

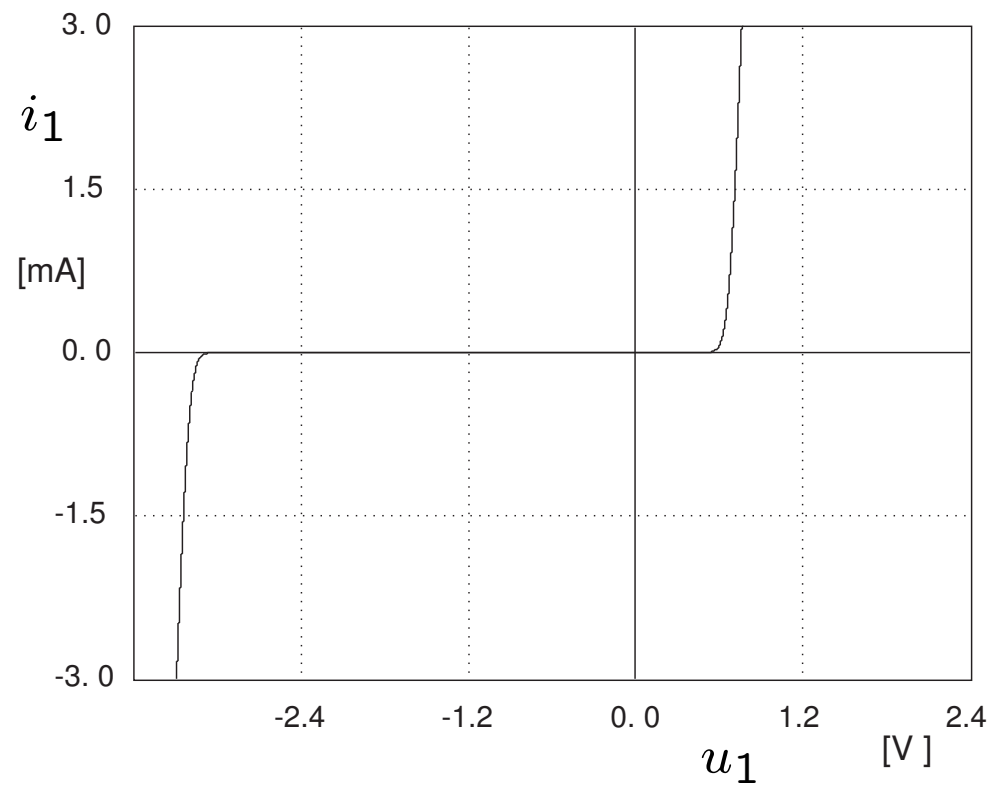
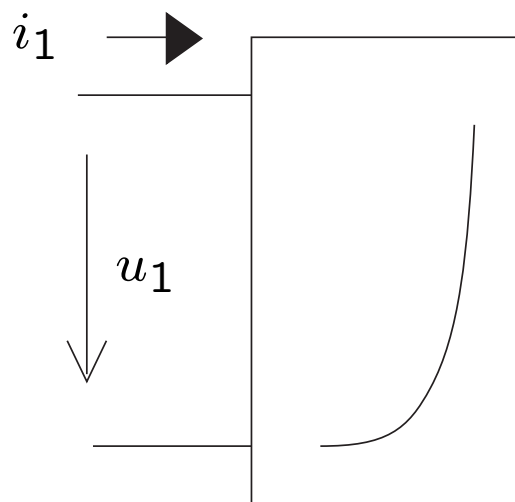
# Fakulta biomedicínského inženýrství – Teoretická elektrotechnika

Prof. Ing. Jan Uhlíř, CSc.

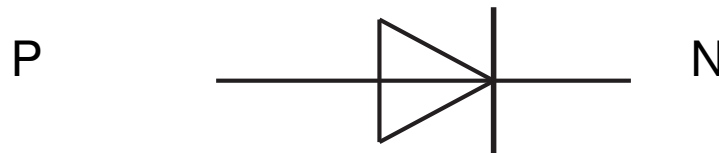
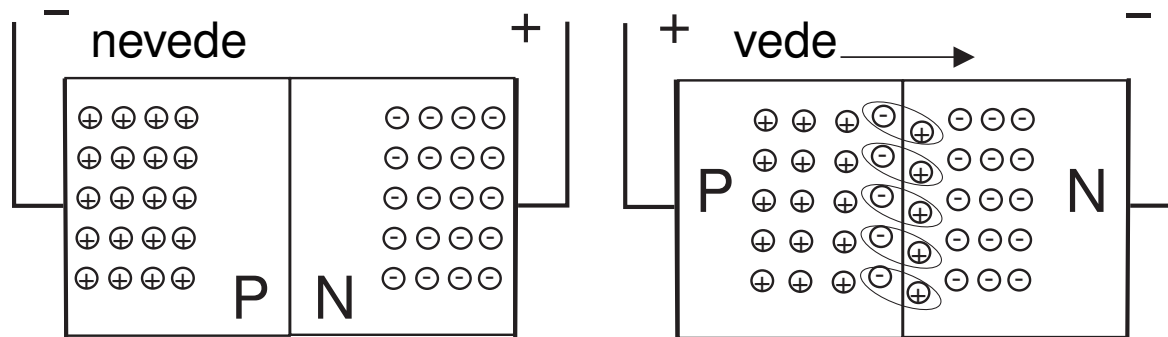
Léto 2020

