

Základy elektroniky

kap.1-3

Linus Michaeli

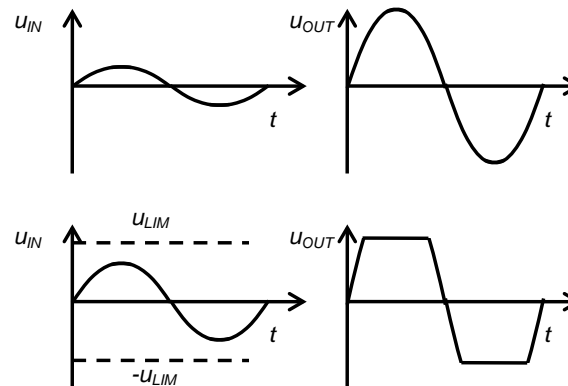
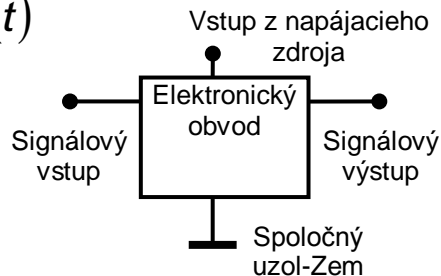
1.1 Základný koncept

Analýza obvodov založená na

- Princípy superpozície, Kirchhoffové zákony, teorémy náhradných zdrojov (Theveninova a Nortonová teoréma) ako aj princíp kompenzácie.
 - Použitie modelov zjednodušujúcich opis zložitých elektronických štruktúr (integrovaných obvodov) a diskretných prvkov
 - Zanedbanie vplyvov, ktoré sú pod zvolenou hladinou významnosti - modelovanie
1. Nastavenie jednosmerných elektrických veličín slúži na vytvorenie vnútorných elektrických polí potrebných pre činnosť aktívnych elektronických prvkov - Pracovné body - JS (DC) analýza
 2. Spracovávaný striedavý signál je superponovaný k týmto veličinám. Prvé priblíženie: superpozícia diferenciálneho príspevku. Signálová schéma linearizovaná - ST (AC) analýza.

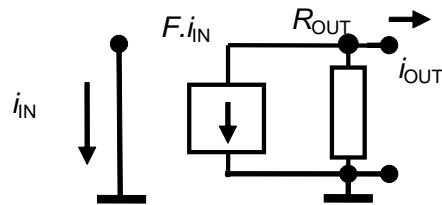
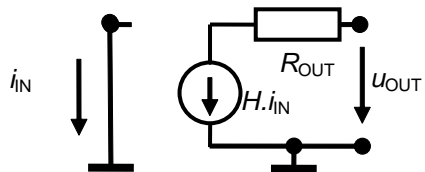
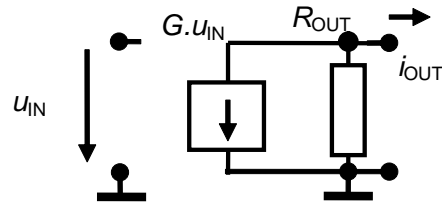
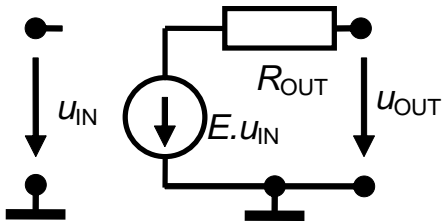
Potrebné si uvedomiť hranice dokedy tento prístup k analýze je dostatočne presný

$$y(t) = Y_0 + \left. \frac{\partial y}{\partial x} \right|_{Y_0} x(t)$$



1.2 Model riadeného zdroja

Zosilňovač signálu

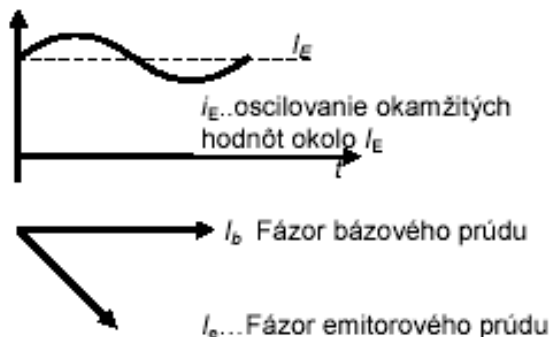


1.2 Označenia

Označenia v nasledujúcom texte:

- i a u - okamžité hodnoty. Index je veľký písmenom predstavujú celkovú hodnotu. Index s malým písmenom malý signál – jeho ST hodnotu.
- Veľké písmená kurzívou s indexom z veľkými písmenami (I_{AB}, U_{AB}) predstavujú JS veličiny.
- Veľké písmená kurzívou s indexom tvoreným malými písmenami (I_{ab}, I_{ab}) predstavujú rms fázor ST komponenty.

Napríklad: i_E predstavuje okamžitý emitorový prúd kde i_e tvorí jeho ST komponentu. Prúd I_E reprezentuje JS zložku tohto prúdu. Veličina I_e predstavuje rms fázor ST zložky emitorového prúdu



2 POLOVODIČE

2.1 Vlastné polovodiče

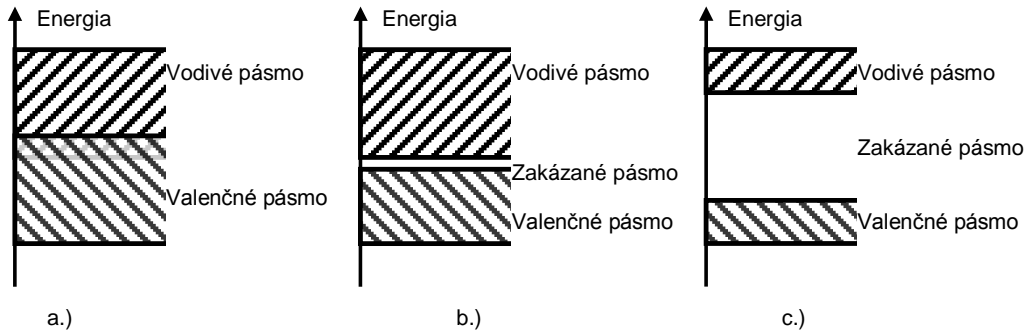
Vodiče: meď, hliník, alebo zlato, rezistivita rádovo $10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$

Izolanty: mika, diamant, krištál, zafír rezistivita rádovo $10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$

Polovodiče: Kremík $2,27 \cdot 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ Germánium je $4^5 \Omega \cdot \text{cm}$ galium arzenit $7,94 \cdot 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$

N_i je ustálená koncentrácia elektrónov (v elektrónoch na kubický centimeter) B je konštanta, ktorá závisí na materiále, T je teplota v K a k je Boltzmanova teplotná konštanta $86 \times 10^{-6} \text{ eV/K}$

$$N_i = BT^{3/2} \exp\left[\frac{-E_G}{2kT}\right]$$



Driftový prúd

$$J_{drift} = \sigma_i E = q(N_N \mu_N + N_P \mu_P) E$$

σ_i je vlastná vodivosť polovodiča q náboja elektrónu ($1,6 \cdot 10^{19} \text{ C}$). vlastná koncentrácia elektrónov a dier $P_i = N_i$. Konštanta μ_N, μ_P je pohyblivosť elektrónov a dier. Pohyblivosť elektrónov kremíka je $\mu_N = 1350 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ pohyblivosť dier je $\mu_P = 480 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$.

