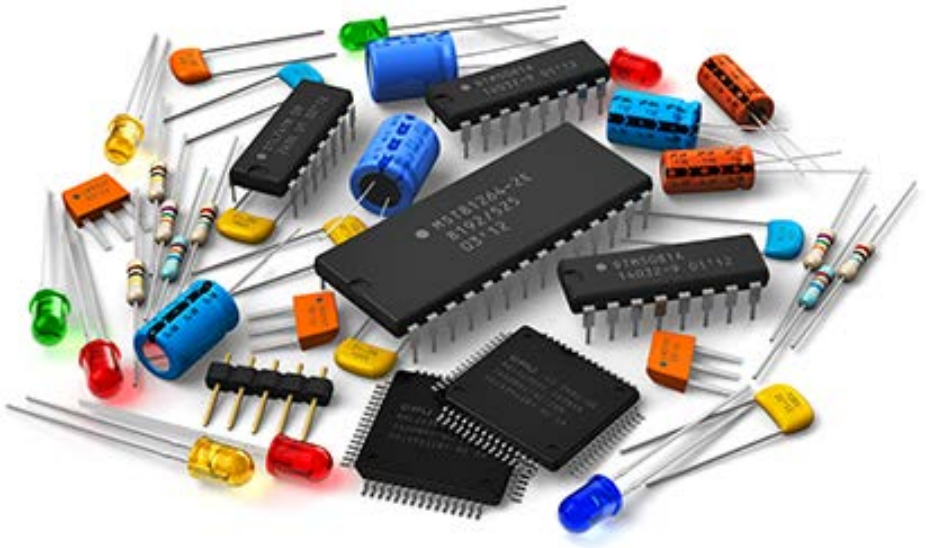
ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Fyzikální elektronika
KET/FYE



Polovodičové diody

Přednáška 4

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Co se v přednášce dozvíte?

- Dozvíte se, co je a jak funguje varikap.
- Zjistíte, jaké vlastnosti musí mít usměrňovací dioda.
- Dozvíte se, co znamená tepelný, tunelový a lavinový průraz diody.
- Dozvíte se, jak lze realizovat záporný elektrický odpor.
- Zjistíte, k čemu lze použít Zenerovu a lavinovou diodu.
- Dozvíte se, co vznikne při spojení polovodiče a kovu.
- Zjistíte, k čemu se využívají supresorové diody.

Polovodičové diody

- **součástky s 1 PN přechodem**
  - varikap
  - usměrňovací dioda
  - Zenerova dioda
  - lavinová dioda
  - Schottkyho dioda
  - LED dioda
  - fotodioda
  - speciální diody



Varikap

- **kapacitní dioda (varaktor)**
- využívá se **kapacity vyčerpané oblasti**
- **kapacita řiditelná přiloženým vnějším napětím**
- rovinný kondenzátor, jehož elektrody jsou tvořeny polovodiči N a P
- dielektrikum je tvořeno vyčerpanou oblastí - tloušťka řiditelná napětím
- varikap pracuje jen v závěrném směru – statická kapacita



$$C = \frac{dQ}{dU} \qquad Q = eN_D d \qquad d = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_r}{eN_D}\left(U_D - U\right)} \approx K\sqrt{-U}$$

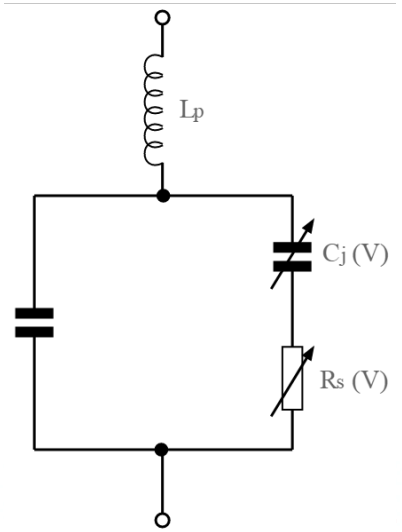
$$C = \sqrt{\frac{e\varepsilon_0\varepsilon_r N_D}{2\left(U_D - U\right)}} = \frac{\varepsilon_0\varepsilon_r S}{d}$$