## 8. Nelineární obvody – neseřvačné dvojpóly

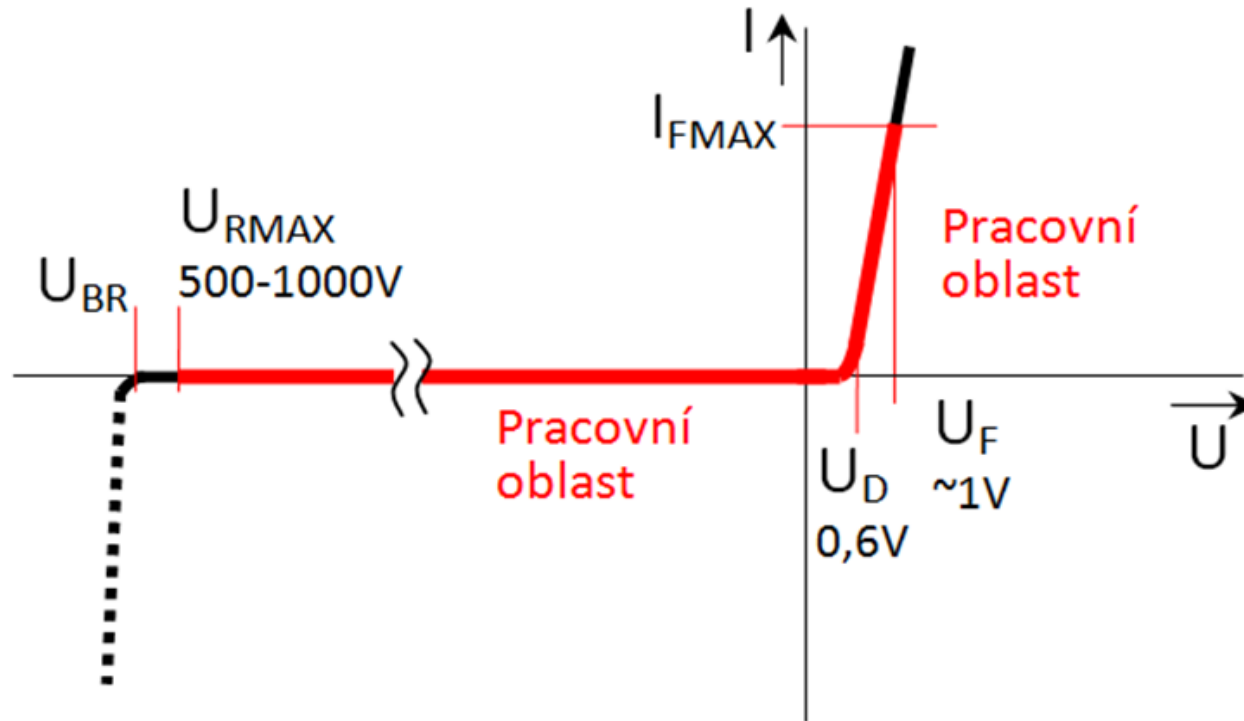
## Obvodové veličiny nelineárního dvojpólu



# Polovodičový přechod – dioda



## Voltampérová charakteristika křemíkové diody



Aproximace V-A charakteristiky založená na fyzikálních veličinách určujících vztah mezi proudem a napětím

$$i_D = I_S \left( e^{\frac{u_D}{nU_\theta}} - 1 \right)$$

$i_D$  je proud procházející diodou při napětí  $u_D$

$I_S$  je nasycený (saturační) proud přechodu

$U_\theta$  je teplotní napětí

$$U_\theta = \frac{k\theta}{q} \approx 26 \text{ mV}$$

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  [J/K] (joule na kelvin) je Boltzmanova konstanta

$q = 1,602 \cdot 10^{-19}$  [C] (coulombu) je elementární náboj

$\theta$  je absolutní teplota (v Kelvinech)

Emisní součinitel  $n$  se mění v rozmezí  $1 < n < 2$  a závisí na technologii

Když je  $\theta = 300$  K, je  $nU_\theta \approx 26 \div 52$  mV

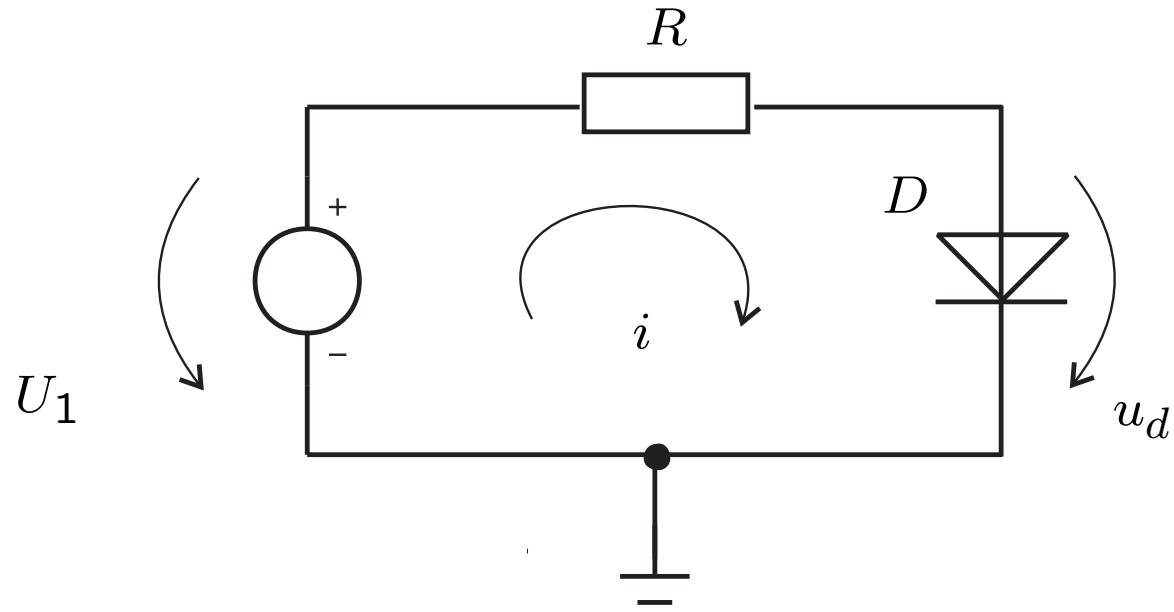
Při napětí  $u_D \gg U_\theta$  (propustná polarizace) dostaneme pro průběh voltampérové charakteristiky