Materiál	E_G [eV]	B $[\text{cm}^{-3}(\text{K})^{-3/2}]$
Polovodiče		
Germánium (Ge)	0,67	$1,5 \cdot 10^{15}$
Kremík (Si)	1,1	$3,3 \cdot 10^{15}$
Gálium arsenid (GaAs)	1,4	$0,35 \cdot 10^{15}$
Gálium fosfor (GaP)	2,2	$1,2 \cdot 10^{15}$
Izolátory		
Diamant	5,5	$470 \cdot 10^{12}$
Kysličník kremičitý (SiO_2)	8	—

2 POLOVODIČE

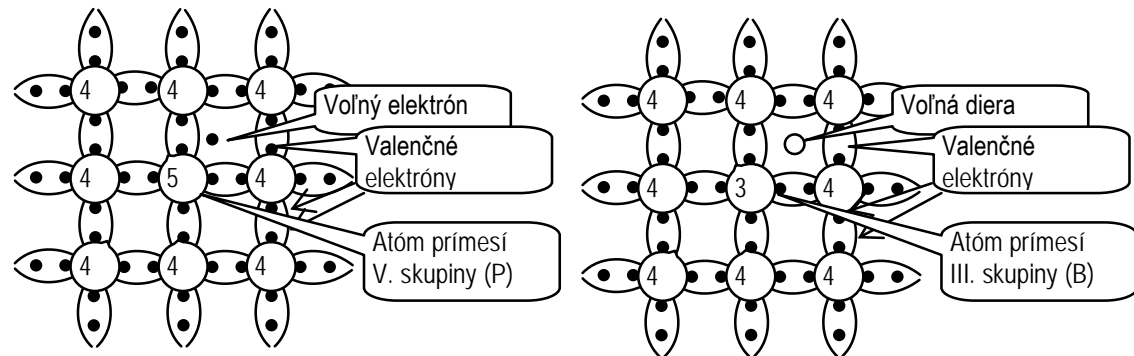
2.2 Prímesové polovodiče

Piaty elektrón z valenčnej sféry fosforového atómu (V) – **donor**-dáva negatívne náboje elektróny **N**
 Voľné miesto vo valenčnej sfére bóru (III) –akceptor- prijíma voľné elektróny –**diera** s kladným náboj. **P**

$$N_N N_P = N_i^2$$

$$N_N \cong N_d$$

$$N_P \cong \frac{N_i^2}{N_N}$$



Difúzny prúd

$$J_{dif} = -qD_P \frac{\partial N_P}{\partial x} \quad \text{pre diery}$$

$$J_{dif} = +qD_N \frac{\partial N_N}{\partial x} \quad \text{pre elektróny}$$

Výsledný prúd

$$J = q(N_N \mu_N + N_P \mu_P)E + q \left(D_N \frac{\partial N_N}{\partial x} - D_P \frac{\partial N_P}{\partial x} \right)$$

Väzba medzi pohyblivosťou a difúznou konštantou

$$\frac{D_N}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{q}$$

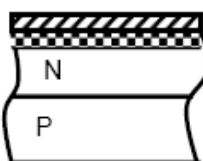
2

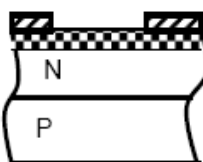
Technologické kroky

a.)  Základný plátok kryštálu kremíka dopovaného P

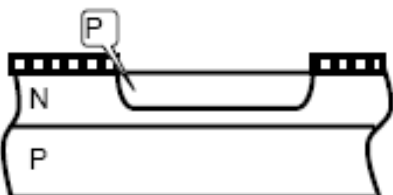
b.)  Epitaxná vrstva typu N

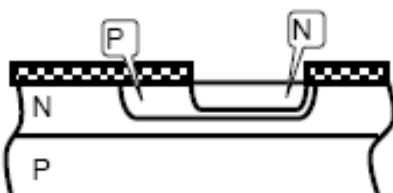
c.)  Ochranná vrstva SiO₂

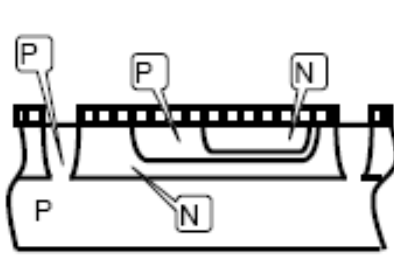
d.)  Fotocitlivý polymér

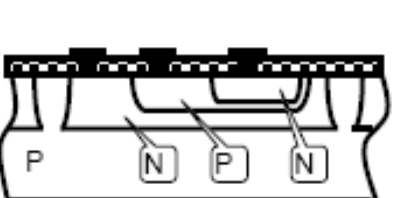
e.)  Odplavený fotoopticky exponovaný fotocitlivý polymér

f.)  Cez fotopolymér vyleptané okno v SiO₂

g.)  Difundovaná vrstva budúcej bázy typu P v atmosfére B

h.)  Opakovaním krokov c.)-g.) difundovaná zóna typu N. Vznik tranzistora typu NPN

i.)  Odizolovanie jednotlivých prvkov od okolia difundovaním "priekop" typu P opakovaním krokov c.)-g.). Priekopy predstavujú proti sebe diódy medzi ostrovmi typu N

j.)  Naparenie vodivých kontaktov a prepojev cez okná vyleptané v SiO₂ procesmi c.)-g.). Prepoje sú vyvedené na okraj čipu

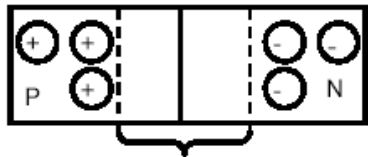
3 POLOVODIČOVÉ DIÓDY

Na konštrukciu diód sa využívajú tri typy polovodičov:

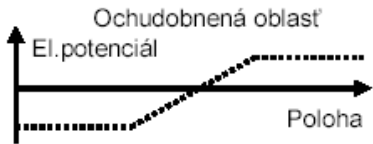
Germánium (Ge) (šírka zakázaného pásma 0,67 eV)

Kremík (Si) (šírka zakázaného pásma 1,1 eV)

Gálium arsenid (GaAs) (šírka zakázaného pásma 1,4 eV)



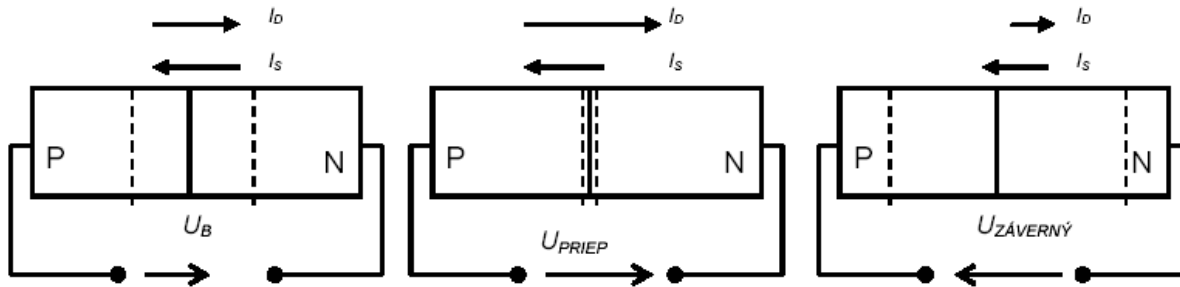
$$U_B = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_P N_N}{N_i^2} \right)$$



k - Boltzmanova konštanta $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K ($=8,6 \cdot 10^{-5}$ eV/K),

q - náboj elektrónu $q=1,6 \cdot 10^{-19}$ C . Pri izb.tepl.300 K $U_T=26$ mV. počet voľných nosičov Si $N_i^2=2,3 \cdot 10^{20}$

Za predpokladu konc.elektrónov $N_N=10^{19}$ /cm³ a koncentrácie dier v P polovodiči $N_P=10^{18}$ /cm³ . Výsledné barierové napätie je rovné 0,99 V.



Driftový prúd

Výsledný prúd diódou

$$N_N(-x) = N_{N0}(-x) \exp\left(\frac{qu_D}{kT}\right) \quad N'_N(-x) = N_N(-x) - N_{N0}(-x) = N_{P0}(-x) \left[\exp\left(\frac{qu_D}{kT}\right) - 1 \right]$$

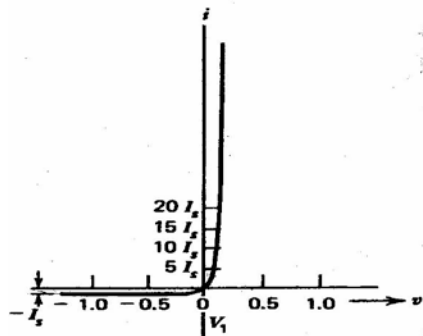
$$N_P(x) = N_{P0}(x) \exp\left(\frac{qu_D}{kT}\right) \quad N'_P(x) = N_P(x) - N_{P0}(x) = N_{P0}(x) \left[\exp\left(\frac{qu_D}{kT}\right) - 1 \right]$$

$$j_D = I_s \left[\exp\left(\frac{qu_D}{n \cdot kT}\right) - 1 \right] = I_s \left[\exp\left(\frac{u_D}{n \cdot U_T}\right) - 1 \right]$$

