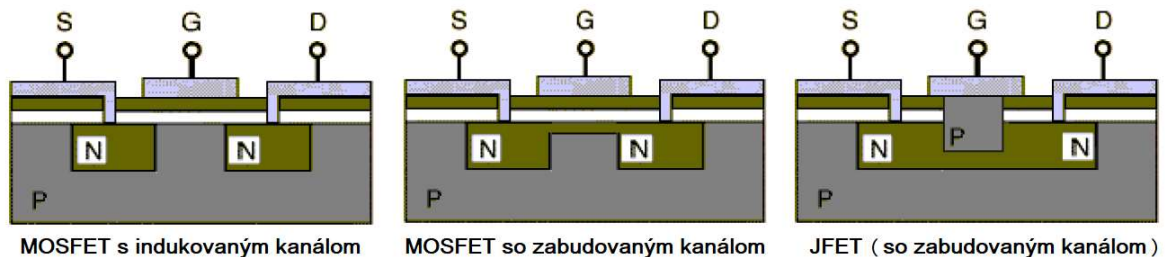
HEMT (*high electron mobility transistor*)

TEGFET (*two-dimensional electron gas*)

SDHT (*selectively doped heterojunction transistor*)



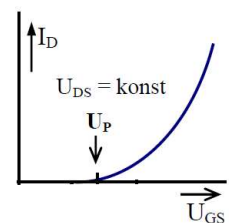
Využitie: nízkošumové zosilňovače, vF oscilátory a zmiešavače, vysokorýchlostné logické obvody a RAM.



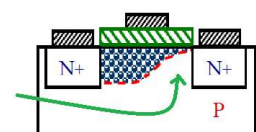
MOSFET tranzistory (*metal-oxid-semiconductor*). Najčastejšie FETy. Hradlo je izolované oxidovou vrstvou (vytvorenou tepelnou oxidáciou).

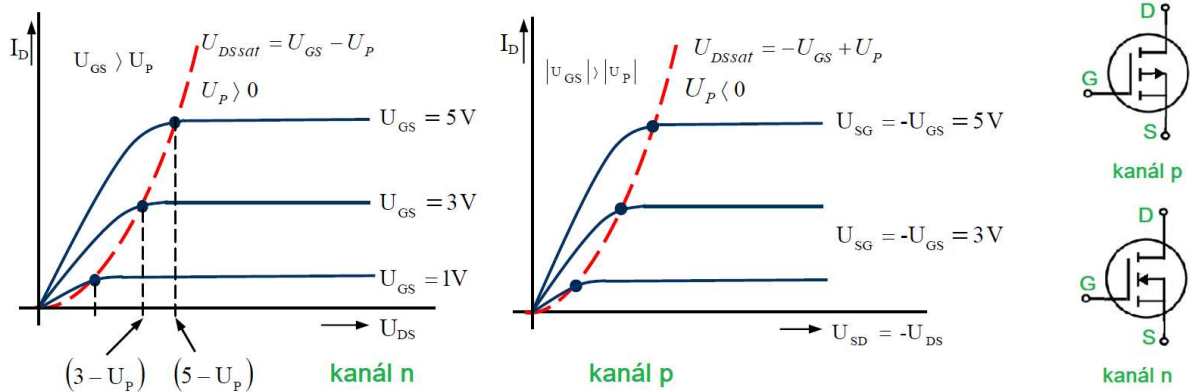
MOSFETy s **indukovaným** kanálom pracujú len v **obohacovacom** režime.

Pre $U_{GS} \leq 0$ a $U_{DS} > 0$ je tranzistor zavretý (predpokladajme n-kanál) – vodivý kanál neexistuje. Pre $U_{GS} > 0$ sú majoritné diery odpudzované od hradla, po prekročení $U_{GS} = U_p$ sa na rozhraní s hradlovým oxidom indukuje **inverzná vrstvička** s voľnými elektrónmi – vodivý kanál. S nárastom U_{GS} sa kanál obohacuje a rozširuje, a prúd narastá.