$$i_D = I_S e^{\frac{u_D}{nU_\theta}}$$

## Statické parametry diod

- $I_{Fmax}$  – maximální trvalý střední propustný proud; konstrukcí diody, okolní teplotou, způsobem chlazení je určen maximální proud, který smí diodou procházet v propustném směru; při jeho překročení je nebezpečí tepelného zničení diody. Další významný parametr uvádí maximální proud pro impulsní režim činnosti.
- $U_{Rmax}$  – maximální závěrné napětí; závěrný proud diody prudce narůstá, jestliže se napětí blíží k napětí označovanému jako průrazné napětí. Při něm vzroste intenzita elektrického pole uvnitř přechodu nad mez, za níž dochází k vytrhávání nosičů náboje z krystalové mřížky polovodiče a jejich lavinovitému množení. Jde o průraz, který může vést k destrukci, je-li provázen současným přehřátím přechodu.
- $U_D$  – prahové napětí; napětí, které musíme vložit na diodu v propustném směru, aby začal protékat znatelný proud. Pro křemíkové diody lze pracovat s  $U_D \approx 0,6 \div 0,8$  V. Pro praktické účely je skutečnost existence napětí na propustně pólované diodě popsána napětím  $U_F$  při určitém proudu  $I_F$ .

## Dělič napětí s diodou



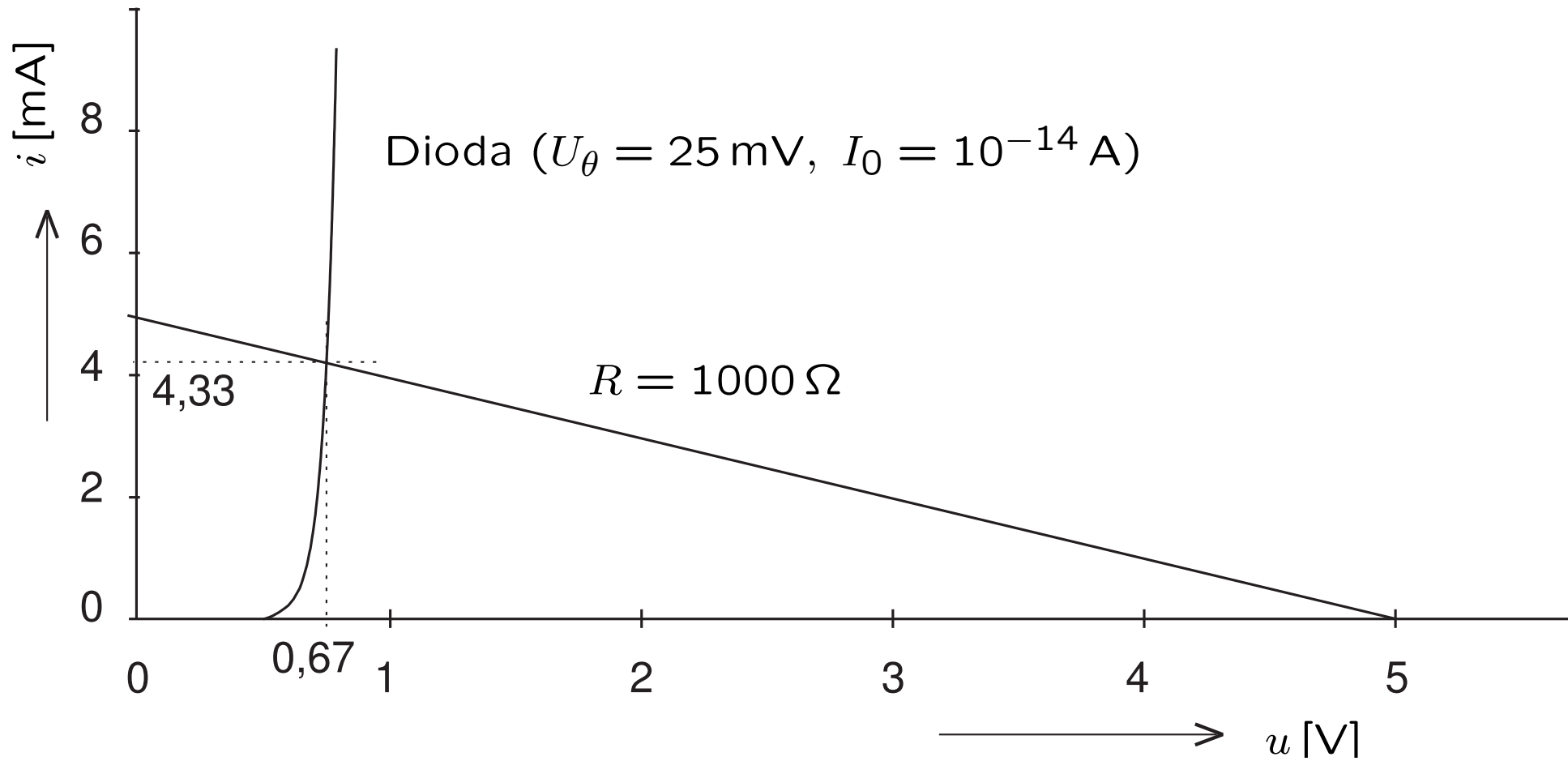
$$U_1 = Ri + u_d = Ri + nU_\theta \ln \left( \frac{i}{I_0} \right) \quad \text{pro } u_d \gg U_\theta$$

Řešení – (transcendentní rovnice)

- grafické
- numerické
- aproximativní – linearizace po úsecích



# Grafické řešení



Numerické řešení – např. Newtonova metoda

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}$$

$$U_1 = Ri + u_d = Ri + nU_\theta \ln \left( \frac{i}{I_0} \right) \implies U_1 - Ri - nU_\theta \ln \left( \frac{i}{I_0} \right) = 0$$

$$i_{n+1} = i_n + \frac{U_1 - Ri_n - nU_\theta \ln \left( \frac{i_n}{I_0} \right)}{R + \frac{U_\theta}{i_n}}$$