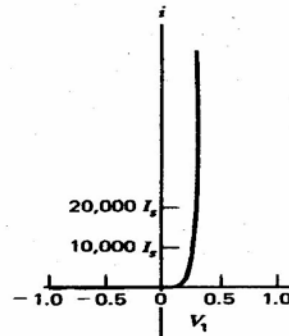
I_s zvyškový prúd

Ge $n=1$ Si $n=1,3-1,6$

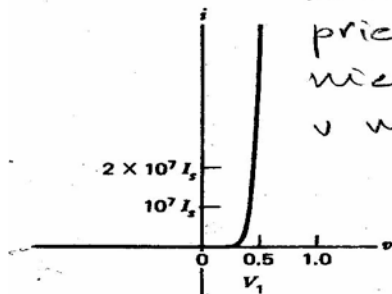
3 POLOVODIČOVÉ DIÓDY



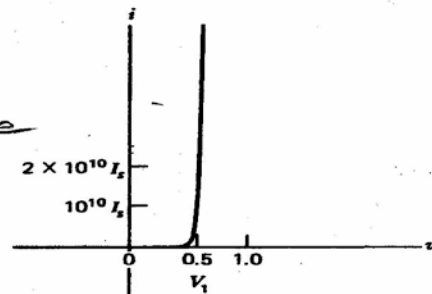
(a)



(b)



(c)



(d)

Lavínový
priebeh
nie je
v mierke

Kremíkové diódy 0,6 V

Kremíkový PN priedoch na IO 0,75 V

Germániové diódy 0,25 V

Gálium arzenidové diódy 1,2 V

Schottkyho diódy 0,3 V

3.1.1 Spracovanie malého signálu v priepustnom smere

Prírastkový prúd

Diferenciálny odpor

$$\Delta i_D = \frac{I_S \exp\left(\frac{U_D}{nU_T}\right)}{nU_T} \cdot \Delta u = r_D^{-1} \Delta u_D$$

$$r_D = \frac{\Delta u_D}{\Delta i_D} \cong \frac{nU_T}{I_S}$$

$$i_D = I_D + (I_D + I_S) \frac{q \cdot \Delta u_D}{n \cdot kT} \cong I_D + \frac{I_D \cdot q}{n \cdot kT} \cdot \Delta u_D$$

Vplyv teploty

Záverny saturačný prúd I_S je tiež závislý od teploty. Zdvojnásobuje sa približne pre každých 10 °C .

$$I_S(T) \cong I_S(T_0) \cdot 2^{\frac{(T-T_0)}{10}}$$

$$U_D = T \frac{nk}{q} \left[\ln \frac{I_D + I_S(T)}{I_S(T)} \right] = |I_D \gg I_S(T)| = T \frac{nk}{q} \left[\ln \frac{I_D}{I_S(T_0)} - \frac{T - T_0}{10} \ln 2 \right]$$

$$\frac{dU_D}{dT} \approx -\frac{nU_T}{10} \ln 2 = \begin{cases} -2.5 \text{ mV} & \text{Ge diódy} \\ -2.0 \text{ mV} & \text{Si diódy} \\ -1.5 \text{ mV} & \text{Schottkyho diódy} \end{cases}$$

3.1.3 Záverne polarizovaný PN prechod

Varikapy

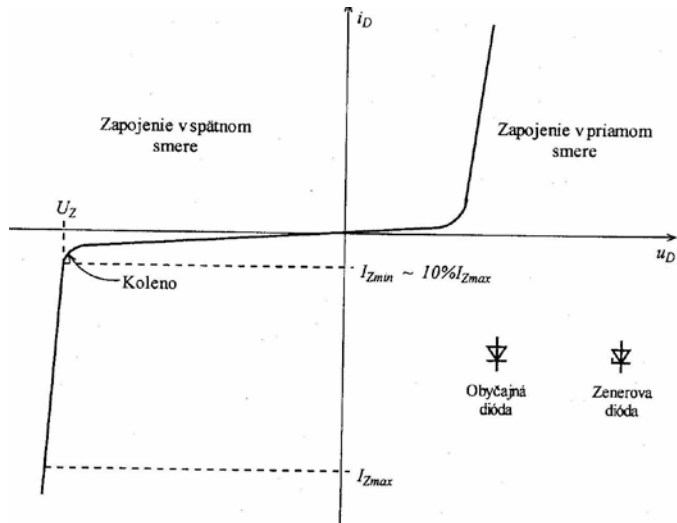
Záverne polarizovaná dióda = kondenzátor ochudobnená oblasť - dielektrikum s premennou hrúbkou

$$C_{SC} = c_0 A \left(1 - \frac{U_{JS}}{U_0} \right)^{-1/n}$$

Zenerové diódy

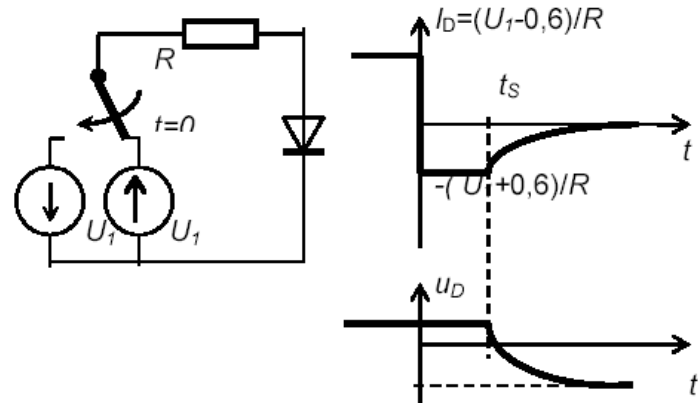
Prvým je Zenerov efekt, kvantovo mechanický princíp- tunelovanie. Silne dopovaných polovodičoch na obidvoch stranách prechodu, - úzka ochudobnená oblasť. Do 4 V

Druhý je lavínový efekt. Urýchlené voľné elektróny a diery nadobudnú tak veľkú kinetickú energiu - narážajú na kryštálovú mriežkou - generujú nové elektrón dierové páry. Nad 7 V



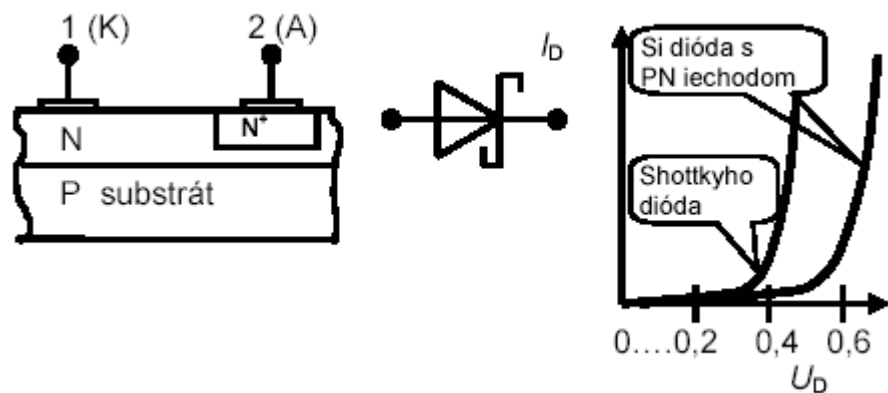
Prechod z priepustnej do závernej polarizácie

