

# Základy elektroniky

## kap.1-3

Linus Michaeli

1

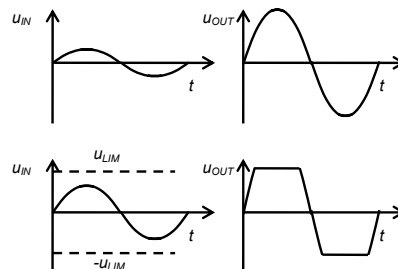
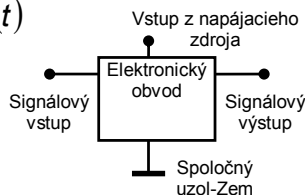
### 1.1 Základný koncept

Analýza obvodov založená na

- Princípy superpozície, Kirchofové zákony, teóremy náhradných zdrojov (Theveninova a Nortonová teórema) 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

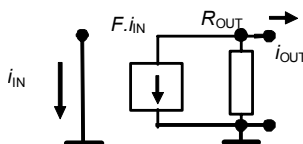
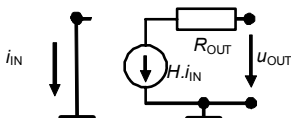
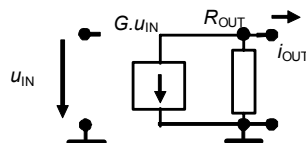
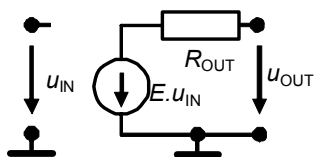
$$y(t) = Y_0 + \left. \frac{\partial y}{\partial x} \right|_{Y_0} x(t)$$



2

## 1.2 Model riadeného zdroja

### Zosilňovač signálu



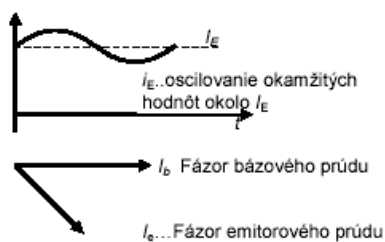
3

## 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



4

## 2 POLOVODIČE

### 2.1 Vlastné polovodiče

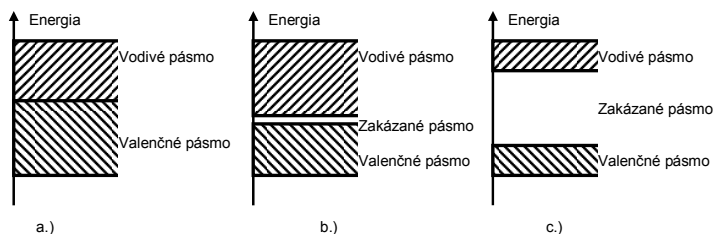
Vodiče: meď, hliník, alebo zlato, rezistivita rádovo  $10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$

Izolanty: mika, diamant, krištál', zařir 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  $86 \times 10^{-6} \text{ eV/K}$

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



Materál	$E_G$ [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 (GaPh)	2,2	$1,2 \cdot 10^{15}$
Izolátory		
Diamant	5,5	$470 \cdot 10^{12}$
Kysličník kremičitý ( $\text{SiO}_2$ )	8	—

**Driftový prúd**

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

$\sigma_i$  je vlastná vodivosť polovodiča  $q$  náboja elektrónu ( $1,6 \cdot 10^{19} \text{ C}$ ), vlastná koncentrácia elektrónov a dier  $P_i = N_i$ . Konštanta  $\mu_N, \mu_P$  je pohyblivosť elektrónov a dier. Pohyblivosť elektrónov kremika je  $\mu_N = 1350 \text{ cm/sec}$ , pohyblivosť dier je  $\mu_P = 480 \text{ cm/sec}$ .

5

## 2 POLOVODIČE

### 2.2 Primesové polovodiče

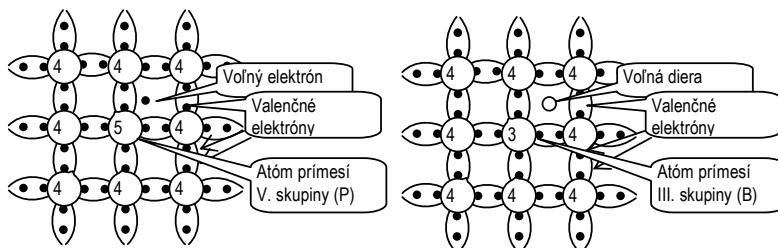
Piaty elektrón z valenčnej sféry fosforového atómu (V) – **donor** – dáva negatívne náboje elektróny **N**