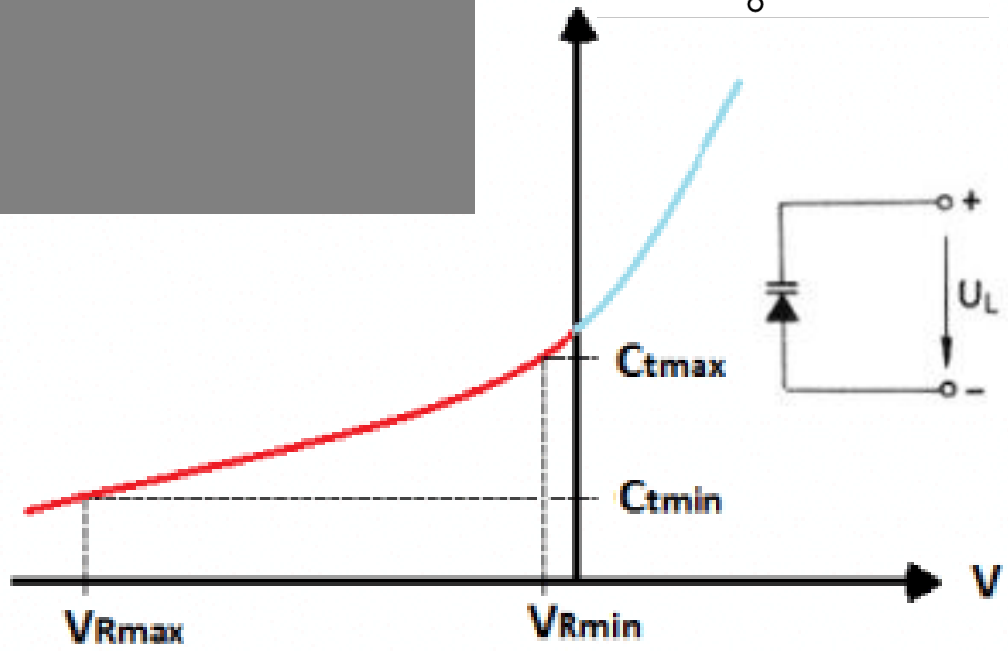
$$C = K\left(-U\right)^{-n}$$

n=1/2 pro strmý přechod

n=1/3 pro pozvolný přechod

- **Farad-voltová charakteristika**
- aplikace
  - **ladící kondenzátor**
  - **integrované obvody (i pro pevné C)**

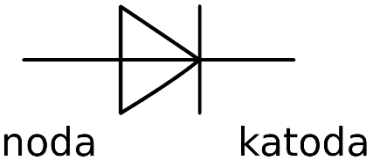




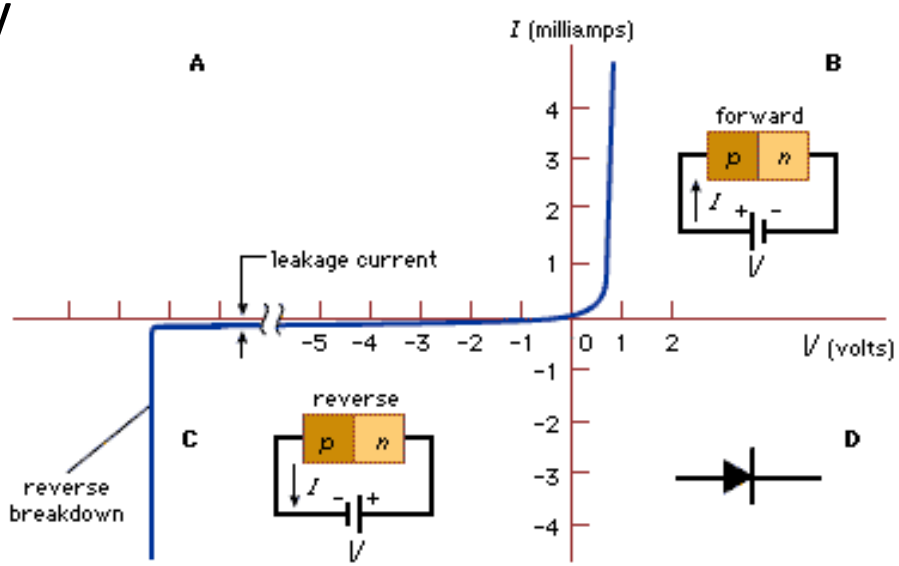
- !!! induktor nelze vytvořit polovodičově !!!
  - není nutný pro IO
  – nelze, aby napětí předbíhalo proud

Usměrňovací dioda

- **nelineární dvojpól s typickým průběhem V-A charakteristiky**
- propustný a závěrný stav
- **platí Shockleyho rovnice**
- **kolem 0 V dioda neusměrňuje** – platí Ohmův zákon
- **saturační proud I_0 (menšinové nosiče)** - teplotní závislost
- ideální usměrňovač
  - propustný směr – jen I, U=0 V
  - závěrný směr – jen U, I=0 A



$$I = I_0\left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1\right)$$



© 2004 Encyclopædia Britannica, Inc.

- propustný směr

$$U > \frac{3kT}{q} \rightarrow I = I_0 e^{\frac{qU}{kT}}$$

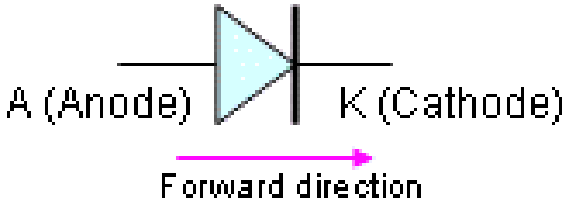
- oblast kolem 0 V

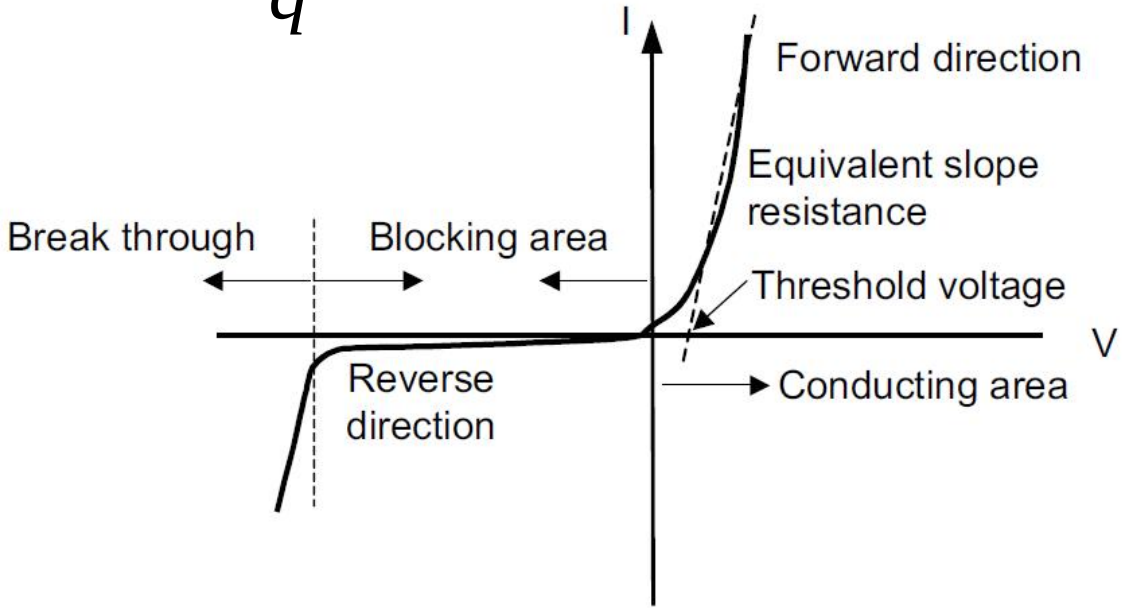
$$|U| << \frac{kT}{q} \rightarrow I = I_0 \frac{q}{kT} U$$