## Řešení v Matlabu

```
i(1)=1e-3;  
  
for n=1:10,  
    i(n+1)=i(n)+  
    ((5-1000*i(n)-0,025*ln(i(n)/1e-14))/(1000+0,025/i(n)));  
end;
```

iterace i(1) – i(5) v miliampérech  
1.0000 4.2847 4.3301 4.3301 4.3301

ud = 0,67 V

Linerizace po úsecích – např. propustný vs. nepropustný stav

Zvolíme  $i_d$  podle očekávaného pracovního režimu ve vodivém stavu. Pak

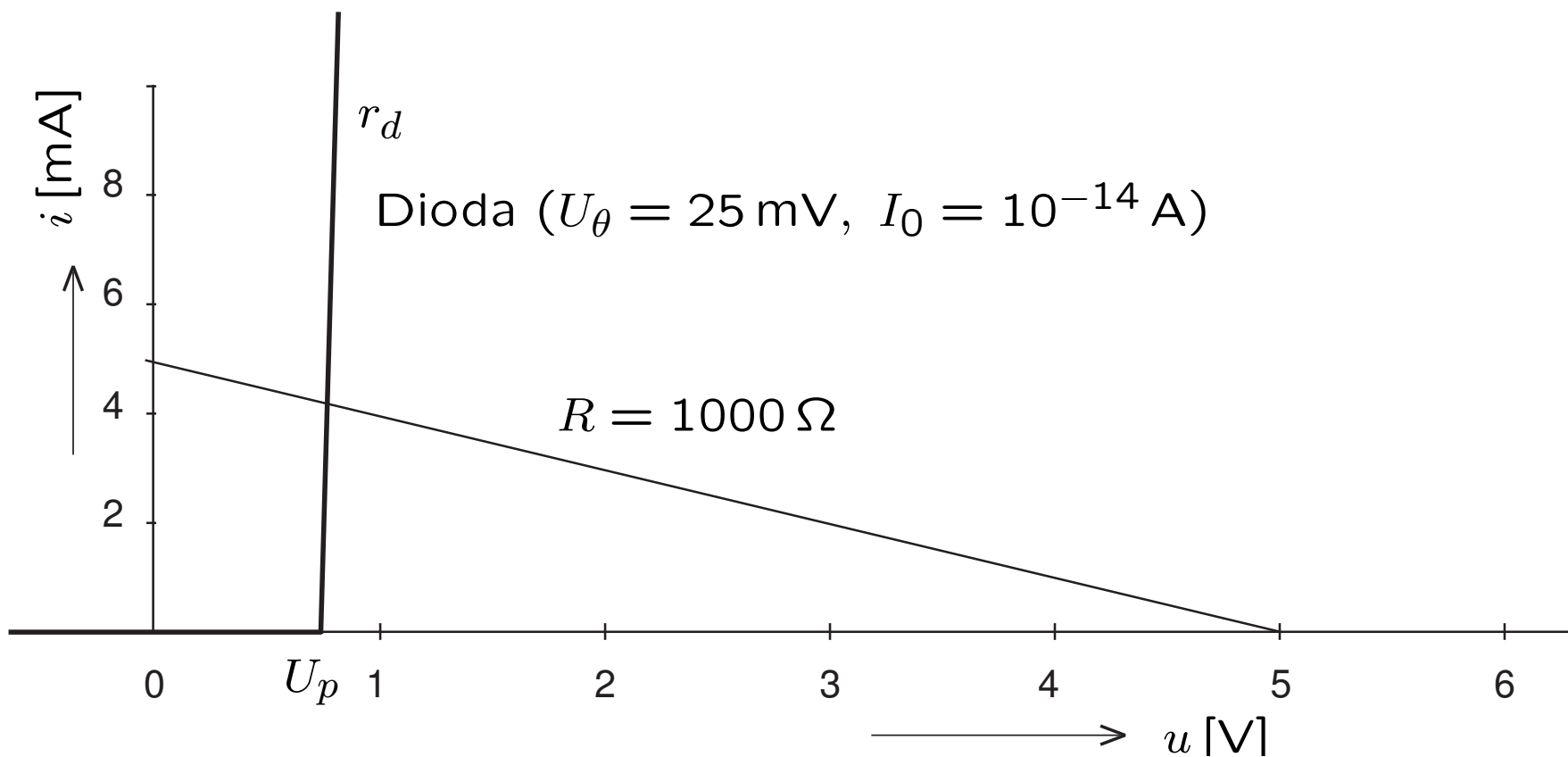
$$\frac{du_d}{di_d} = \frac{nU_\theta}{i_d} = r_d$$

$$u_d = nU_\theta \ln \frac{i_d}{I_0}$$

$$U_p = u_d - r_d i_d$$

Pro  $i_d = 10 \text{ mA} \implies r_d = 2,5 \Omega$  a  $U_p = 0,665 \text{ V}$

Aproximace dvěma úseky: pro  $i > 0$ ,  $r_d = 2,5 \Omega$  pro  $i \leq 0$ ,  $r_d = \infty$