1. Rekombinácia nadbytočných nábojov
2. Vytvorenie odsýtenej oblasti - RC proces

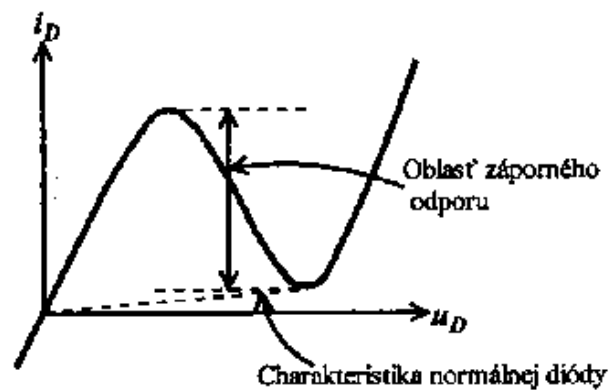


3.1.4 Iné typy diód

Schottkyho diódy



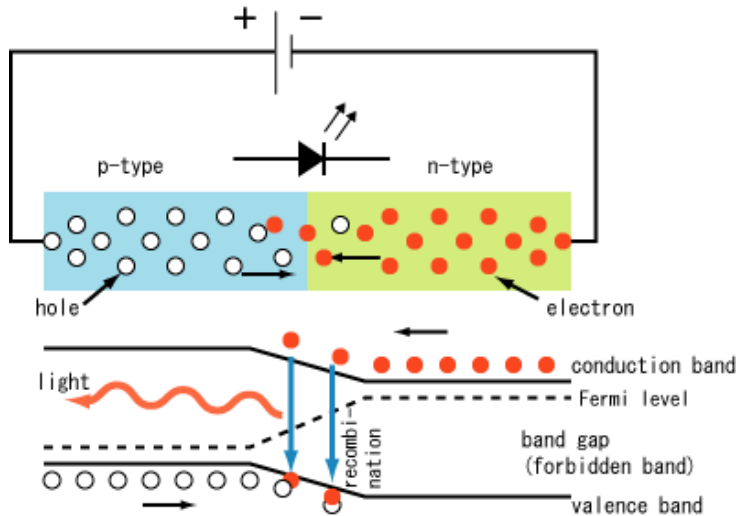
Tunelové diódy



3.1.4 Svetlo emitujúce diódy a fotodiódy

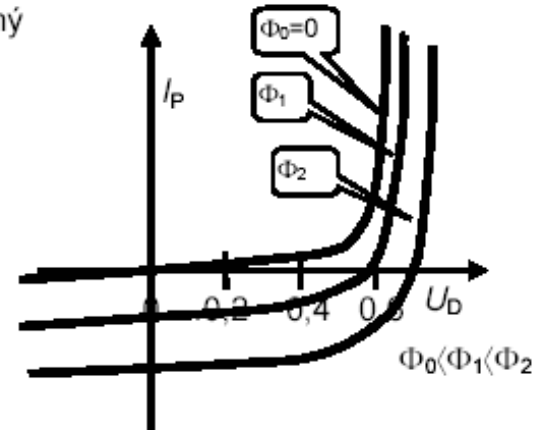
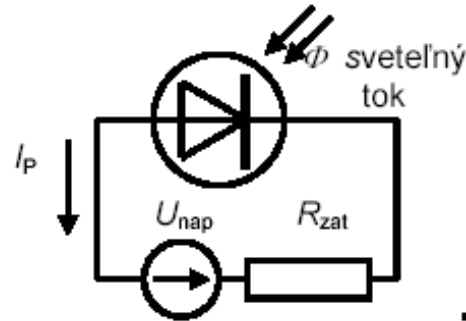
Svetloemitujúce diódy LED

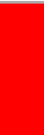






Určité typy diód sú schopné premeniť elektrickú energiu na svetelnú energiu. Svetlo emitujúce diódy (LED) transformujú elektrický prúd na svetlo. Elektrón pri prechode z valenčného do vodivostného môže uvoľniť energiu vo forme fotónu a tepla.



Fotodiódy

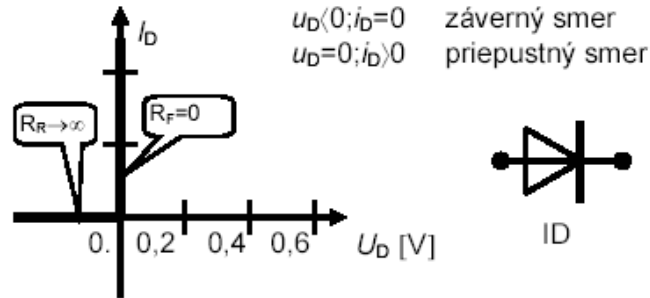
$$I_p = \eta \cdot q \cdot \Phi \quad \text{kde svetelný tok je} \quad \Phi = \rho \cdot A$$



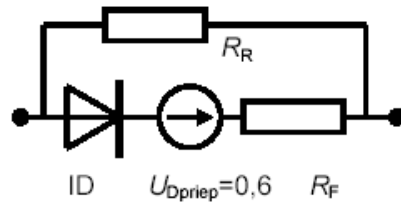
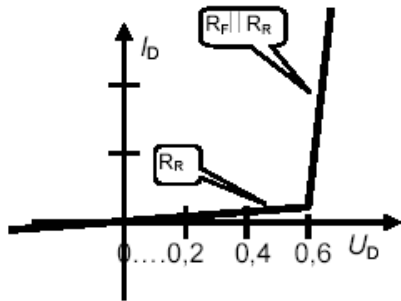
	Color	Wavelength (nm)	Voltage (V)	Semiconductor Material
	Infrared	$\lambda > 760$	$\Delta V < 1.9$	Gallium arsenide (GaAs) Aluminium gallium arsenide (AlGaAs)
	Red	$610 < \lambda < 760$	$1.63 < \Delta V < 2.03$	Aluminium gallium arsenide (AlGaAs) Gallium arsenide phosphide (GaAsP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Gallium(III) phosphide (GaP)
	Orange	$590 < \lambda < 610$	$2.03 < \Delta V < 2.10$	Gallium arsenide phosphide (GaAsP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Gallium(III) phosphide (GaP)
	Yellow	$570 < \lambda < 590$	$2.10 < \Delta V < 2.18$	Gallium arsenide phosphide (GaAsP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Gallium(III) phosphide (GaP)
	Green	$500 < \lambda < 570$	$1.9^{[32]} < \Delta V < 4.0$	Indium gallium nitride (InGaN) / Gallium(III) nitride (GaN) Gallium(III) phosphide (GaP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Aluminium gallium phosphide (AlGaP)
	Blue	$450 < \lambda < 500$	$2.48 < \Delta V < 3.7$	Zinc selenide (ZnSe) Indium gallium nitride (InGaN) Silicon carbide (SiC) as substrate Silicon (Si) as substrate — (under development)
	Violet	$400 < \lambda < 450$	$2.76 < \Delta V < 4.0$	Indium gallium nitride (InGaN)
	Purple	multiple types	$2.48 < \Delta V < 3.7$	Dual blue/red LEDs, blue with red phosphor, or white with purple plastic
	Ultraviolet	$\lambda < 400$	$3.1 < \Delta V < 4.4$	diamond (235 nm) ^[33] Boron nitride (215 nm) ^{[34][35]} Aluminium nitride (AlN) (210 nm) ^[36] Aluminium gallium nitride (AlGaN) Aluminium gallium indium nitride (AlGaInN) — (down to 210 nm) ^[37]
	White	Broad spectrum	$\Delta V = 3.5$	Blue/UV diode with yellow phosphor

3.2 Modely diód

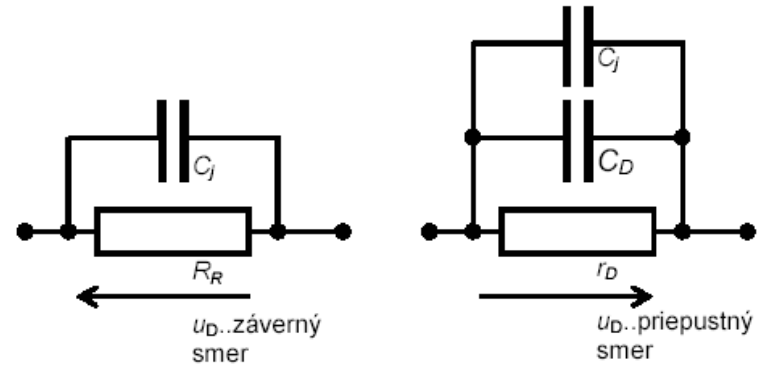
Model ideálnej diódy I_D



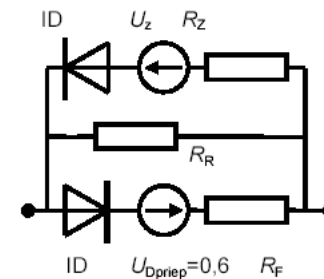
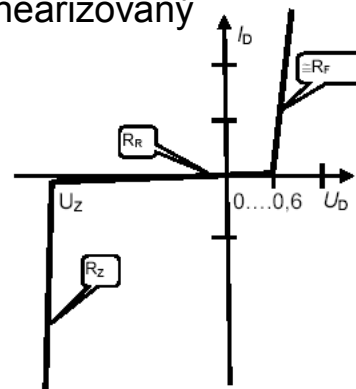
Model po častiach lineárnej diódy