- závěrný směr

$$U < -\frac{3kT}{q} \rightarrow I = -I_0$$

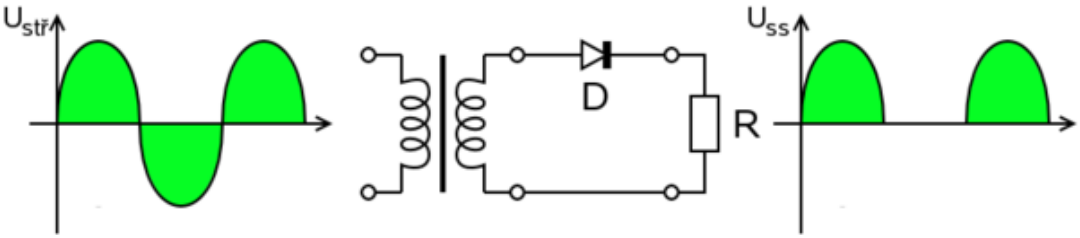
- V-A charakteristika v I. a III. kvadrantu – vždy jako spotřebič



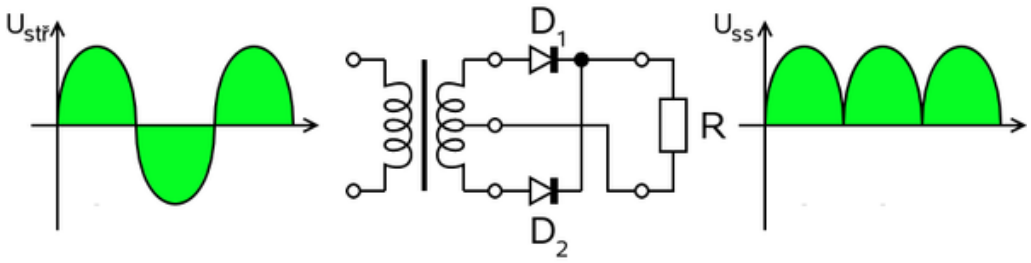


Typy usměrňovačů

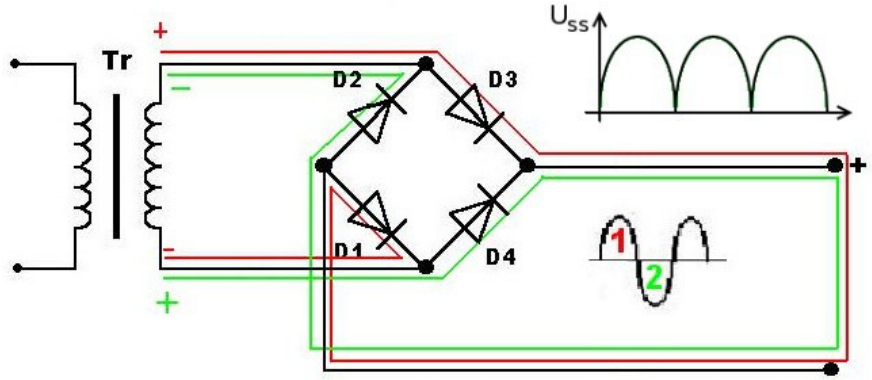
- **Jednocestný usměrňovač**



- **Dvoucestný usměrňovač**



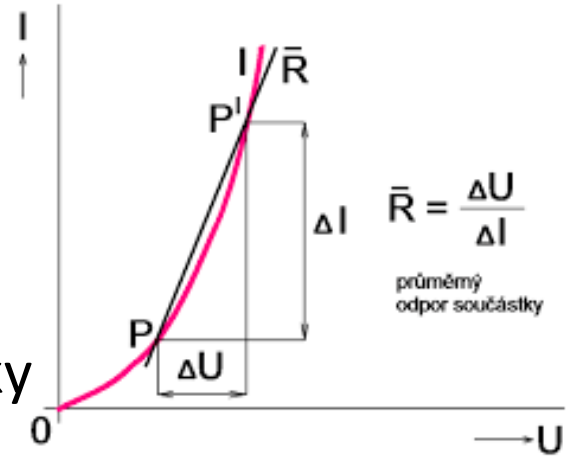
- **Můstkový usměrňovač**



Princip činnosti:
https://www.youtube.com/watch?v=JNi6WY7WKAI

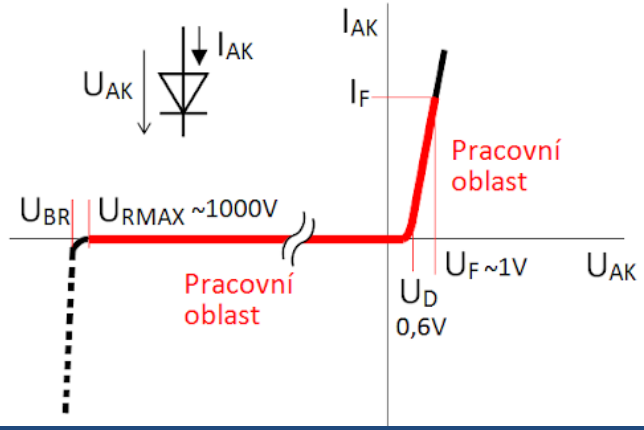
Odpor a kapacita usměrňovací diody

- **odpor diody** – propustný i závěrný směr
  - statický
  - dynamický $R_s = \frac{U}{I}$ $r_d = \frac{dU}{dI}$