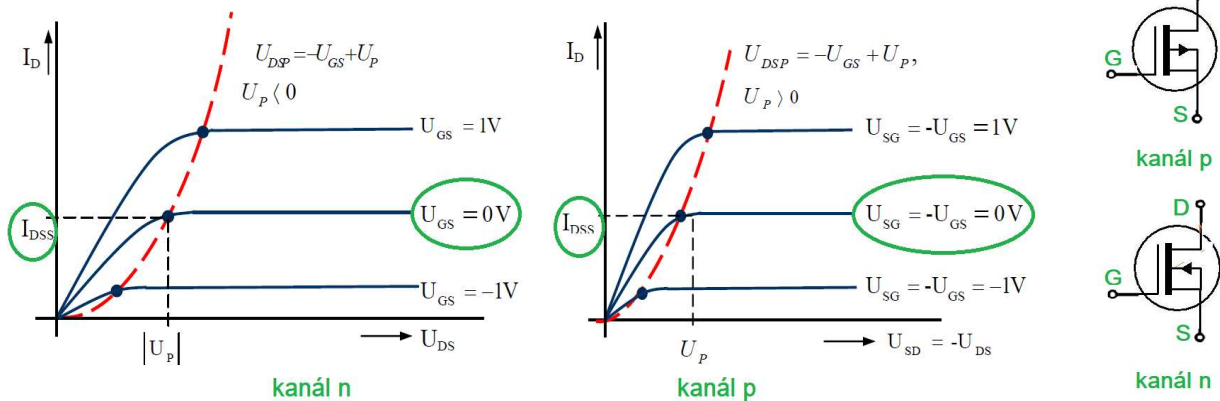


Nárast U_{DS} spôsobuje spočiatku lineárny nárast prúdu, postupne však znižuje potenciálový spád medzi hradlom a oblasťou p – indukovaný kanál sa priškrcuje. Pri $U_{DS} = U_{GS} - U_p$ dochádza k saturácii prúdu (*pinch-off*, podobne ako u JFETov).





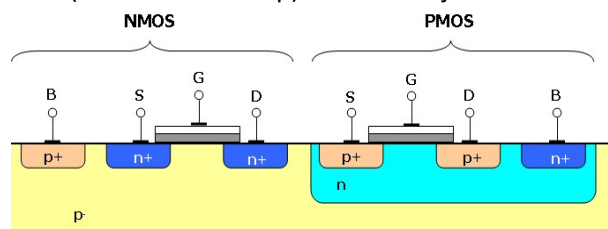
MOSFETY so **zabudovaným** kanálom pracujú v **ochudobňovacom** aj **obohacovacom** režime. Pri $U_{GS} = 0$ je kanál vodivý, kladným alebo záporným hradlovým napätím ho obohacujeme/ochudobňujeme (podľa typu kanála) o voľné nosiče – prúd sa zvyšuje/znižuje.

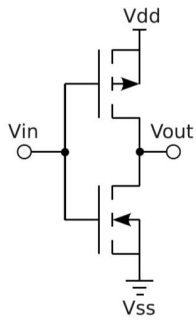


Oxidová izolačná vrstvička hradla je veľmi tenká ($\approx 50nm$), a veľmi ľahko môže nastať elektrický **prieraz** statickou elektrinou. Pri manipulácii s MOSFETmi sa preto vyžaduje obozretnosť – dodávajú sa so skratovanými vývodmi.

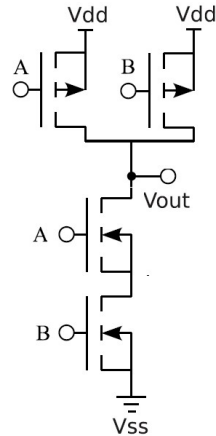
Spôsob nastavovania pracovného bodu FET tranzistorov je podobný ako pri bipolárnych tranzistoroch. Analogické sú aj základné zapojenia.

CMOS (*complementary MOS*) **technológia** je dominantná technológia prípravy najmä logických obvodov. Sériová kombinácia **komplementárnych** MOSFETov (s kanálom n a p) v obohacujúcom režime zabezpečuje, že vždy jeden z tranzistorov je zatvorený. V statickom režime teda netečie prakticky žiaden prúd (prúdový impulz preteká len počas prepínania), čo redukuje stratový výkon a umožňuje vysokú integráciu. Symetria tiež zvyšuje odolnosť voči šumom.