Prírastkový model v závernom a priepustnom smere



Model Zenerovej diódy – po častiach linearizovaný

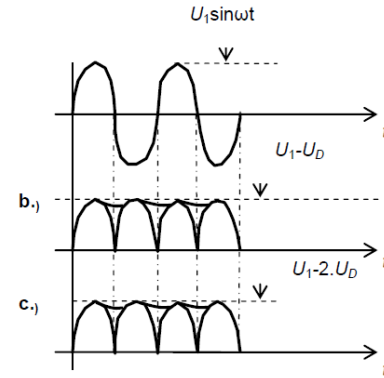
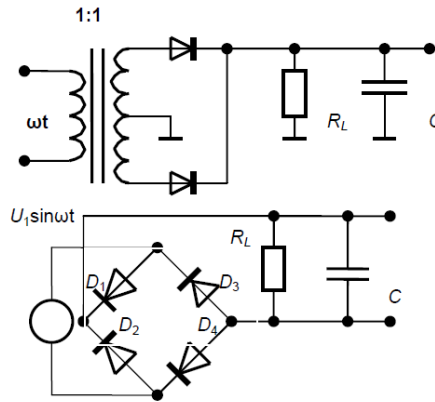
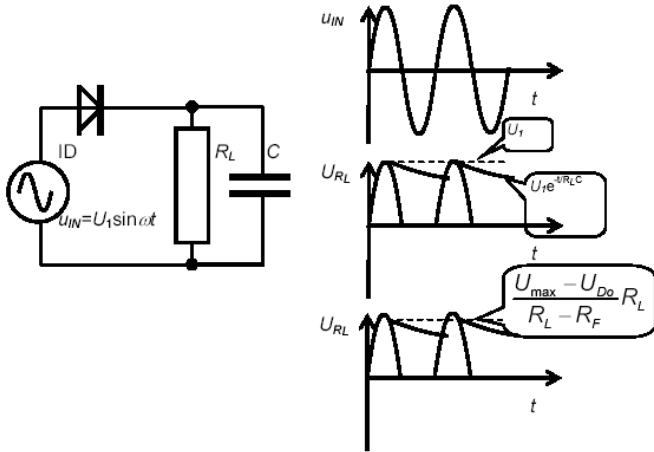


3.3 Aplikácia diód

Jednocestný usmerňovač

a

Dvojcestný usmerňovač



RC filtrácia a zvlnenie, určenie filtračného kondenzátora

$$u_C = U_2 \exp\left(-\frac{t}{R_L C}\right) = \text{pre } t \ll R_L C \approx U_2 \left(1 - \frac{t}{R_L C}\right)$$

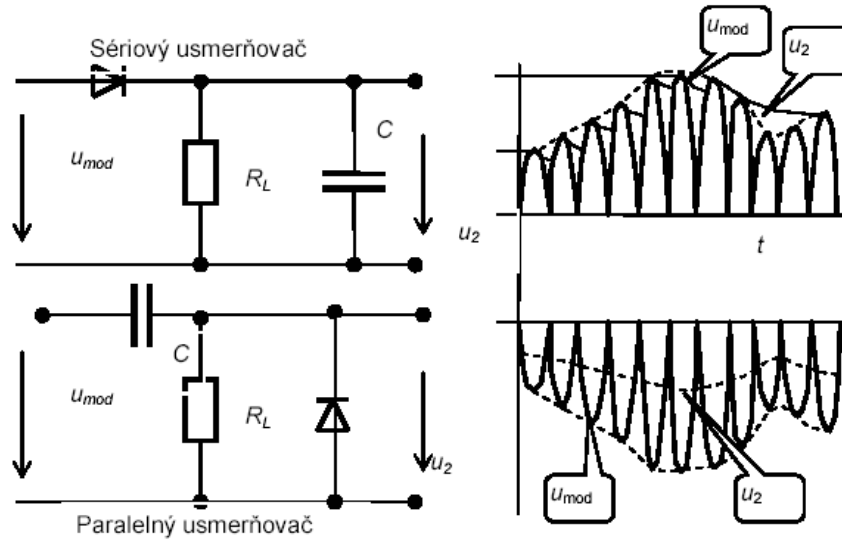
$$\Delta U = U_2 \cdot \frac{T}{R_L C}$$

$$C = U_2 \cdot \frac{T}{R_L \Delta U}$$

$$U_{JS} = U_2 \left(1 - \frac{T}{2 \cdot R_L C}\right)$$

3.3 Aplikácia diód

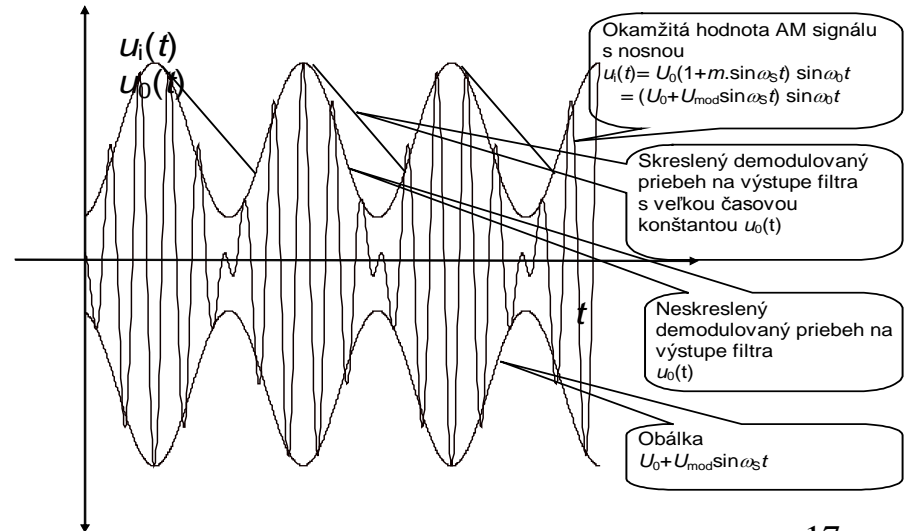
Demodulátor Amplitúdovo modulovaného signálu



$$\frac{du_S}{dt} = \frac{d[U_0 \cdot (1 + m \cdot \sin \omega_S t)]}{dt} = \omega_S m \cdot U_0 \cdot \cos \omega_S t$$

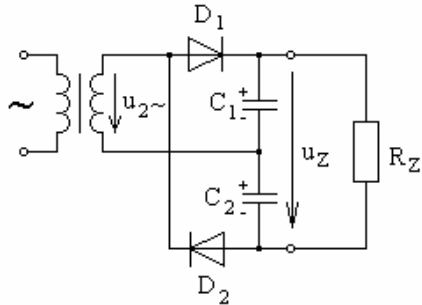
$$\left| \frac{du_S}{dt} \right| = |\omega_S m \cdot U_0 \cdot \cos \omega_S t| \leq \left| \frac{du_C}{dt} \right| = \left| \frac{U_0 \cdot (1 + m \cdot \sin \omega_S t)}{-RC} \right|$$

$$RC \leq \frac{1}{m \omega_S}$$

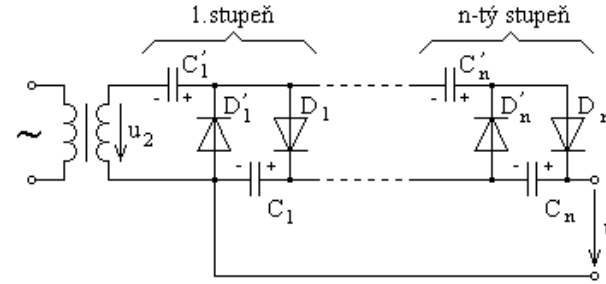


3.3 Aplikácia diód

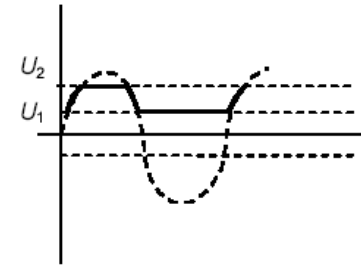
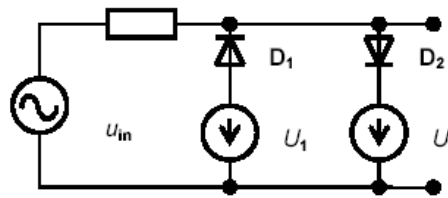
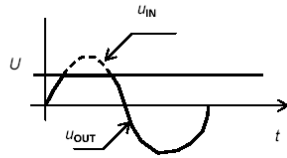
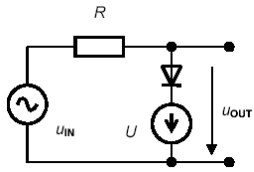
Násobič napätia
zdvojovač