Voľné miesto vo valenčnej sfére bóru (III) – **akceptor** – prijíma voľné elektróny – **diera** s kladným náb. **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**

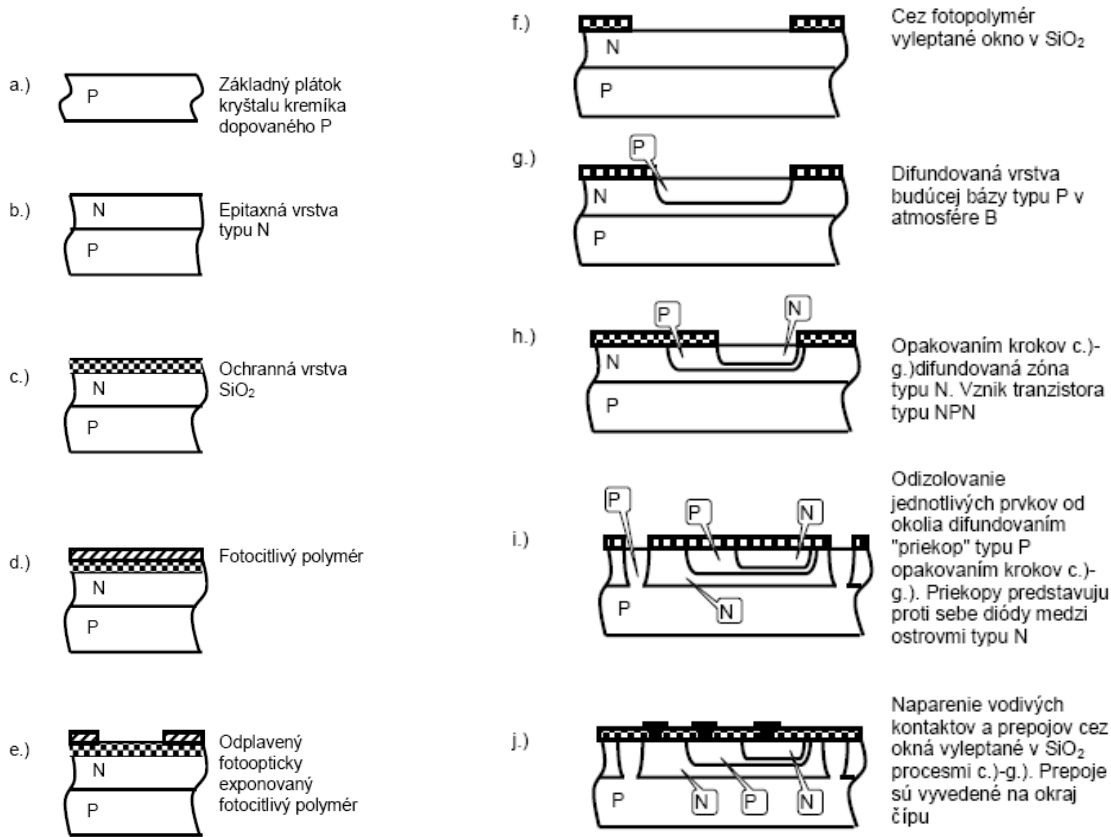
$$J = q(N_N \mu_N + N_P \mu_P) E + q \left( D_N \frac{\partial N_N}{\partial x} - D_P \frac{\partial N_P}{\partial x} \right)$$

**Väzba medzi pohyblivosťou a difúznou konštantou**

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

6

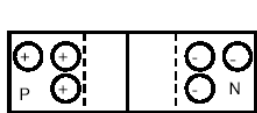
## 2 Technologické kroky



7

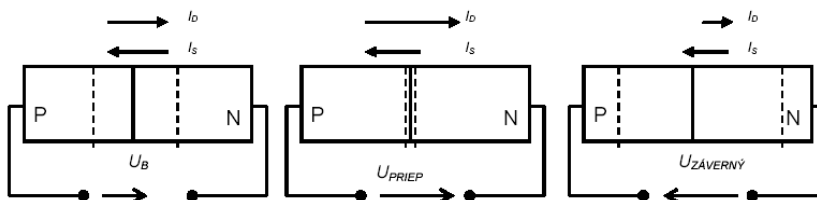
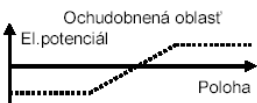
## 3 POLOVODIČOVÉ DIÓDY

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  $N_N=10^{19}$  /cm<sup>3</sup> a koncentrácie dier v P polovodiči  $N_P=10^{18}$ /cm<sup>3</sup> . Výsledné barierové napätie je rovné 0,99 V.