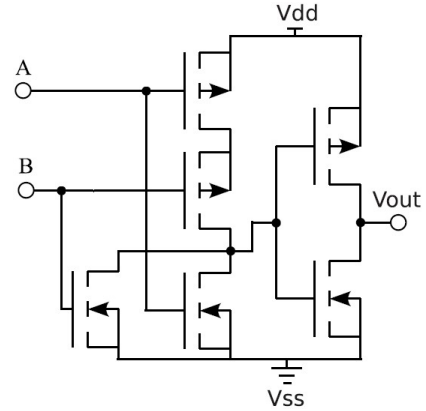




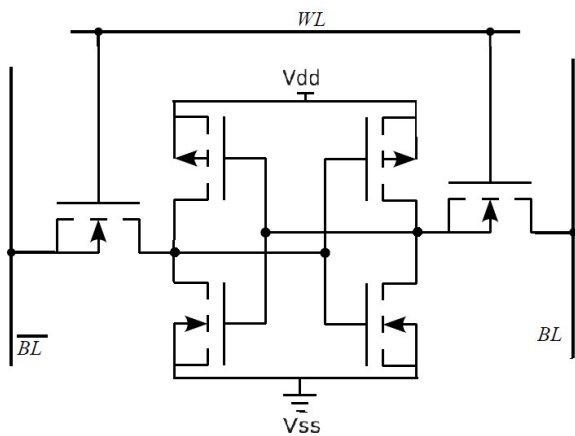
NOT



NAND

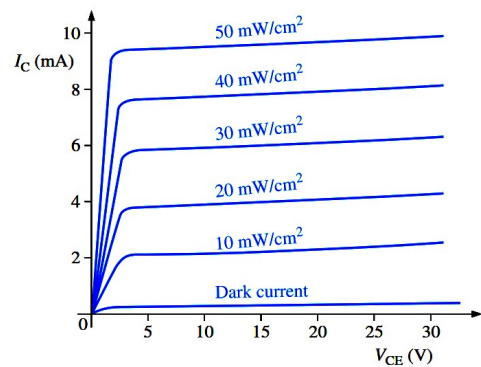
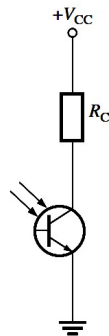
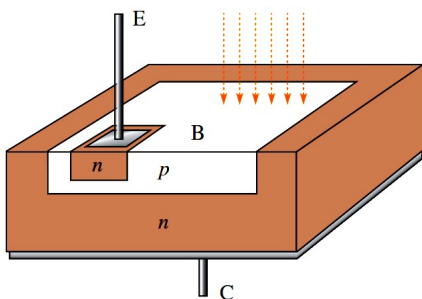


OR

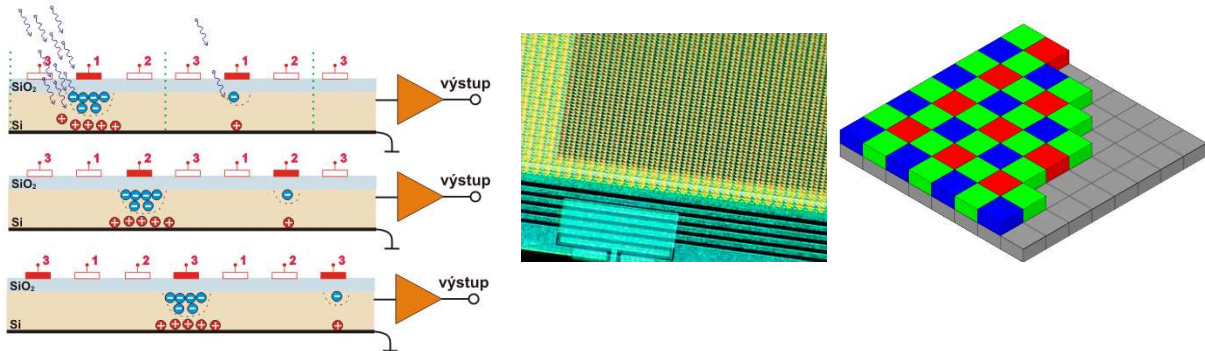


statická RAM

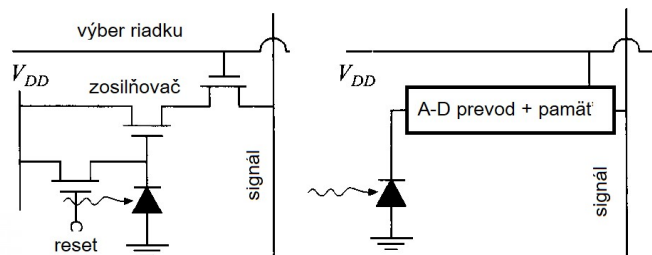
Fototranzistory. Sú to bipolárne tranzistory s masívnym svetlocitlivým prechodom CB. Fotónmi excitované diery v ochudobnenej oblasti prechodu vytvárajú bázový prúd (úmerný intenzite pohlteneho svetla) s rovnakým účinkom ako v štandardnom bipolárnom tranzistore, $I_C = \beta I_B$. Často sa vyrábajú v dvojpólovom prevedení (báza nie je elektricky napájaná).