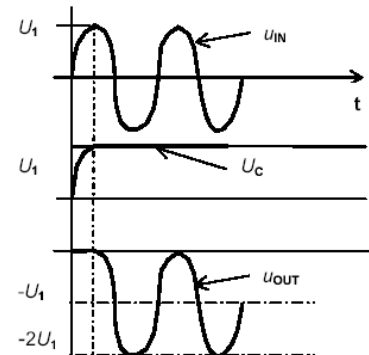
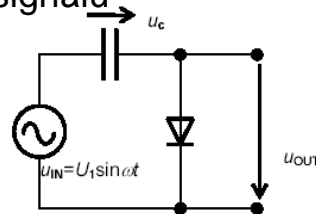
Násobič napätia
n - krát



Obmedzovač signálu



Posun jednosmerného predpätia signálu



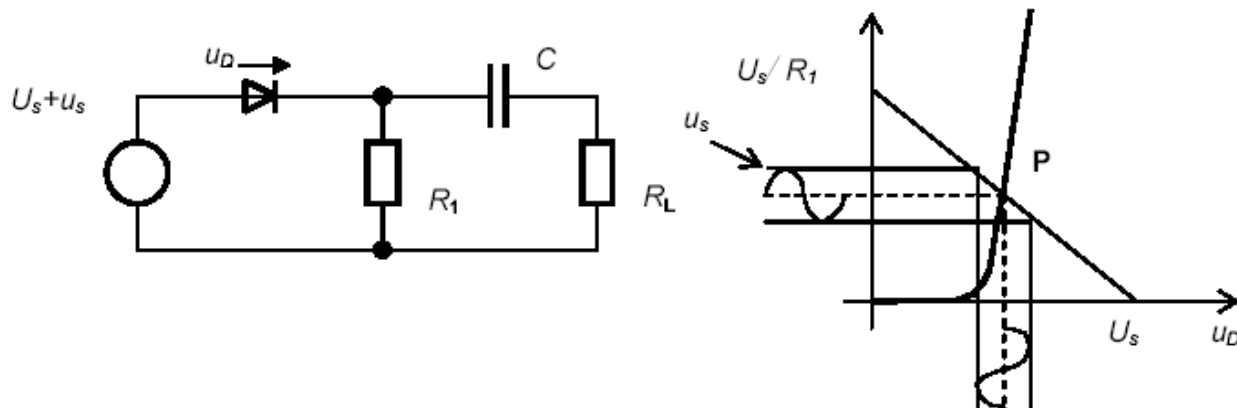
3.3 Zaťažovacia priamka diódy

Sústava rovníc určujúcich ustálený JS pracovný bod.

- Ich grafickým riešením je Obr.
- Možnosť výpočtu numerickými iteráciami

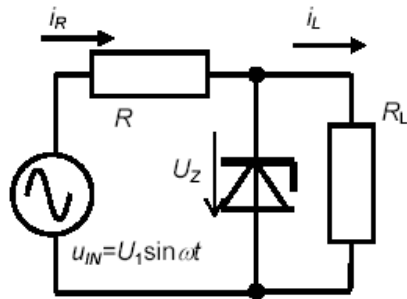
$$U_{JS} = u_{DP} + i_{DP}R_1 \quad (1)$$

$$i_{DP} = I_S \left[\exp\left(\frac{u_{DP}}{n \cdot U_T}\right) - 1 \right] \quad (2)$$



Statická a dynamická zaťažovacia priamka diódy

3.3.2 Stabilizátor napätia pomocou Zenerovej diódy



Prúd cez diódu v závernom smere i_z je minimálny, keď zaťažovací prúd

i_L je maximálny a napätie vstupného zdroja u_{IN} je minimálne. Hrozí, že ďalším poklesom prúdu i_z sa dióda dostane z oblasti stabilizácie napätia U_Z .

.Prúd diódou i_z je maximálny, i_L je minimálny a napätie vstupného zdroja u_{IN} je maximálne.

Hrozí nebezpečie prekročenia medznej výkonovej straty na Zenerovej dióde

predstavovanej súčinom $P = i_z \cdot U_Z$. Pre prípustnú výkonovú stratu P_{max} je maximálny prúd cez

Zenerovú diódu určený pomerom $i_{zmax} = P_{max} / U_Z$

$$R = \frac{u_{IN} - U_Z}{i_R} = \frac{u_{IN} - U_Z}{i_z + i_L}$$

$$R_{min} = \frac{u_{INmin} - U_Z}{i_{Zmin} + i_{Lmax}}$$

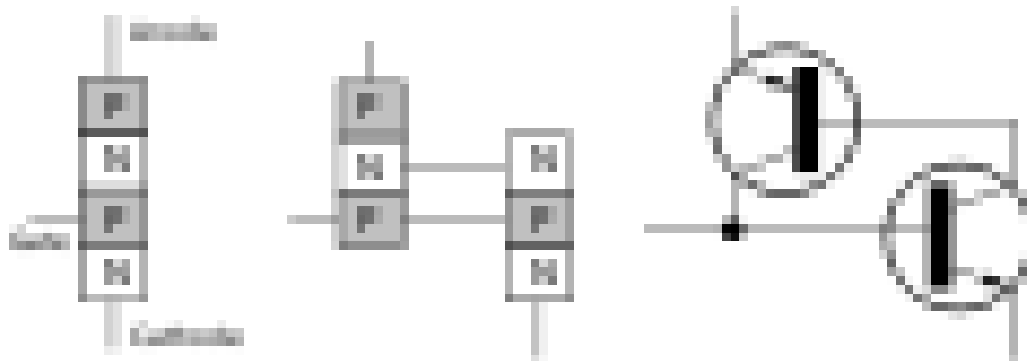
$$R_{max} = \frac{u_{INmax} - U_Z}{i_{Zmax} + i_{Lmin}}$$

$$(u_{INmin} - U_Z)(i_{Zmax} + i_{Lmin}) = (u_{INmax} - U_Z)(i_{Zmin} + i_{Lmax})$$

$$i_{Lmax} = \frac{(i_{Zmax} + i_{Lmin})(u_{INmin} - U_Z)}{u_{INmax} - U_Z} - 0,1 \cdot i_{Zmax}$$

Tyristor

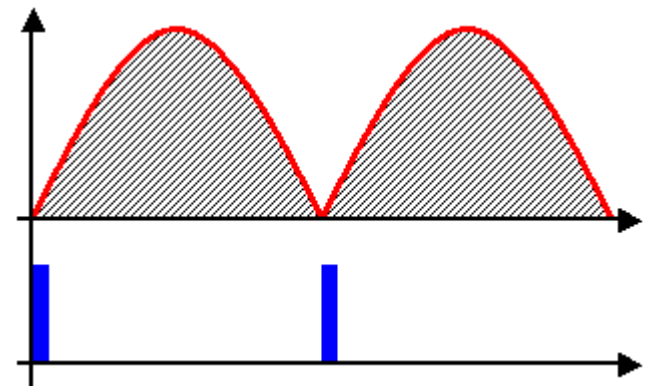
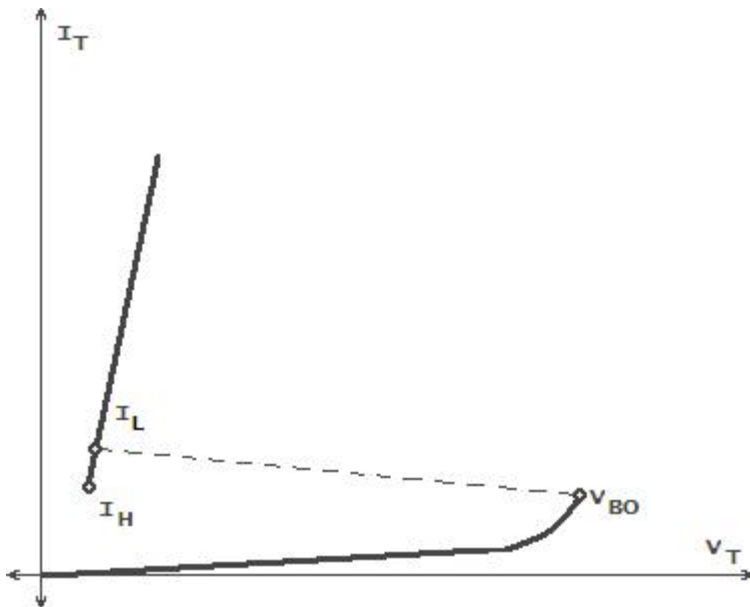
Tyristor je [polovodičová](#) súčiastka slúžiaca k spínaniu [elektrického prúdu](#) (najčastejšie výkonových obvodov), fungujúci ako riadený elektronický [ventil](#). Skladá sa zo štyroch vrstiev polovodiča v usporiadaní PNPN, takže v súčiastke sú tri . Na krajnej vrstve sú pripojené silové, na jednu z prostredných riadiaca elektróda. Pokiaľ na silové elektródy privedieme prúd, tyristor nevodí, až kým neprivedieme malé napätie aj na riadiacu elektródu. Potom sa tyristor lavínovite zopne a zotrváva v vodivom stave, až dovtedy pokiaľ ním tečie prúd.