Driftový prúd

Výsledný prúd diódou

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

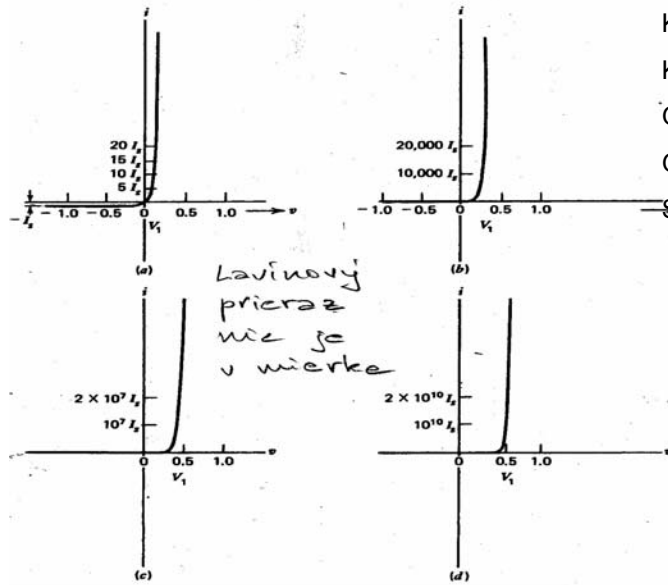
$$N_P(x) = N_{P0}(x) \exp\left(\frac{qu_D}{kT}\right) \quad N'_P(x) = N_P(x) - N_{P0}(x) = N_{P0}(x) \left[ \exp\left(\frac{qu_D}{kT}\right) - 1 \right]$$

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

$I_s$  zvyškový prúd

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

### 3 POLOVODIČOVÉ DIÓDY



Kremíkové diódy 0,6 V  
 Kremíkový PN prechod na IO 0,75 V  
 Germániové diódy 0,25 V  
 Gálium arzenidové diódy 1,2 V  
 Schottkyho diódy 0,3 V

Lavínový  
 prúdom  
 nie je  
 v mierke

#### 3.1.1 Spracovanie malého signálu v priepustnom smere

Prírastkový prúd

Diferenciálny odpor

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

$$r_D = \frac{\Delta U_D}{\Delta i_D} \cong \frac{nU_T}{I_{JS}}$$

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

**Vplyv teploty**

Záverný saturačný prúd  $I_S$  je tiež závislý od teploty. Zdvajnasobuje sa približne pre každých  $10^\circ\text{C}$ .

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

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

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

### 3.1.3 Záverne polarizovaný PN prechod

#### Varikapy

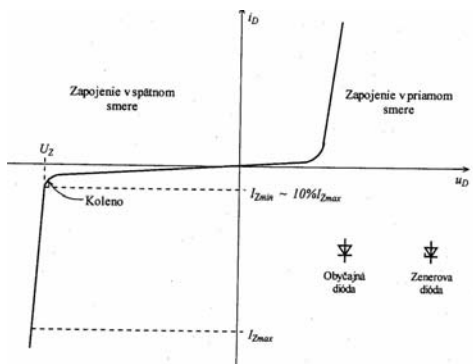
Záverne polarizovaná dióda = kondenzátor ochudobnená oblasť - dielektrikum s premennou hrúbkou

$$C_{SC} = C_0 A \left( 1 - \frac{U_{JS}}{U_0} \right)^{-1/n}$$

#### Zenerové diódy

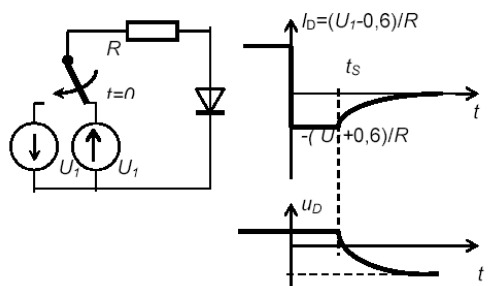
Prvým je Zenerov efekt, kvantovo mechanický princíp- tunelovanie. Silne dopovaných polovodičov na obidvoch stranách prechodu, - úzka ochudobnená oblasť. Do 4 V

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



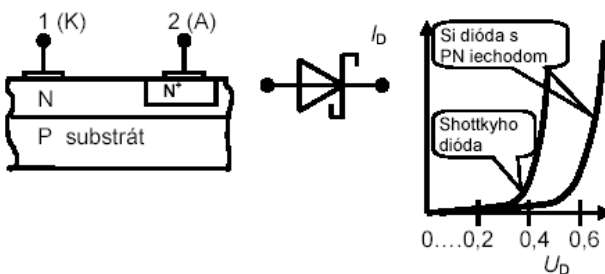
#### Prechod z priepustnej do závernej polarizácie