- **pracovní bod** – oblast propustné charakteristiky



- **difúzní kapacita** – souvisí s difúzními proudy, vstřikem nosičů
  - propustný směr
  - závěrný směr – neuvažuje se, převládá statická kapacita

$$C_{dif} = S\frac{q^2}{2kT}\left(L_p p_n + L_n n_p\right)e^{\frac{qU}{kT}}$$

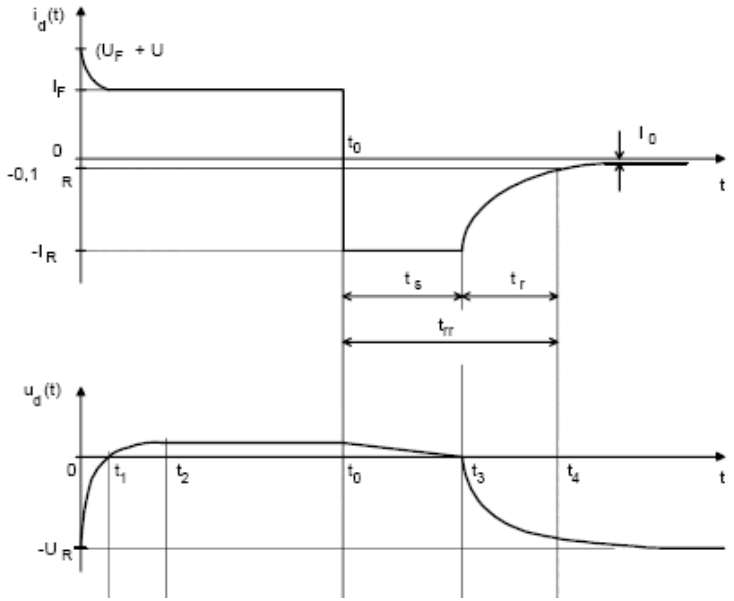


Ztráty na diodě

- ztráty na diodě – **přeměna na teplo**
  - statické – propustný a závěrný směr

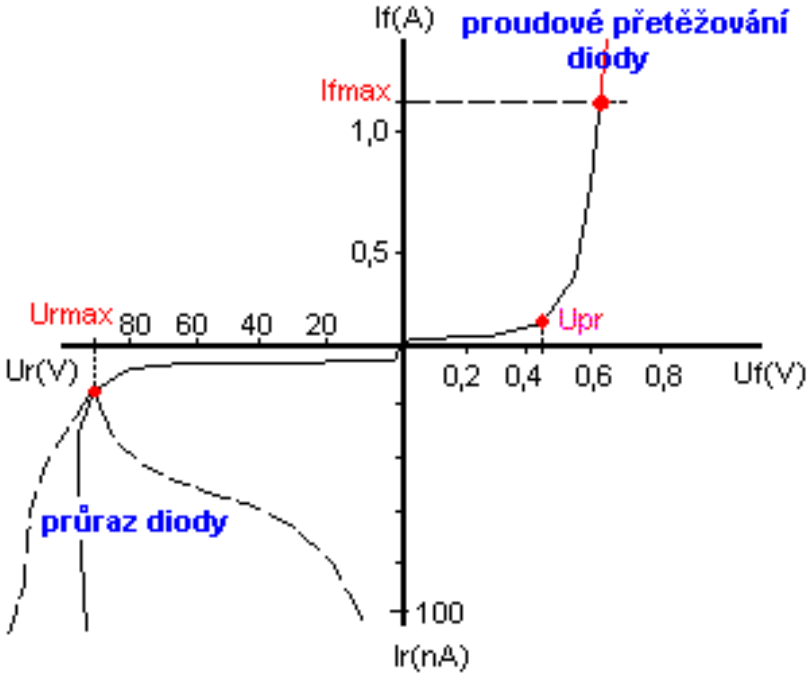
$$P_{zt} = iU_D \qquad P_{zt} = (-U)(-I)$$

  - dynamické – způsobené skokovou změnou stavů
    - propustný → závěrný
      – velké ztráty (velké napětí, velký proud)
    - závěrný → propustný