Tyristor

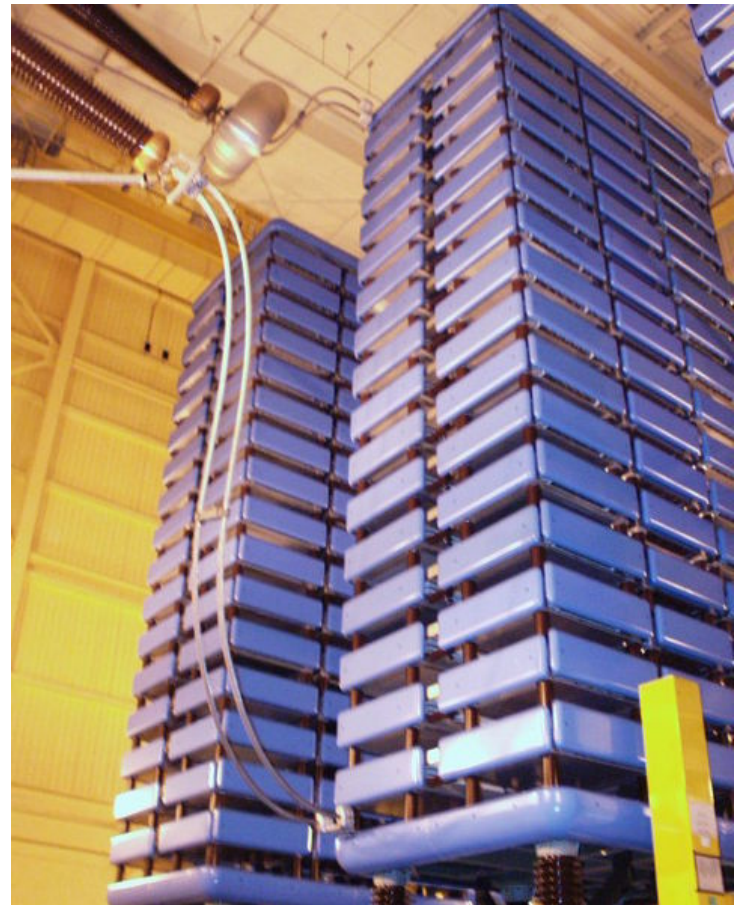
Charakteristika ako zatvorená dióda. Privedením pulzu na Hradlo sa lavinovite otvorí

Slúži ako riadený usmerňovač, kde uhlom otvorenia riadime výsledný prúd



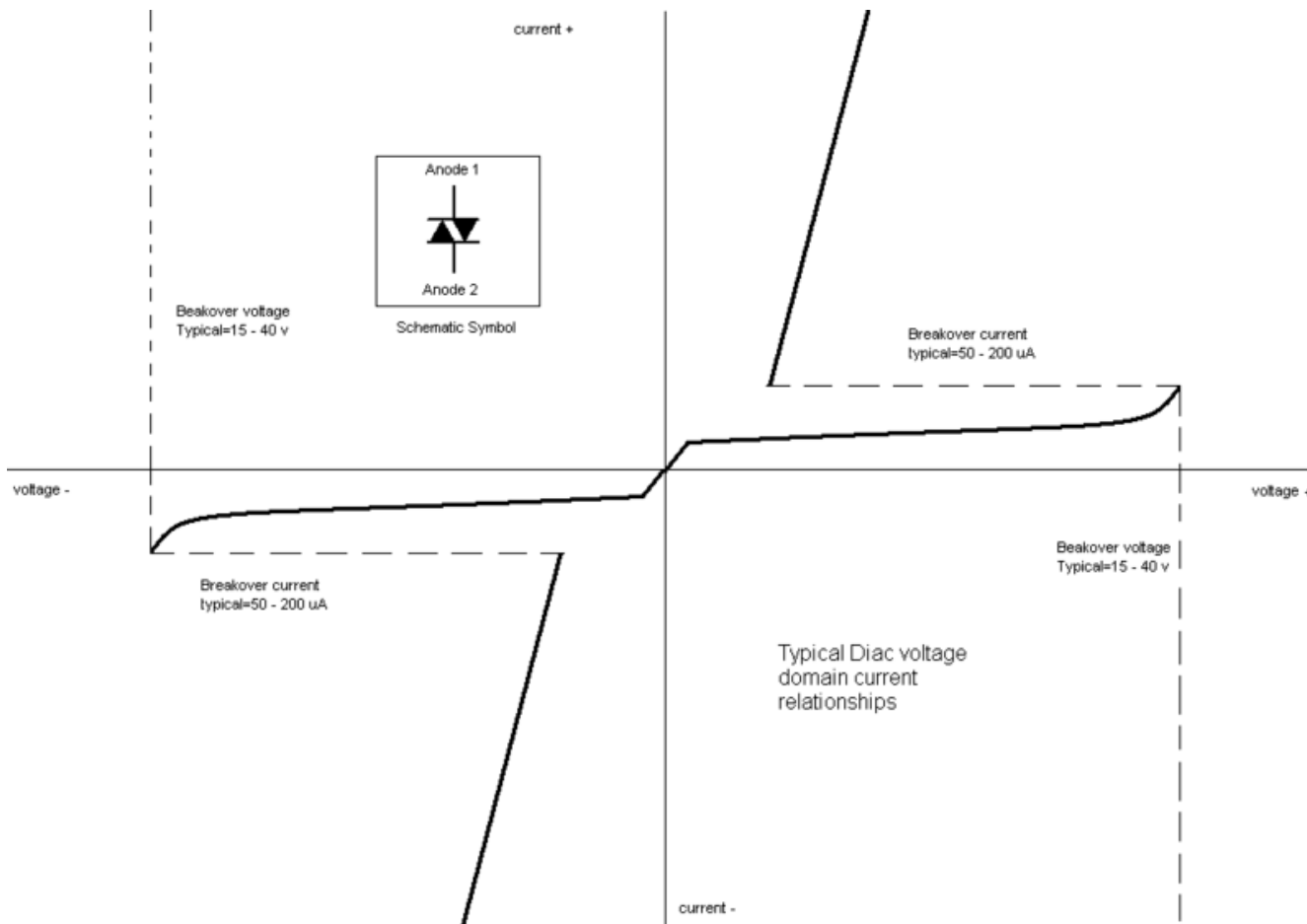
Tyristor

Priemyselné usmerňovače veľkého výkonu, ktorý možno riadiť



Diak

Pracuje ako riadená dióda ktorá sa otvára po prekročení hraničného napätia,

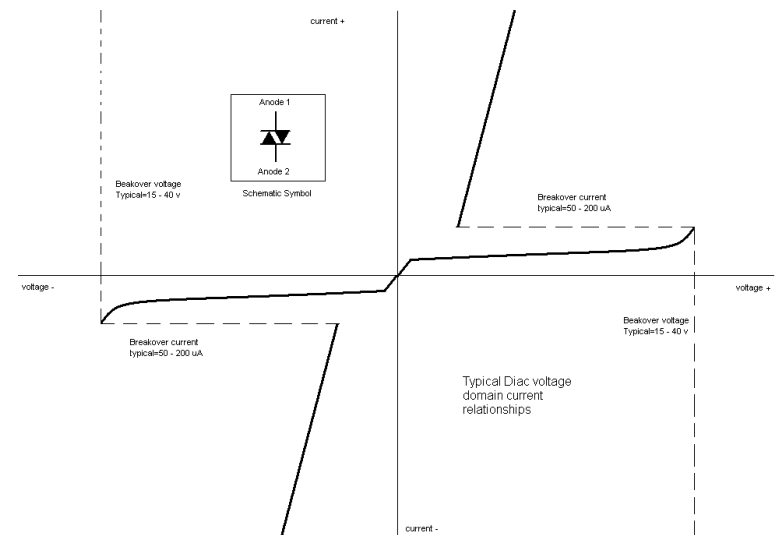
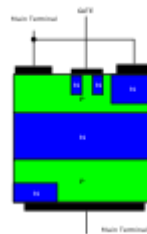
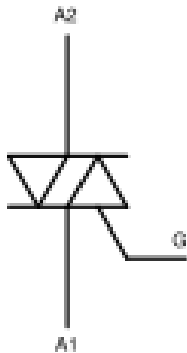