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

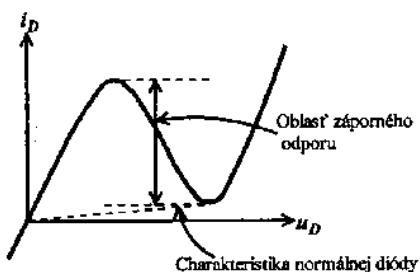


### 3.1.4 Iné typy diód

#### Schottkyho diódy



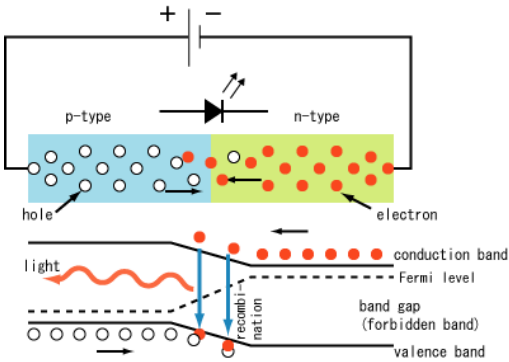
#### Tunelové diódy



### 3.1.4 Svetlo emitujúce diódy a fotodiódy

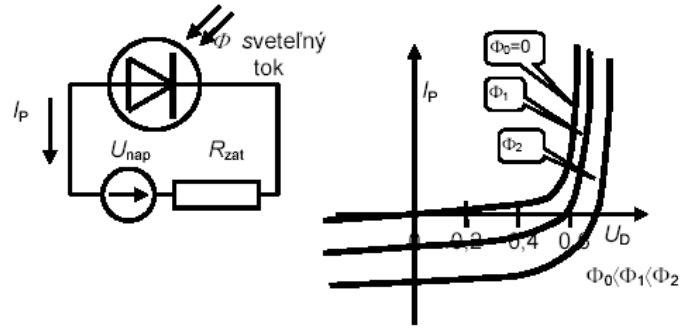
#### Svetloemitujúce diódy LED

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

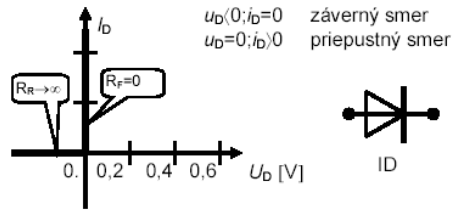
$$I_p = \eta \cdot q \cdot \Phi \quad \text{kde svetelný tok je} \quad \Phi = \rho \cdot A$$



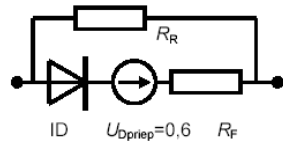
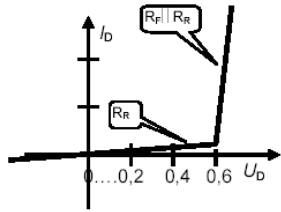
	Color	Wavelength (nm)	Voltage (V)	Semiconductor Material
	<a href="#">Infrared</a>	$\lambda > 760$	$\Delta V < 1.9$	<a href="#">Gallium arsenide</a> (GaAs) <a href="#">Aluminium gallium arsenide</a> (AlGaAs)
	<a href="#">Red</a>	$610 < \lambda < 760$	$1.63 < \Delta V < 2.03$	<a href="#">Aluminium gallium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

### 3.2 Modely diód

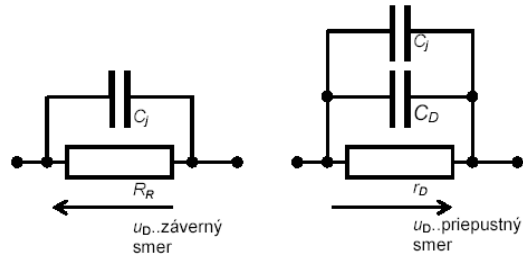
Model ideálnej diódy ID



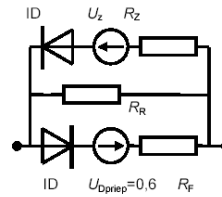
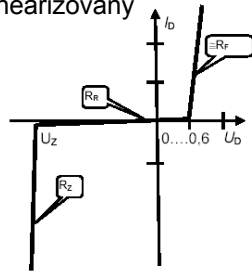
Model po častiach lineárnej diódy