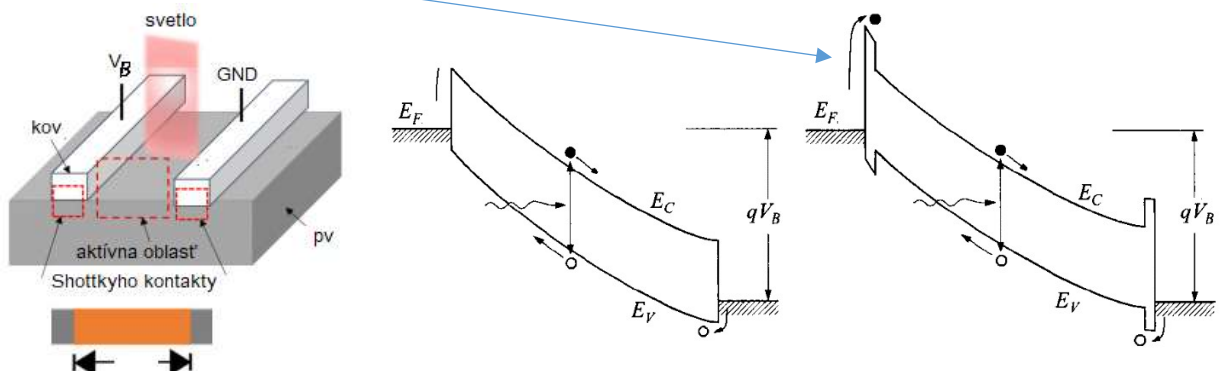
Nábojovo viazané súčiastky - CCD (*charge-coupled device*). Svetelnou expozíciou pixelu sú generované páry elektrón-diera v podobe nábojových balíkov, ktoré sú synchronizovanými impulzmi na radiacích hradlách presúvané (posuvné registre) na okraj štruktúry, kde sú sekvenčne zosilnené (v jednom uzle) bez potreby komplikovaného x-y adresovania pixelov. Farebné rozlíšenie sa deje pomocou RGB filtrov alebo integrovaných trojíc fotodiód (s rôznymi spektrálnymi citlivosťami). Technológia je MOS-kompatibilná.