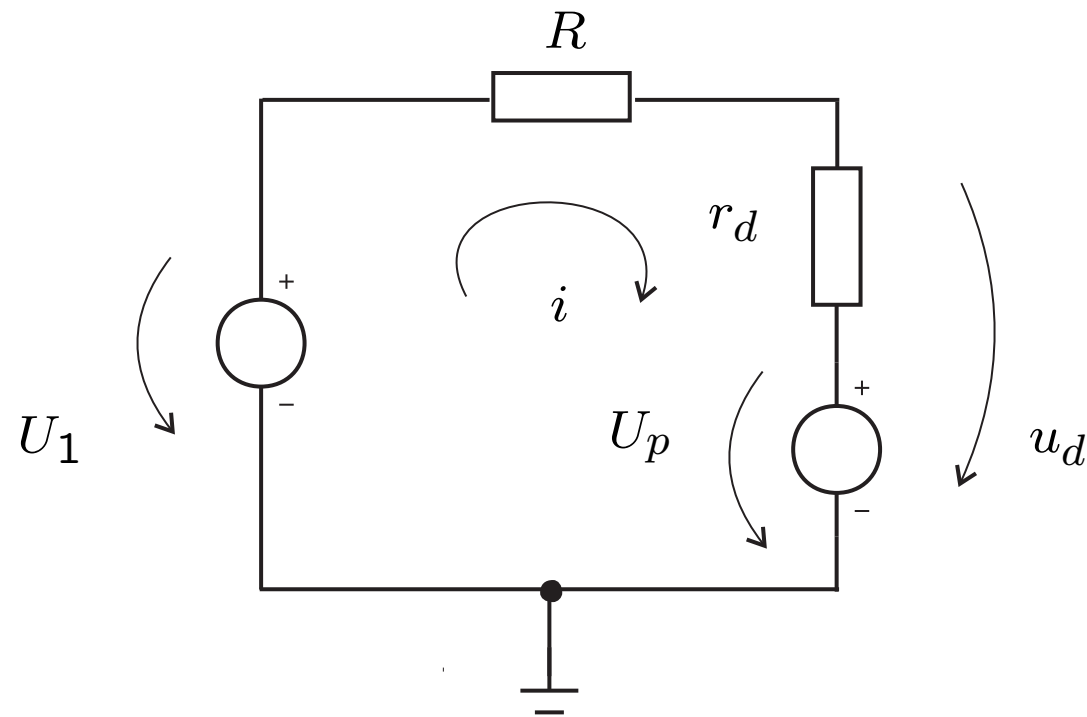


## Po úsecích lineární obvod

$$U_1 = 5\text{V}, R = 1000\ \Omega, r_d = 2,5\ \Omega, U_p = 0,665\ \text{V}$$

$$i = \frac{U_1 - U_p}{R + r_d} = 4,324\ \text{mA}, u_d = U_p + r_d i = 0,676\ \text{V}$$

pokud  $U_1 < U_p$ , pak  $r_d = \infty$



## Dynamické parametry diod – bariérová kapacita

Zpoždění reakce, např. napětí, při náhlé změně proudu se projevuje jako nelineární kapacita přechodu PN, která je z hlediska fyzikálního složena ze dvou složek.

Statická (bariérová) kapacita je kapacita kondenzátoru, jehož polepy tvoří oblasti P a N a dielektrikem je vyprázdňená vrstva v okolí přechodu při závěrné polarizaci. Její tloušťka závisí na vnějším napětí, takže pro bariérovou kapacitu platí přibližný vztah

$$C_T \approx \frac{C_{T0}}{\left(1 - \frac{u_D}{U_j}\right)^m}, \quad (1)$$

kde  $U_j$  je tzv. difúzní potenciál ( $U_j \approx 0,5 - 0,9 \text{ V}$ ),  $u_D$  je napětí při závěrné polarizaci záporné,  $C_{T0}$  je konstanta závislá na ploše přechodu (kapacita při nulovém napětí),  $m$  je exponent závislý na typu přechodu ( $m \approx 0,3$  až  $0,5$ ).

## Dynamické parametry diod – difúzní kapacita

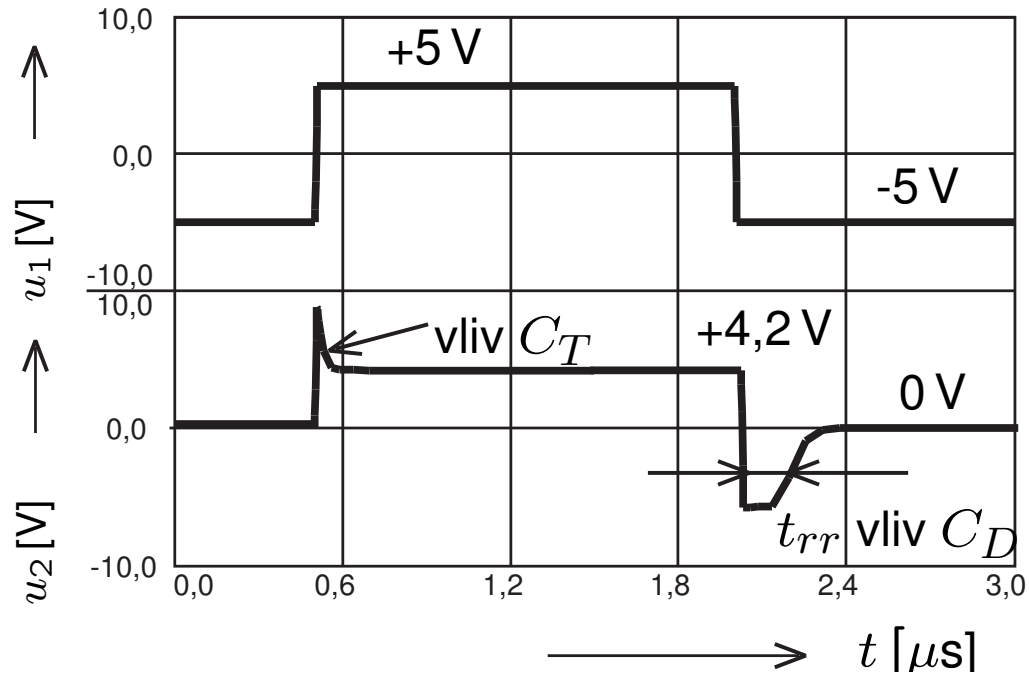
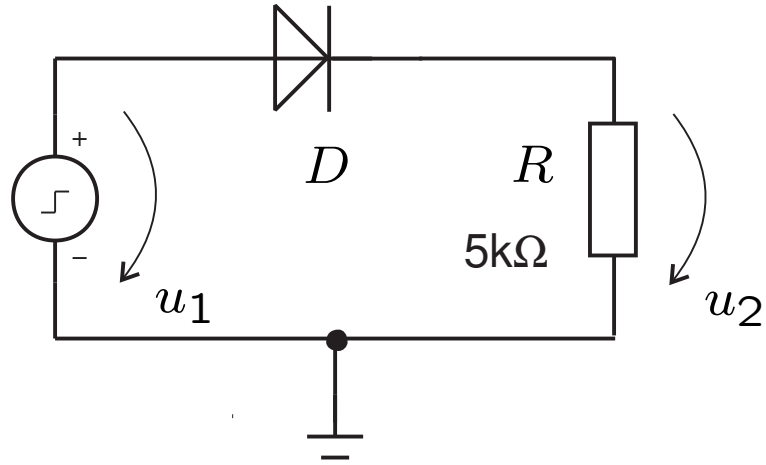
Difúzní kapacita se uplatňuje, je-li dioda pólována v propustném směru. Není ve skutečnosti tvořena izolační vrstvou a dvěma elektrodami. Využíváme podobnosti chování kapacitoru a propustně pólované diody. Pomocí difúzní kapacity popíšeme dynamické jevy, které provázejí průchod proudu přechodem. Pro difúzní kapacitu  $C_D$  platí přibližně