Triak

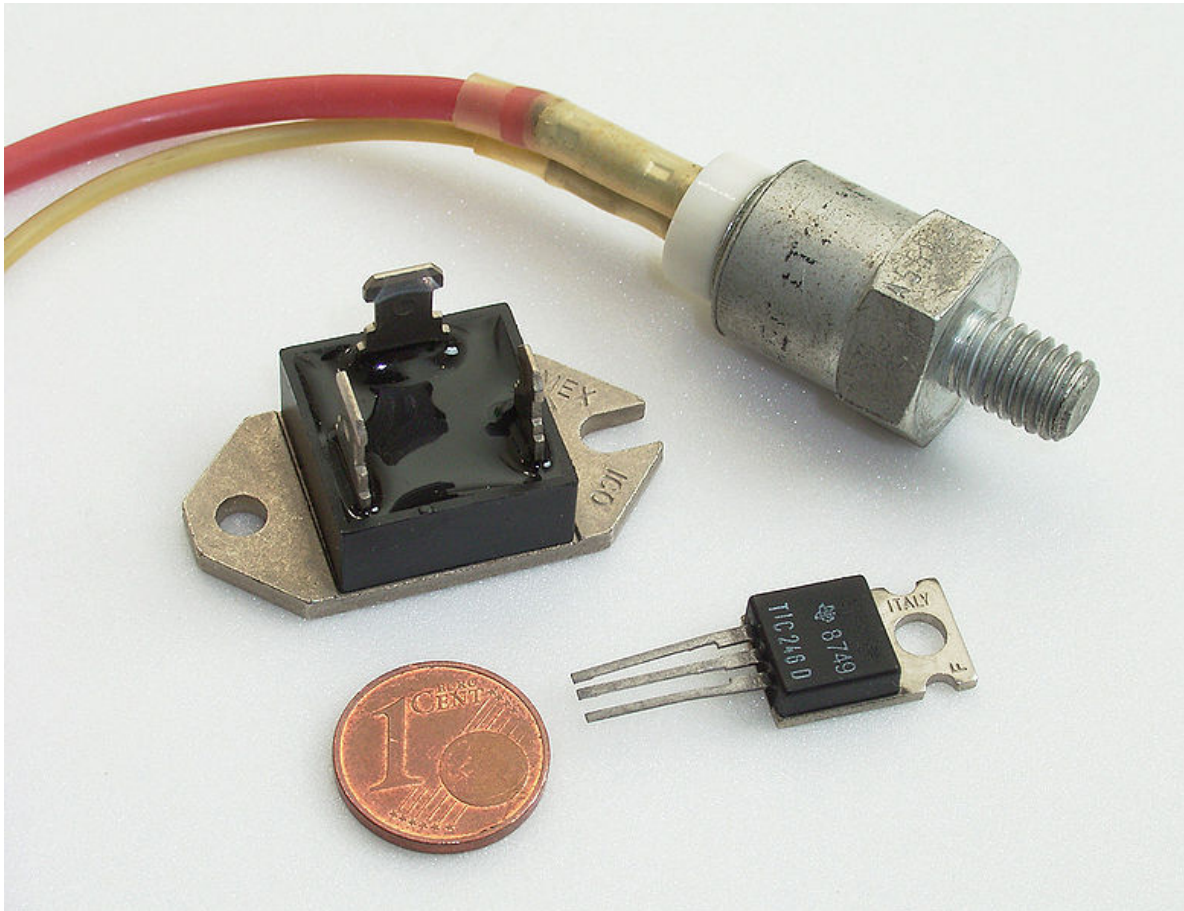
Pracuje ako riadená spínač pre obidve polarities napätia.

Nakoľko úbytok medzi elektródami A1 a A2 je väčší pri tom istom prúde vzniká väčšia výkonová strata.

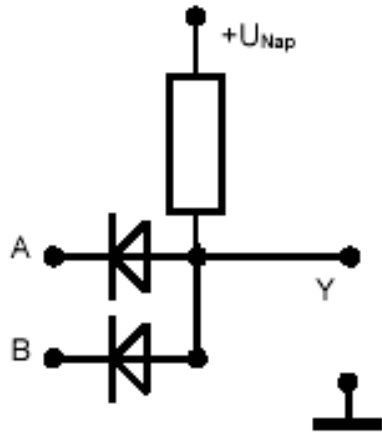
V priemyselných aplikáciách veľkých výkonov preto zostáva tyristor.,



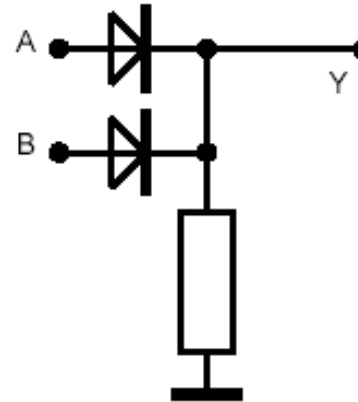
Triak



3.3.3 Diódové logické obvody

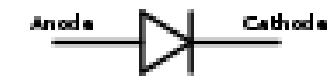


Vstupy		Výstup
A	B	Y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1



Vstupy		Výstup
A	B	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Ukážky súčiastok



Dióda



Zenerová dióda



Schottkyho dióda



Tunelová dióda



LED Dióda



Fotodióda

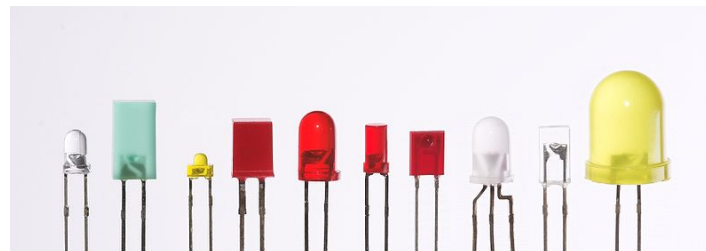
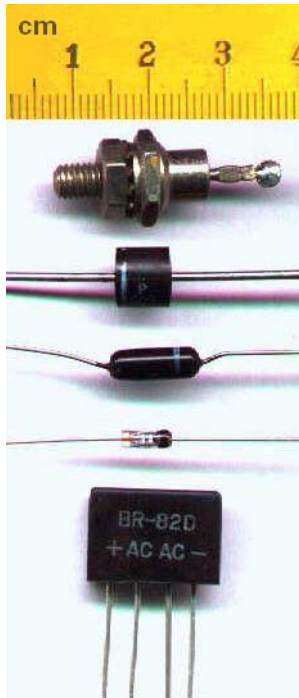
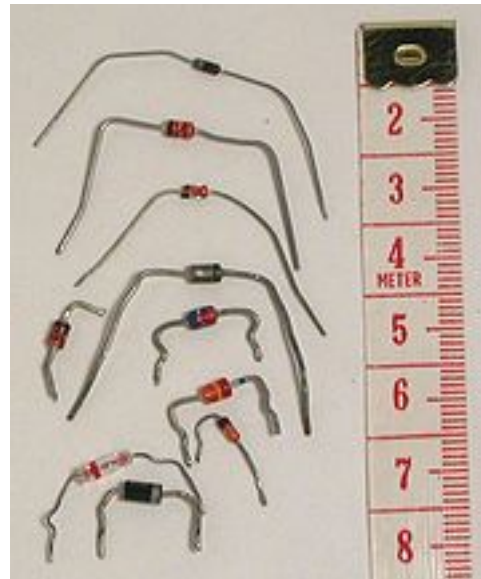


Varikap

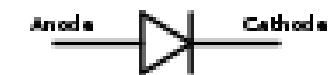


Tyristor

Ukážky súčiastok



Ukážky súčiastok



Dióda



Zenerová dióda



Schottkyho dióda



Tunelová dióda



LED Dióda



Fotodióda



Varikap



Diac