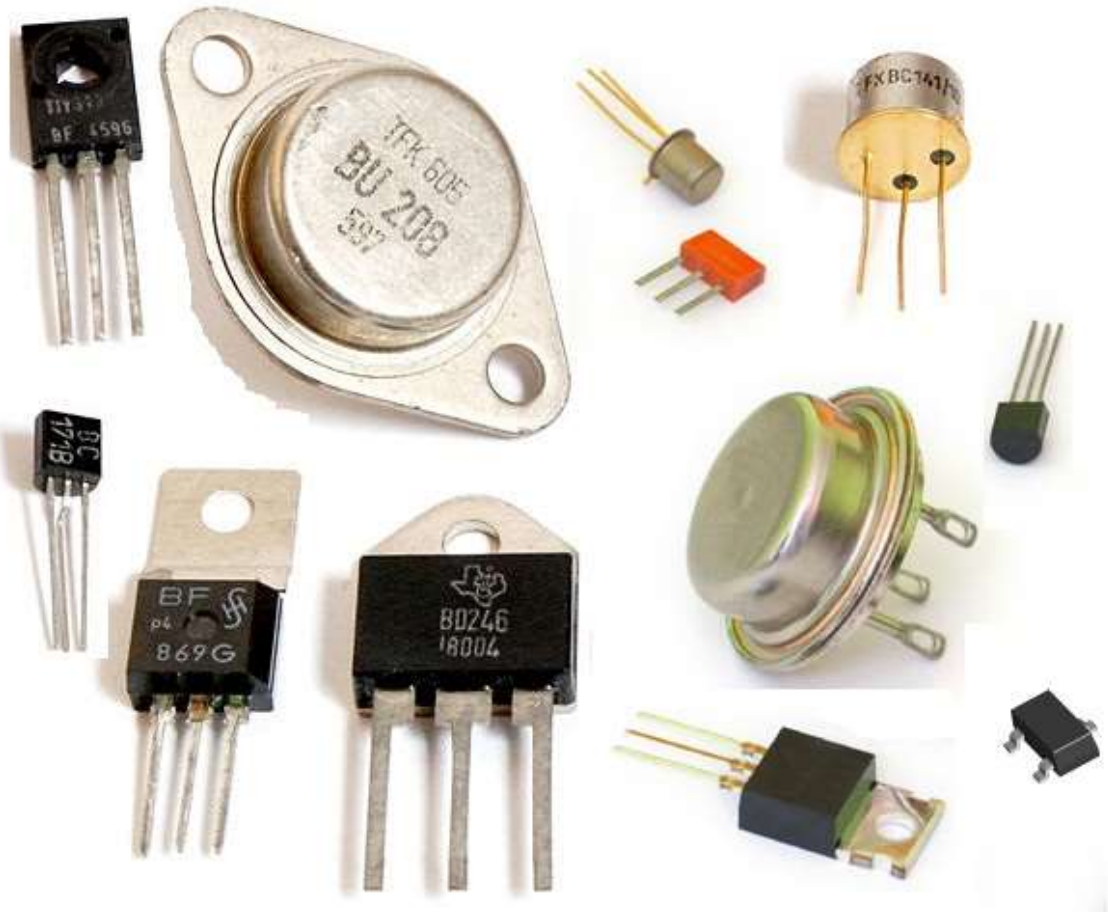


Snímače obrazu CMOS. Každý pixel predstavuje fotodiódu s CMOS spínačom a zosilňovačom (alebo A-D prevodníkom). Priame adresovanie pixelov zvyšuje rýchlosť a znižuje šum (oproti CCD).



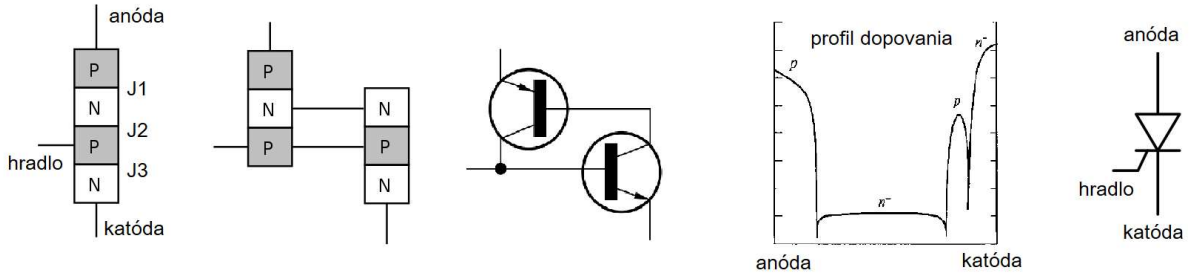
Fotodetektory MSM (*metal-semiconductor-metal*). Shottkyho diódy v tranzistorovom zapojení (FET-kompatibilné). Pomerne vysoký tmavý prúd Shottkyho bariéry (šumy) sa eliminuje pridaním tenkej vrstvičky zvyšujúcej bariéru. Výhodou je nízka kapacita Shottkyho bariéry – použiteľnosť do ≈ 100 GHz.



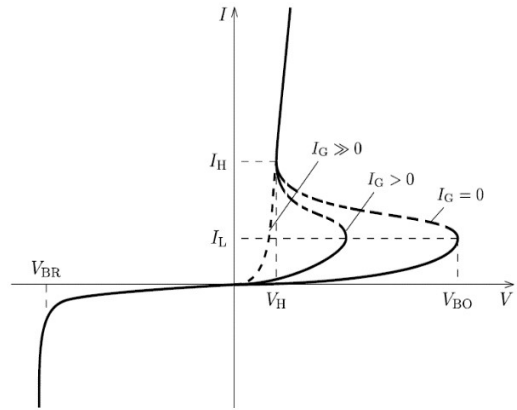


VI. TYRISTORY

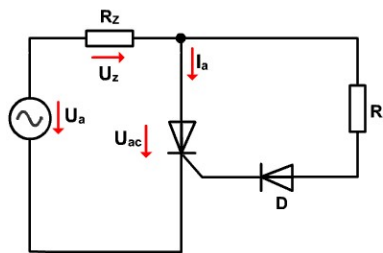
Tyristory. Sú bistabilné PV zariadenia prepínateľné medzi vysoko- (malé prúdy \approx mA) a nízkoodporovým (veľké prúdy \approx kA) stavom. Používajú sa na spínanie veľkých výkonov malým prúdom.