Průrazy diod

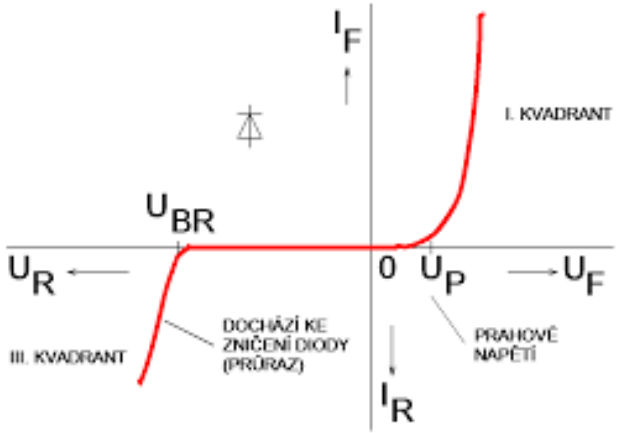
- **překročení určité meze (U_{BR}) závěrného napětí**
- **rychlý nárůst proudu**
- velikost průrazného napětí určena oblastí s menší koncentrací příměsí
- mechanizmus závisí na typu přechodu, materiálu polovodiče, tvaru napětí, teplotě
- **4 druhy průrazů**
  - průraz el. polem (tunelový)
  - průraz lavinový
  - průraz tepelný
  - průraz povrchový



Tepelný průraz

- **vznik tepla průchodem saturačního proudu**
- **špatný odvod tepla – nárůst koncentrace menšinových nosičů (ionizace valenčního pásu) → nárůst saturačního proudu → nárůst tepla**

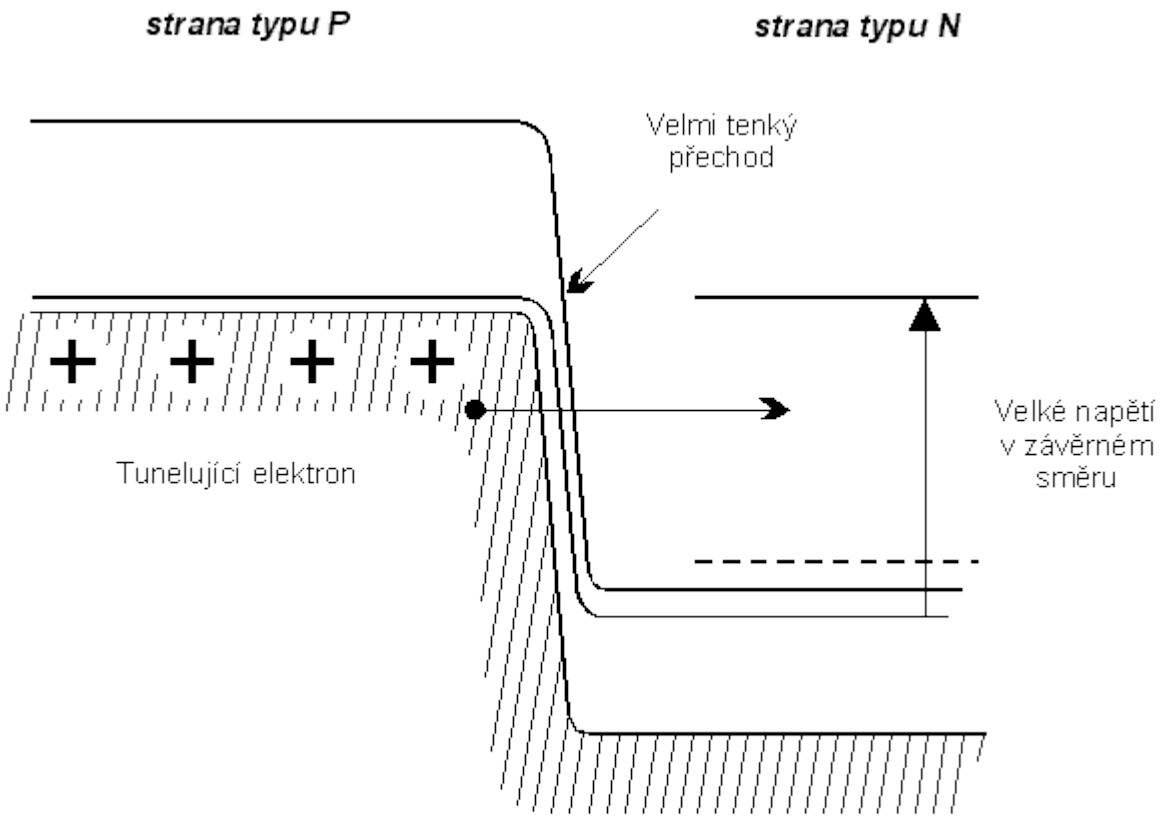
$$(-U)\uparrow \Rightarrow P_{zt}\uparrow \Rightarrow T\uparrow \Rightarrow I_0\uparrow \Rightarrow P_{zt}\uparrow$$



- kladná zpětná vazba
- **destruktivní průraz**
- průraz – koleno v závěrném směru
- doba trvání jevu – 10^{-6} s → polovodičové zařízení nelze chránit tavnou pojistkou (doba vybavení poj. – 10^{-3} s)

Tunelový (Zenerův) průraz

- **přechod elektronů z valenčního pásu typu P do vodivostního pásu typu N**



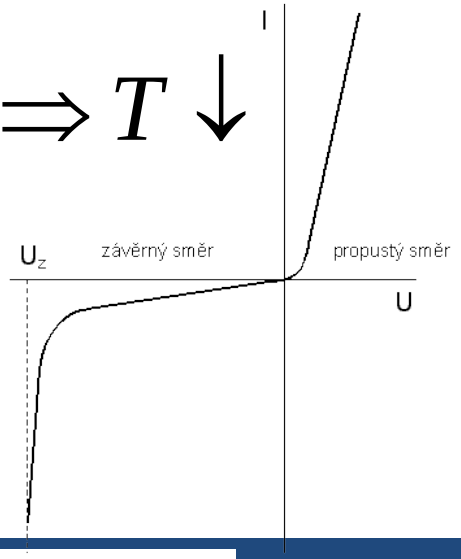
Tunelový (Zenerův) průraz

$$I_T = f(T)$$

- **způsoben většinovými nosiči**
- **závislé na šířce vyčerpané oblasti**
- podmínkou je **velmi úzká vyčerpaná oblast**
- nutná vysoká koncentrace příměsí
- **nedestruktivní průraz**
- **pravděpodobnost tunelování klesá s teplotou – záporná zpětná vazba**
- tunelové proudy max. mA