Prírastkový model v závernóm a priepustnom smere

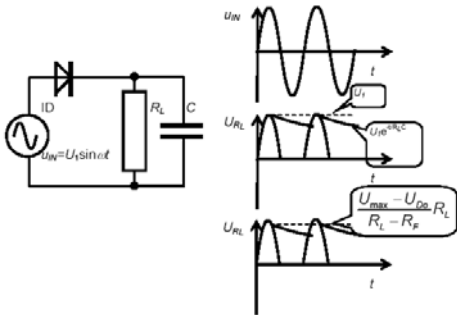


Model Zenerovej diódy – po častiach linearizovaný

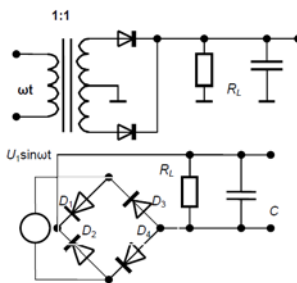


### 3.3 Aplikácia diód

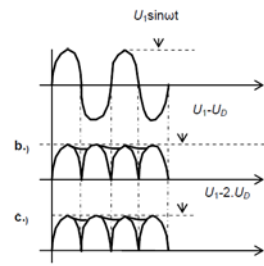
Jednocestný usmerňovač



a



Dvojcestný usmerňovač



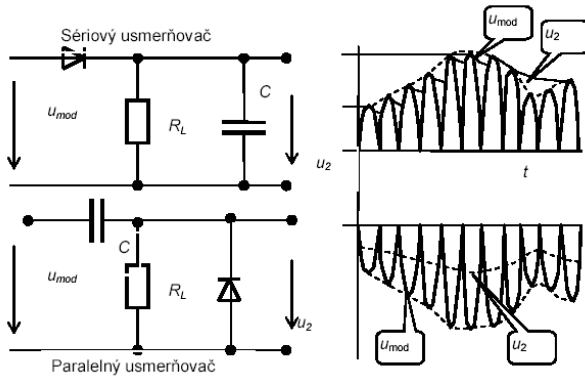
RC filtrácia a zvlnenie, určenie filtračného kondenzátora

$$u_c = U_2 \exp\left(-\frac{t}{R_L C}\right) = \text{pre } t \ll R_L C \approx U_2 \left(1 - \frac{t}{R_L C}\right) \quad \Delta U = U_2 \cdot \frac{T}{R_L C} \quad C = U_2 \cdot \frac{T}{R_L \Delta U} \quad U_{JS} = U_2 \left(1 - \frac{T}{2 R_L C}\right)$$



### 3.3 Aplikácia diód

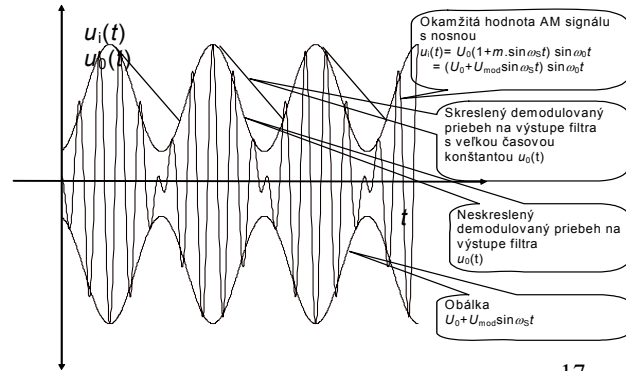
#### Demodulátor Amplitúdovo modulovaného signálu



$$\frac{du_s}{dt} = \frac{d[U_0(1+m \sin \omega_s t)]}{dt} = \omega_s m U_0 \cos \omega_s t$$

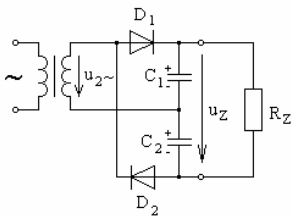
$$\left| \frac{du_s}{dt} \right| = \omega_s m U_0 \cos \omega_s t \leq \left| \frac{du_c}{dt} \right| = \left| \frac{U_0(1+m \sin \omega_s t)}{-RC} \right|$$