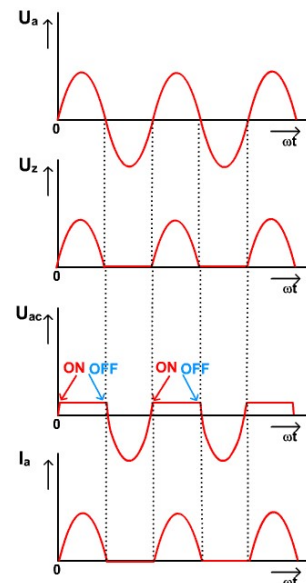
Ak $U_{AC} > 0$, prechody J1 a J3 sú zapojené v priepustnom smere a J2 v závernom. Prúd netečie pokiaľ U_{AC} neprekročí hodnotu **blokovacieho napätia** U_{BO} pre nedeštruktívny **lavínový prieraz** J2. Vtedy prúd prudko vzrastie a napätie poklesne (oblasť záporného dif. odporu). Prúdom I_G do hradla pri $U_{GC} > 0$ zvýšime koncentráciu nosičov v J2, čím sa zníži hodnota prierazného napätia $U_B < U_{BO}$. U_B tiež klesá úmerne rýchlosti zvyšovania U_{AC} (kapacitný prúd $\frac{dU_{AC}}{dt}$ má rovnaký účinok ako I_G). Po prieraze tyristor ostane v nízkoodporovom stave aj keď $I_G \rightarrow 0$.



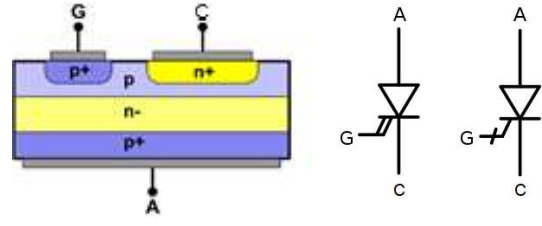
Blokovanie tyristoru nastane prepólovaním U_{AC} , resp. pokiaľ prúd tyristorom neklesne pod hodnotu **prídržného prúdu** I_H .



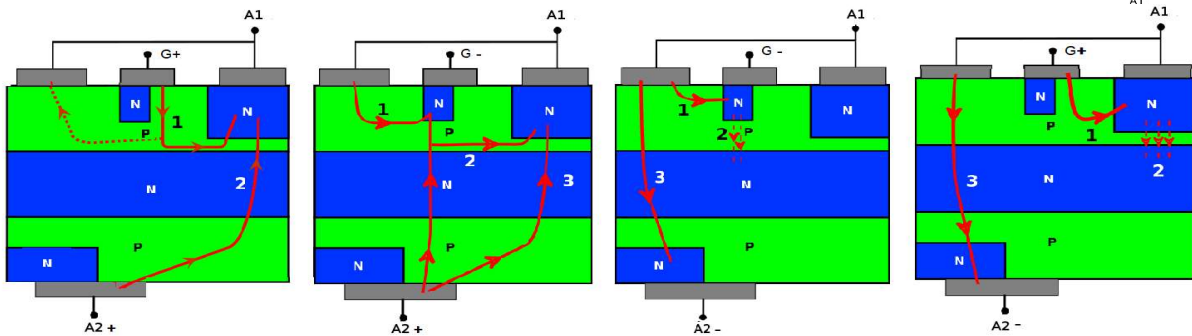
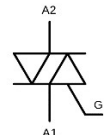
Spínacia rýchlosť je limitovaná **spínacím časom** t_{on} - dobou ustálenia prúdu po zapnutí U_B , a **vypínacím časom** t_{off} - dobou relaxácie tyristora do blokovaneho stavu po prerušení prúdu (rekombinácia nosičov v J2). Pokiaľ U_{AC} začne opäť narastať pred uplynutím t_{off} , tyristor predčasne zopne pri menšom napätí než $U_B(I_G)$.



GTO (gate turn-off) tyristory. Oproti klasickým tyristorom sú vypínateľné aj záporným riadiacim impulzom do G. V zopnutom režime však vyžadujú permanentný nenulový hradlový prúd, a pri vypínaní sa časť anódového prúdu musí odvieť hradlom. Použiteľný v pulzných generátoroch.