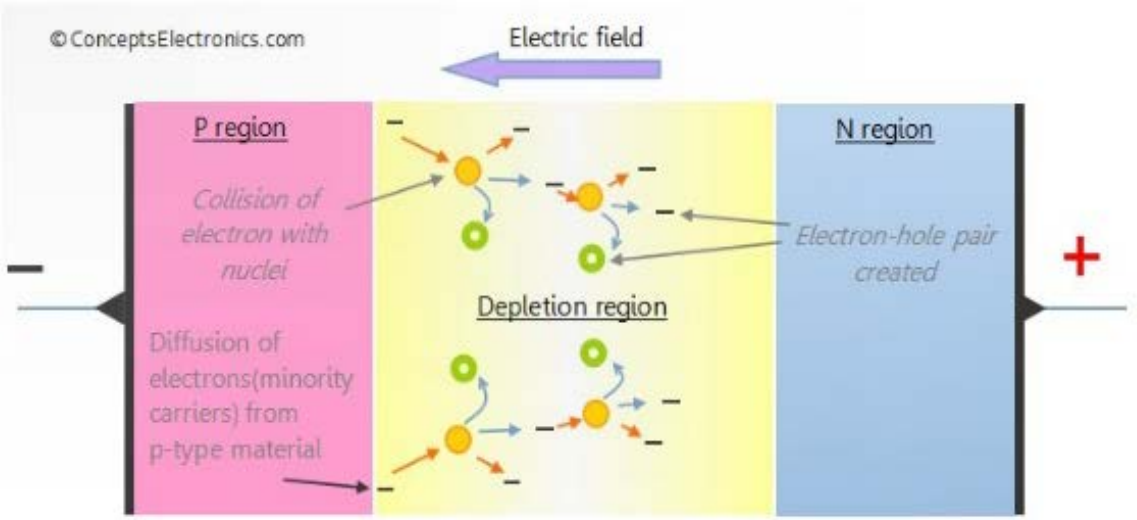
$$\frac{dI_T}{dt} < 0$$

$$(-U)\uparrow \Rightarrow P_{zt}\uparrow \Rightarrow T\uparrow \Rightarrow I_T \downarrow \Rightarrow P_{zt}\downarrow \Rightarrow T\downarrow$$



Lavinový průraz

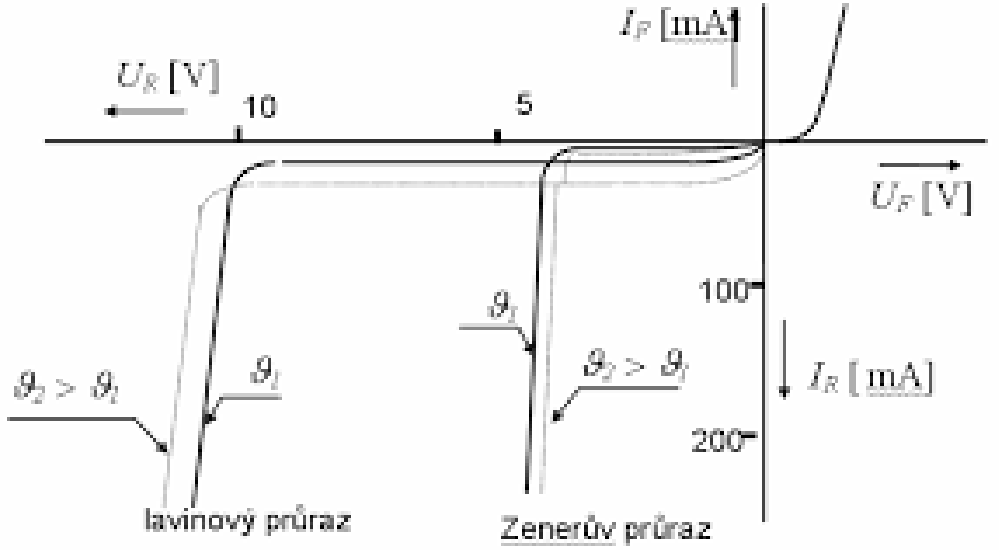
- elektrony ve vyčerpané oblasti pod vlivem vnějšího el. pole
- velká kinetická energie elektronů
- **náraz elektronů na neionizovaný atom vyvolá ionizaci – vyražení dalšího elektronu**
- vyražené elektrony způsobí ionizaci dalších atomů
- **dochází k lavinovému násobení → nárůst proudu**



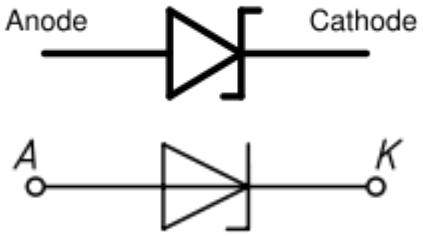
Lavinový průraz

- **nutné získání dostatečné energie elektronů** → vliv vnějšího el. pole, dlouhý pobyt ve vyčerpané oblasti
- **vyčerpaná oblast (d) musí být dostatečně široká**
- širší PN přechod → větší proud lavinového průrazu
- **nedestruktivní průraz – šířka vyčerpané oblasti klesá s teplotou, tím klesá pravděpodobnost lavinového násobení**
- záporná zpětná vazba – nastavení dynamické rovnováhy