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

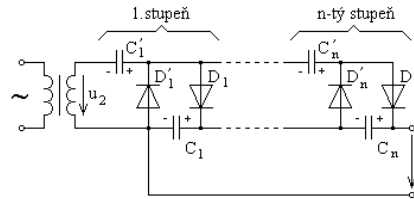


### 3.3 Aplikácia diód

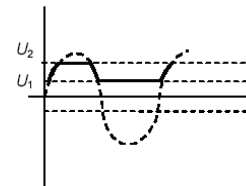
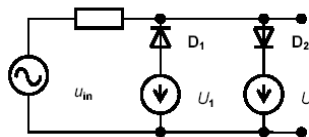
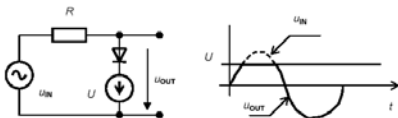
#### Násobič napätia z dvojovač



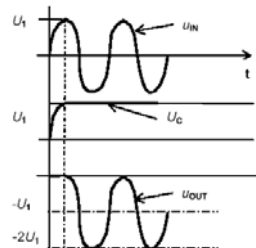
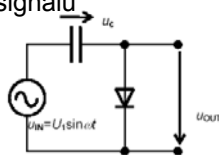
#### Násobič napätia n - krát



#### Obmedzovač signálu



#### Posun jednosmerného predpätia signálu



### 3.3 Zaťažovacia priamka diódy

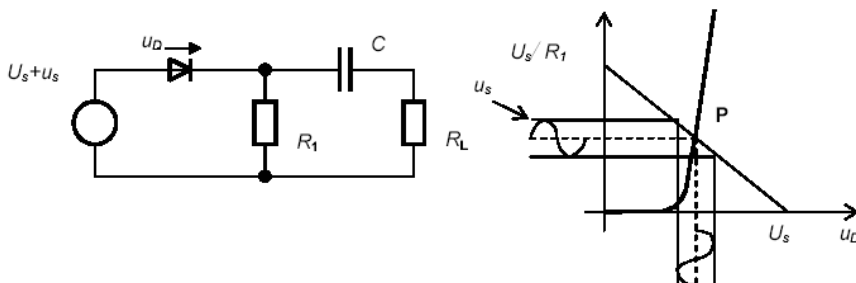
Sústava rovníc určujúcich ustálený JS pracovný bod.

•Ich grafickým riešením je Obr.

•Možnosť výpočtu numerickými iteráciami

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

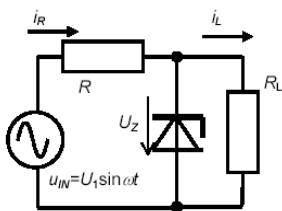
$$i_{DP} = I_S \left[ \exp\left(\frac{u_{DP}}{n \cdot U_T}\right) - 1 \right] \quad (2)$$



Statická a dynamická zaťažovacia priamka diódy

19

### 3.3.2 Stabilizátor napätia pomocou Zenerovej diódy



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

$$R_{\min} = \frac{u_{IN\min} - U_Z}{i_{Z\min} + i_{L\max}}$$

$$R_{\max} = \frac{u_{IN\max} - U_Z}{i_{Z\max} + i_{L\min}}$$

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  $i_{Z\max} = P_{\max} / U_Z$

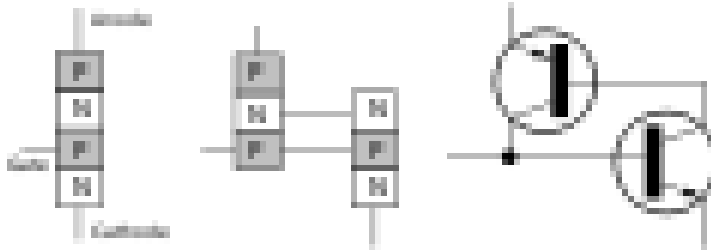
$$(u_{IN\min} - U_Z)(i_{Z\max} + i_{L\min}) = (u_{IN\max} - U_Z)(i_{Z\min} + i_{L\max})$$

$$i_{L\max} = \frac{(i_{Z\max} + i_{L\min})(u_{IN\min} - U_Z)}{u_{IN\max} - U_Z} - 0,1 \cdot i_{Z\max}$$