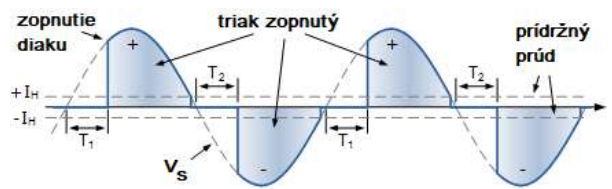
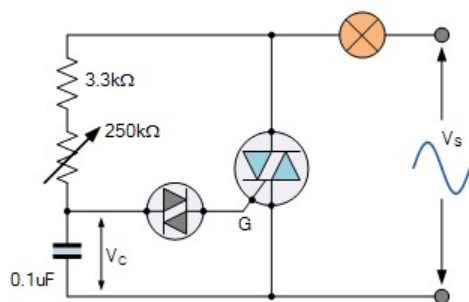
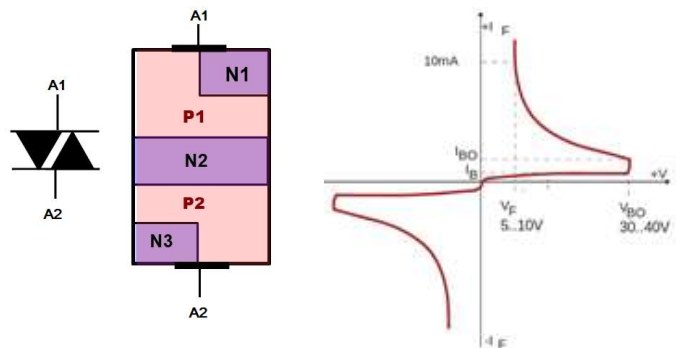


Triaky (triode for alternating current). Ako dva tyristory zapojené antiparalelne. Na rozdiel od klasických tyristorov umožňujú spínanie striedavých prúdov. Polarita G a A2 voči A1 určuje rozloženie a časovú následnosť vzniku prúdov v štruktúre.

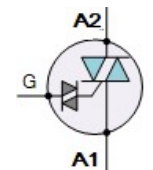


Zapínanie triaku sa uskutočňuje pre obe polarities spoločným hradlom, vypínanie je rovnaké ako pri tyristore. Zaťažiteľnosť (napäťová i prúdová) aj dynamické parametre sú horšie.

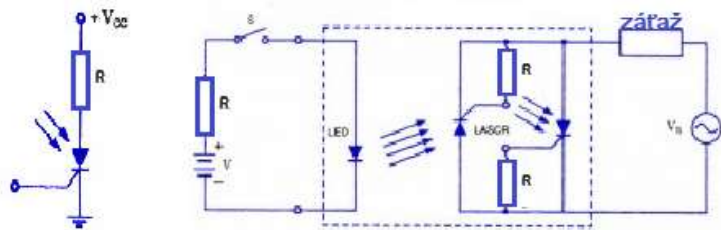
Diaky (diode for alternating current). Nemajú riadiace hradlo, spínajú sa len prierazným napätím, ostatné ako triaky.



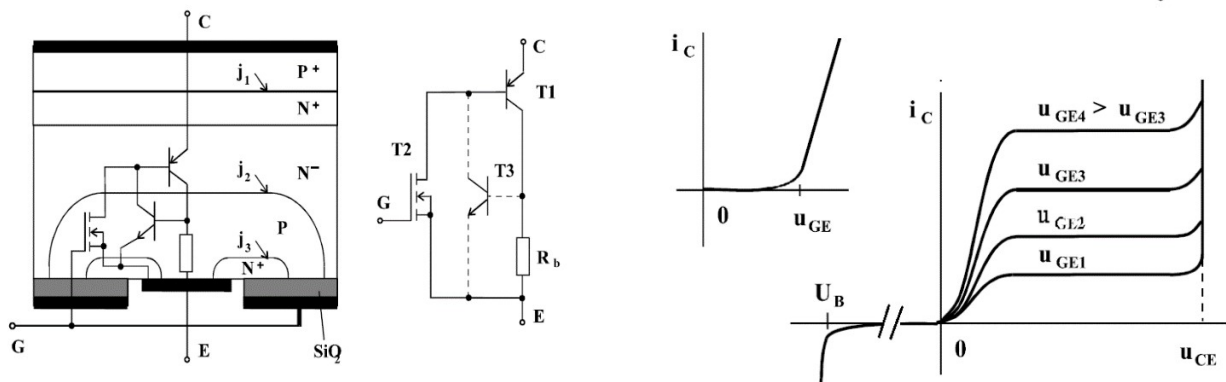
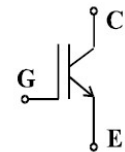
Regulácia prúdu záťažou (osvetlenie, otáčky motora) prostredníctvom odrezania časti cyklu. Časová konštanta RC určí fázové oneskorenie zopnutia diaku, vybíjací prúd kondenzátora je spínacím impulzom pre triak. Integrovaný diak a triak tvoria **kvadrak**.