$$C_D \approx \tau i_D \frac{1}{nU_\theta}, \quad (2)$$

kde  $i_D$  je proud procházející diodou a  $\tau$  je efektivní doba života menšinových nosičů. Uvedený vztah je užitečný hlavně tím, že demonstruje přímou úměru mezi propustně tekoucím proudem a nahromaděným nábojem v prostoru polovodičového přechodu. Takový náboj musí být při vypínání procházejícího proudu odveden, což může v některých aplikacích představovat závažný problém.



# Přechodný děj na diodě



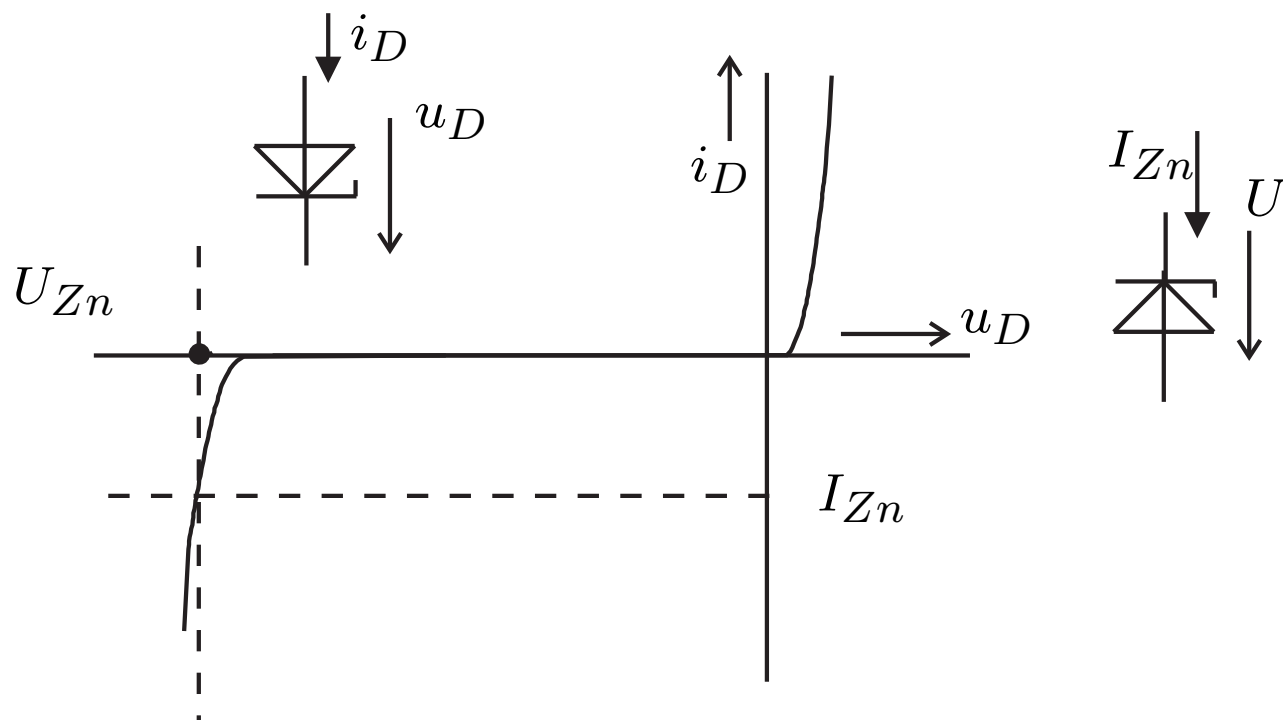
## Dioda s přechodem kov-polovodič (Schottkyho dioda)

Statická voltampérová charakteristika je podobná voltampérové charakteristice diody s přechodem PN, má však menší prahové napětí  $U_D = 100 \div 150$  mV.