20

# 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 zotrúva v vodivom stave, až dotedy pokiaľ ním tečie prúd.

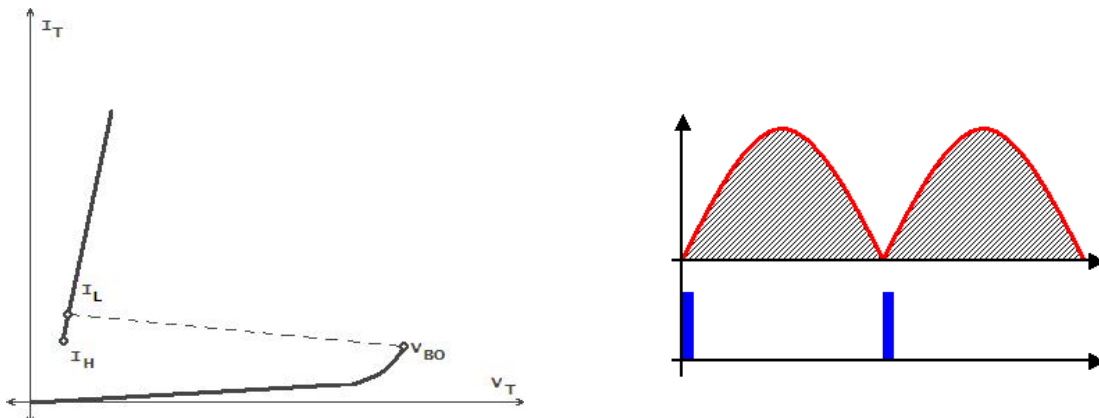


21

# Tyristor

**Charakteristika ako zatvorená dióda. Privedením pulzu na Hradlo sa lavínovite otvorí**

**Slúži ako riadený usmerňovač, kde uhlom otvorenia riadime výsledný prúd**



22

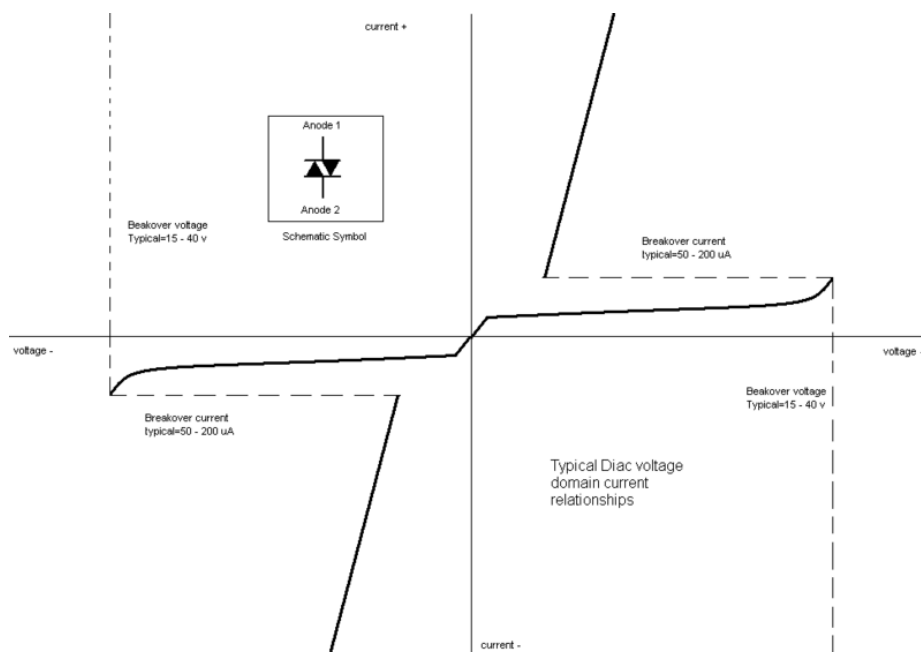
# Tyristor

Priemyselné usmerňovače veľkého výkonu, ktorý možno riadiť



# Diak

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

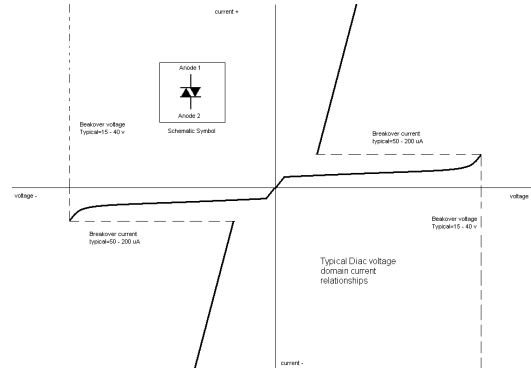
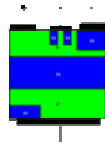


# Triak

Pracuje ako riadená spínač pre obidve polarizácie napätia.