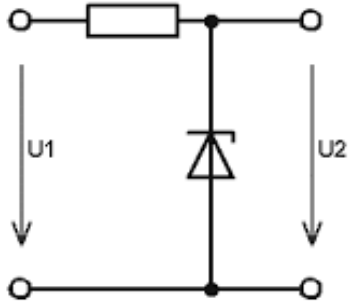
- aplikace:
  - lavinová dioda
  - tyristor

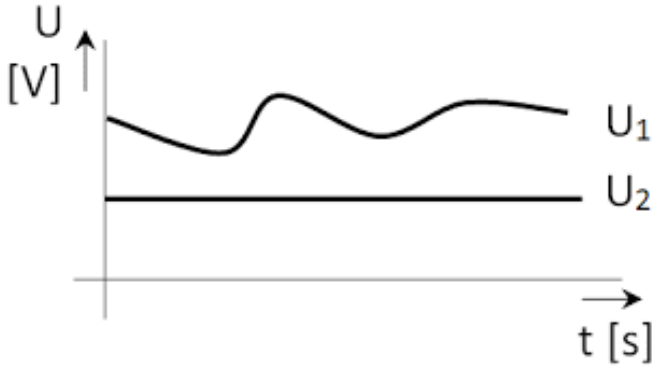


Zenerova dioda



- pro $U>U_z$ platí Shockleyův vztah
- pro $U<U_z$ prudký nárůst proudu
- **princip činnosti spočívá v tunelovém průrazu**
- dynamický odpor ~ 0 (ve skutečnosti – jednotky Ω)
- **napěťový stabilizátor**
- Zenerův průraz nastane při nižším napětí než tepelný průraz
- Zenerovy diody – úzký PN přechod