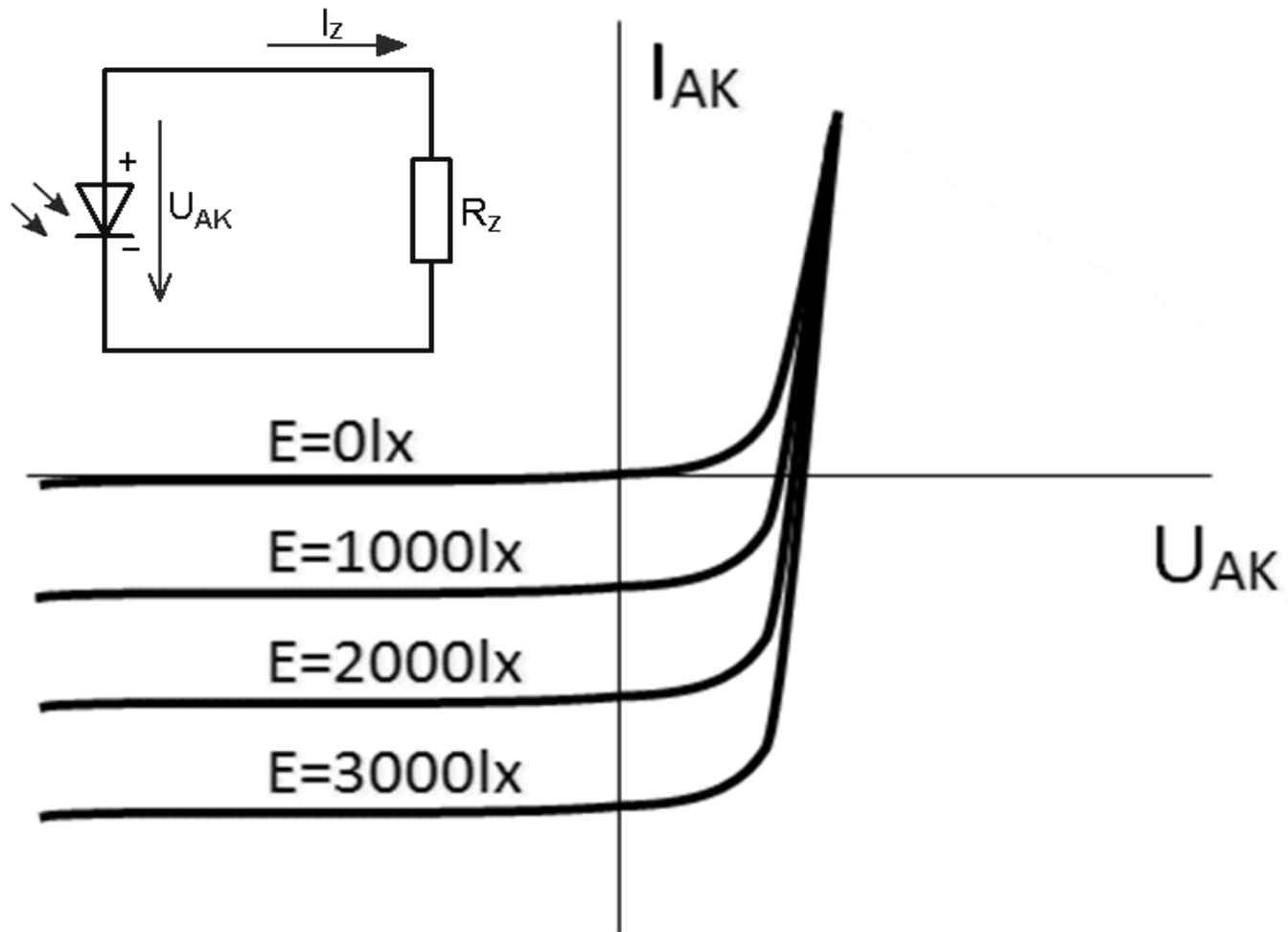
Protože u diod tohoto typu je přenos uskutečňován většinovými nosiči, nedochází zde k hromadění menšinových nosičů a dosažitelná doba zotavení dosahuje jednotek pikosekund.

## Zenerova a lavinová dioda

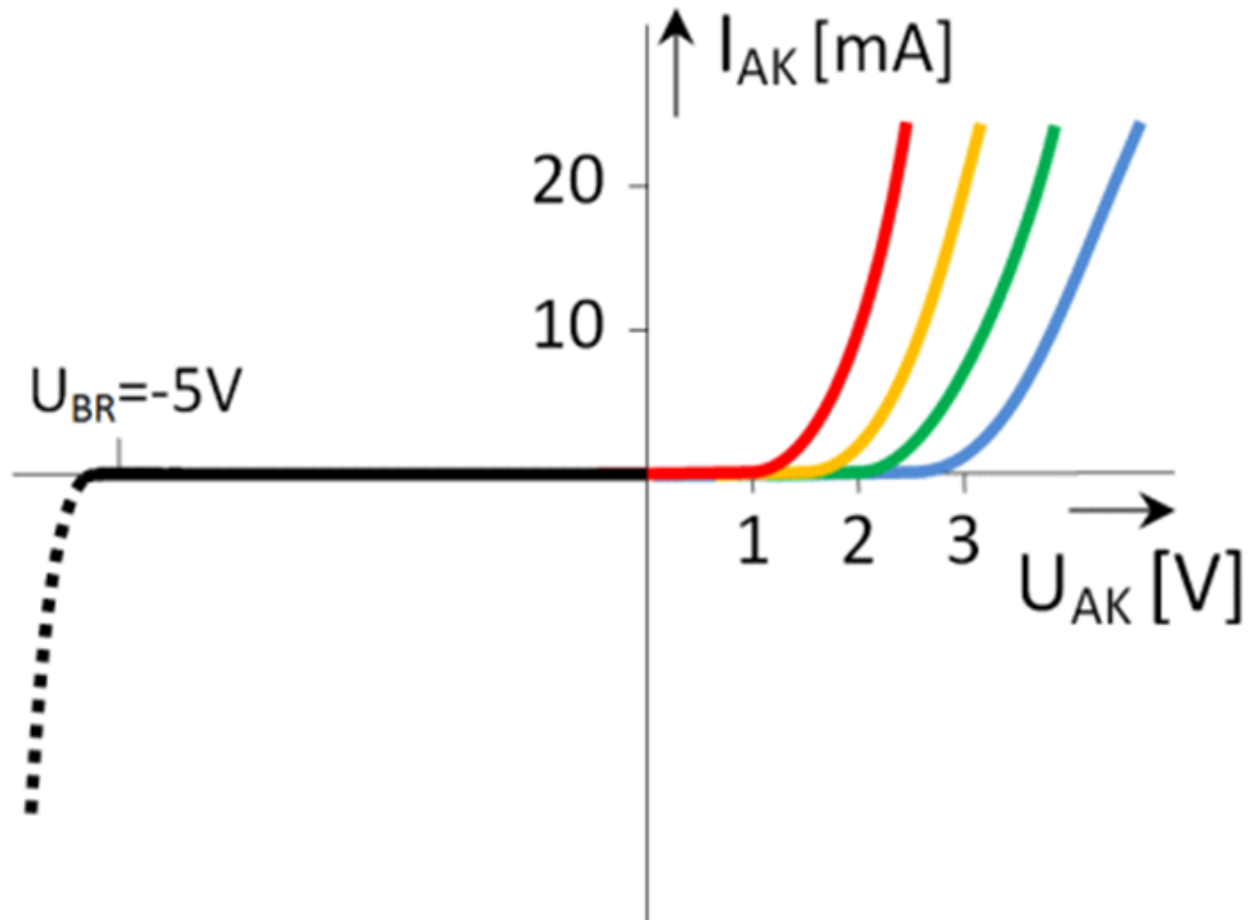
Zenerovy (lavinové) diody jsou diody, které jsou navrženy tak, že je výrobní technologií zajištěna požadovaná hodnota průrazného napětí v rozmezí od jednotek do stovek voltů. V obvodech se pak předpokládá, že chlazením je zajištěno, že proud procházející za mezí průrazu nezpůsobí tepelnou destrukci.