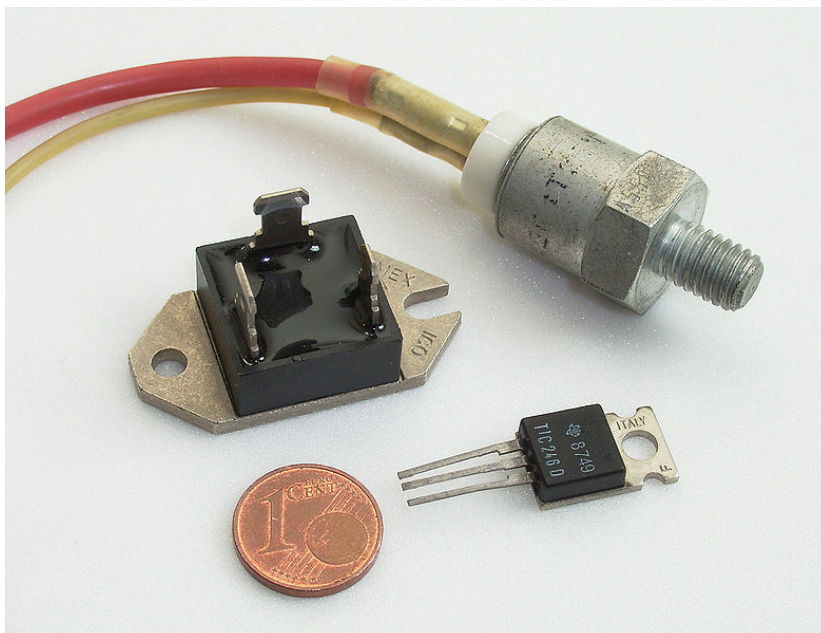
Nakoľko úbytok medzi elektródami A1 a A2 je väčší pri tom istom prúde vzniká väčšia výkonová strata.

V priemyselných aplikáciách veľkých výkonov preto zostáva tyristor.,



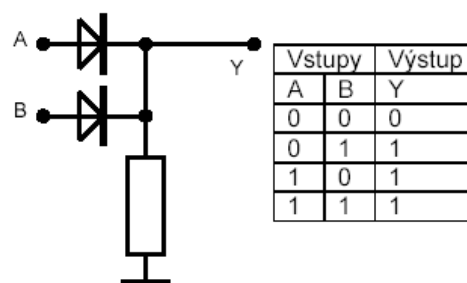
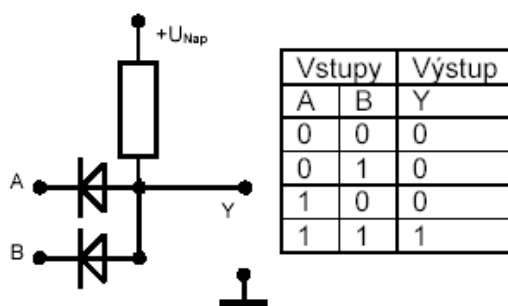
25

# Triak

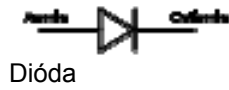


26

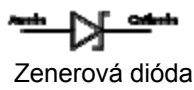
### 3.3.3 Diódové logické obvody



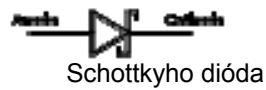
# Ukážky súčiastok



Dióda



Zenerová dióda



Schottkyho dióda



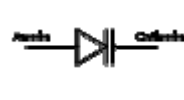
Tunelová dióda



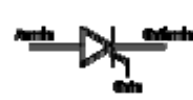
LED Dióda



Fotodióda

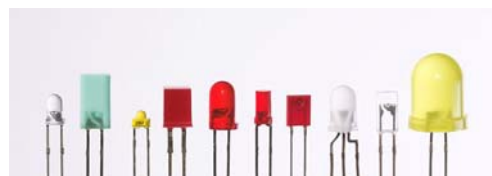
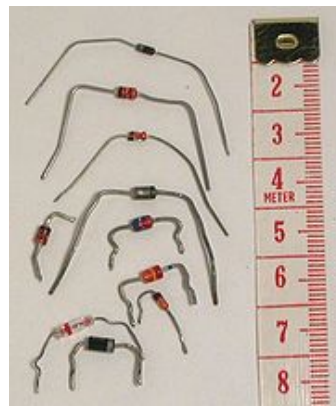
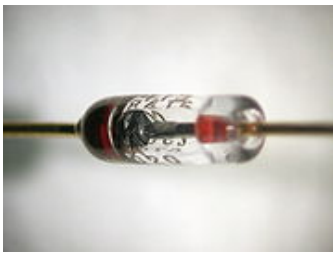


Varikap



Diac

# Ukážky súčiastok



# Ukážky súčiastok



Dióda



Zenerová dióda



Schottkyho dióda



Tunelová dióda



LED Dióda



Fotodióda



Varikap



Diac