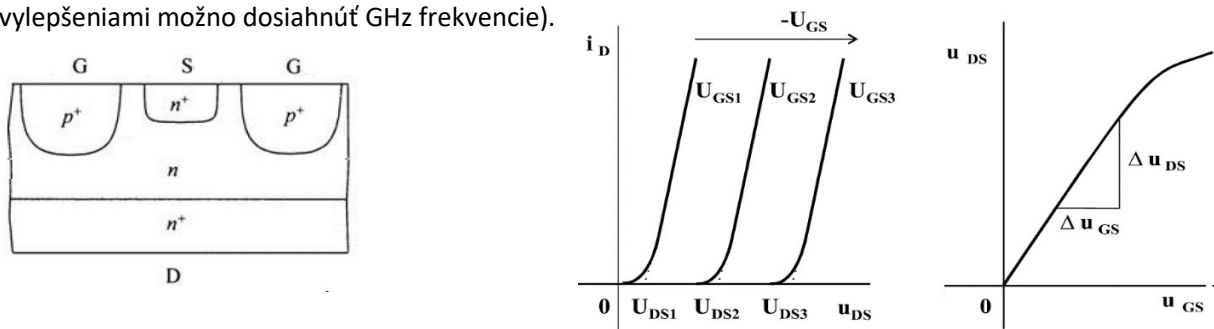
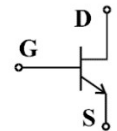
Fototyristory - LASCR (*light-activated semiconductor-controlled rectifier*). Okrem spínania hradlovým prúdom sú spínané aj svetlom. Použiteľné na relatívne malé výkony, napr. ako **relé**.



IGBT (*insulated gate bipolar transistor*). Integrovaný výkonový bipolárny tranzistor riadený MOSFETom. V otvorenom stave $I_C \approx 1500 \text{ A}$ pri $U_{CE} \approx 2,5-5 \text{ V}$. Napätová zaťažiteľnosť pri takomto prúde $\approx \text{kV}$. Použiteľný do 20-50 kHz.



SIT (*static induction transistor*). Pri $U_{GS} = 0$ je súčiastka zopnutá, majoritné nosiče tečú vodivým kanálom. Pri $U_{GS} < 0$ sa kanál priškrtní (okolo hradla vznikne oblasť bez majoritných nosičov). Priepustné napätie je pomerne veľké (desiatky V), spínacie časy sú však krátke ($< \mu\text{s}$, malá kapacita C_{GS}) – vysoké výkony aj frekvencie (technologickými vylepšeniami možno dosiahnúť GHz frekvencie).

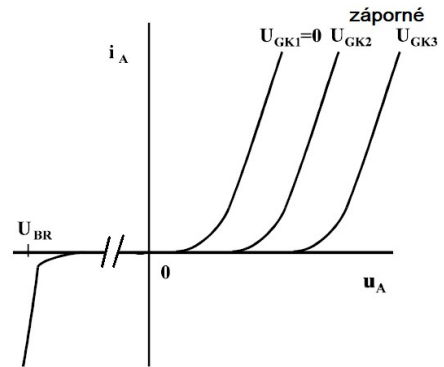
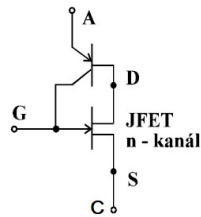
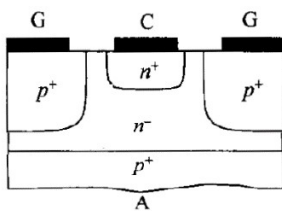
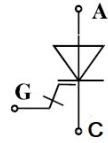


Čím vyššie je $U_{GS} < 0$, tým väčšie napätie štruktúra znesie v zavretom stave. Pomer $\mu = \frac{\Delta u_{DS}}{\Delta u_{GS}}$ sa nazýva **blokujúce zosilnenie**. Typické parametre sú 1500 V/100 A, resp. 600 V/300 A.

Použiteľné na indukčný ohrev, výkonné ultrazvukové a vf generátory/zosilňovače.

BSIT (*bipolar static induction transistor*). Verzia SIT so zavretým kanálom pri $U_{GS} = 0$.

SITH (*static induction thyristor*). Modifikácia JFETu s pridanou p^+ vrstvou pri anóde (dodávajúcej minoritné vodiče), čo znižuje odpor a napätie v otvorenom stave (pri veľkých prúdoch). Pri $U_{AC} > 0$ a nulovom hradlovom napätí je v otvorenom stave (*normally on*), priložením $U_{GC} < 0$ sa zavrie.



Typické parametre sú 1200 V/300 A a spínacie časy $\approx \mu s$. V priepustnom smere ≈ 5 V. Použiteľné napr. ako pulzné výkonové generátory.