# Fotodioda – VA karakteristik (fotovoltaika)



# LED – Svítivé diody

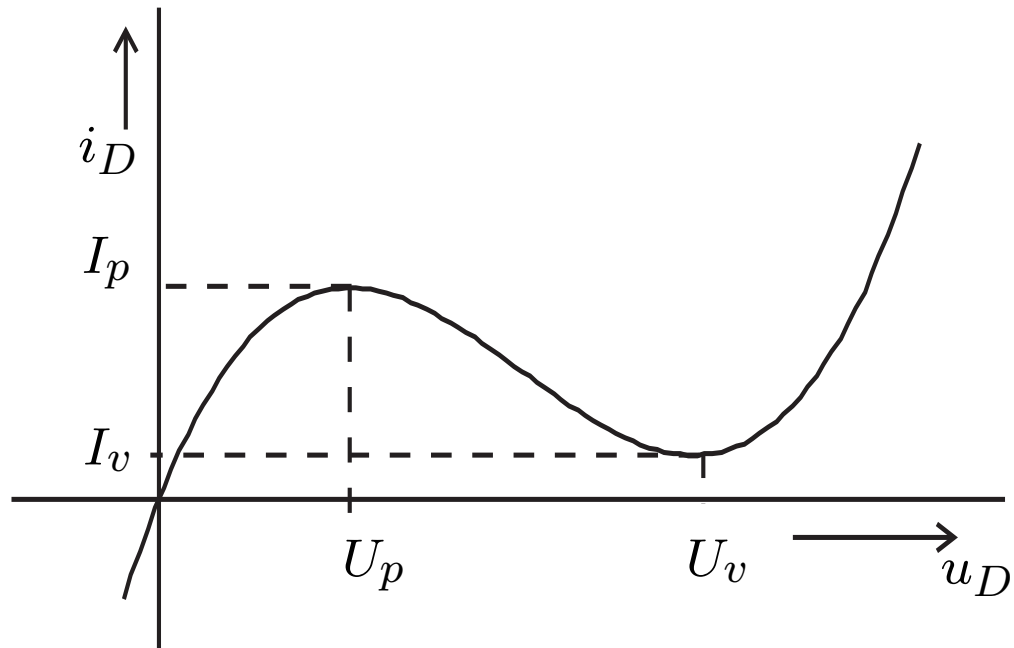


# Různé diody



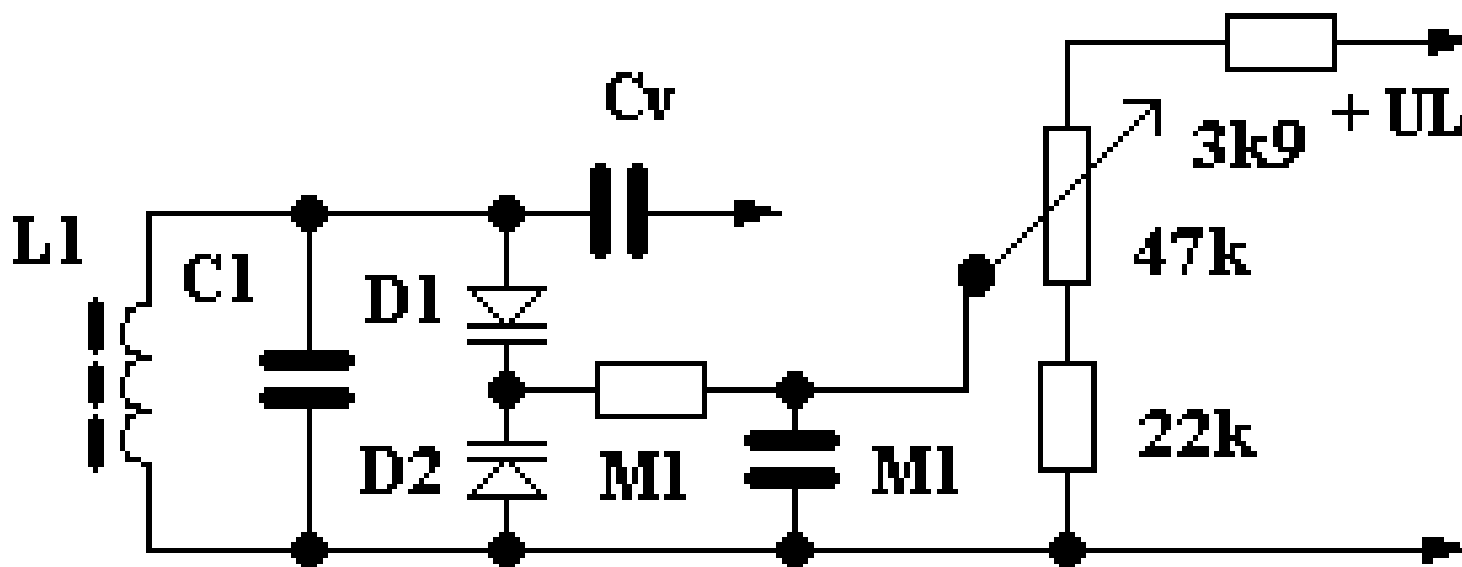
## Tunelová dioda

Tunelová dioda je součástka tvořená přechodem PN. U tunelové diody však existují nosiče náboje, které přechodem mohou procházet (tunelují) při napětí nižším než je napětí prahové. Na VA charakteristice je oblast záporného odporu.



## Kapacitní dioda (varicap a varactor)

Varicap je vytvořen jako polovodičová dioda určená pro použití při závěrné polarizaci. Pracuje jako napětím řízený kapacitor. Využívá se převážně pro elektronické ladění rezonančních obvodů.



Na stranách 4, 19, 20, 21 byl použit podklad <http://www.spsemoh.cz/vyuka/zet/>  
©Jozef Diviš