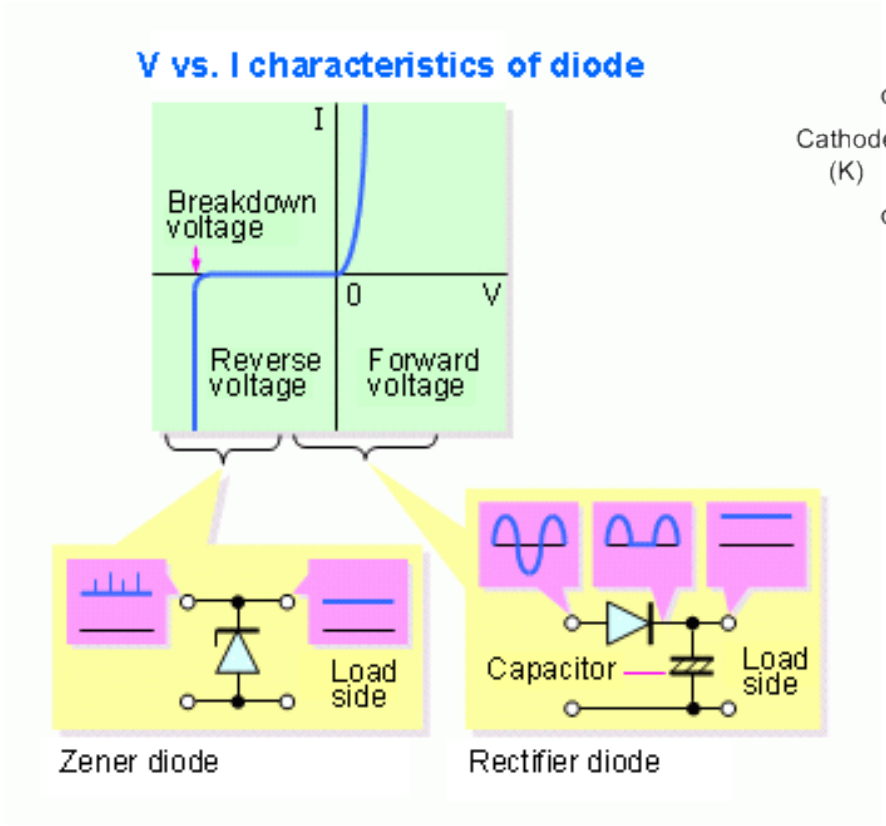


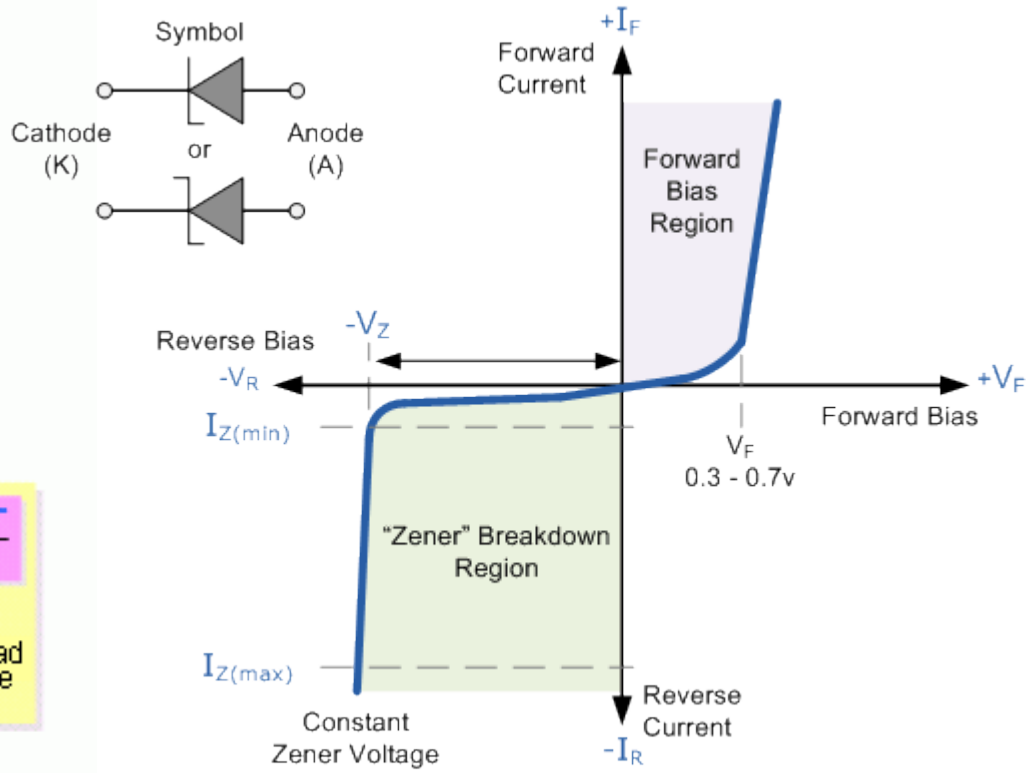


$$r_d = \frac{dU}{dI} \approx 0$$

Princip činnosti: https://www.youtube.com/watch?v=XhQqtdTlRus

- Zenerovo napětí dáno technologií – nelze měnit (změna dána změnou technologie)
- materiál pro Zenerovy diody - Si

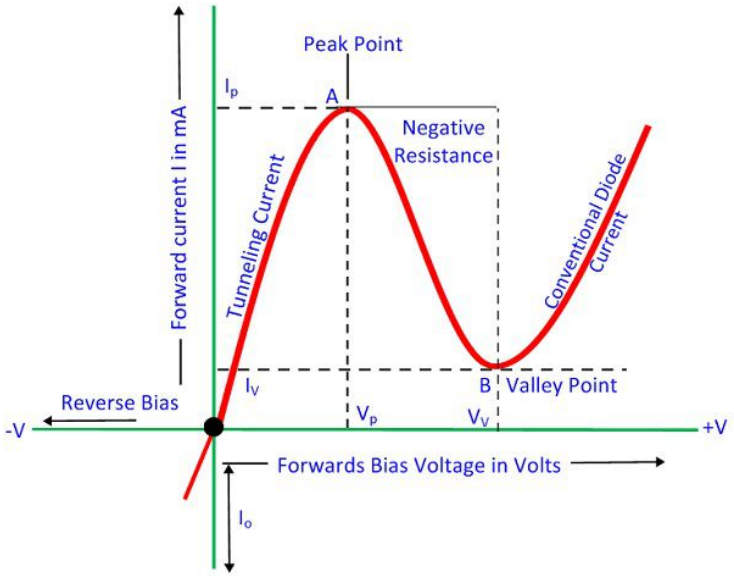


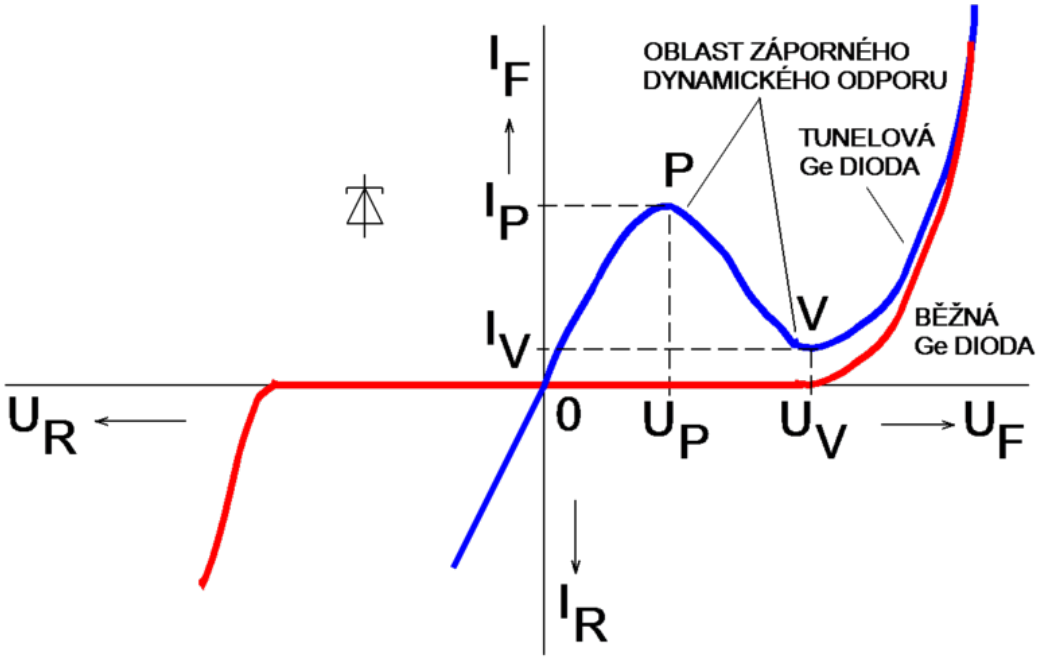


Tunelová dioda

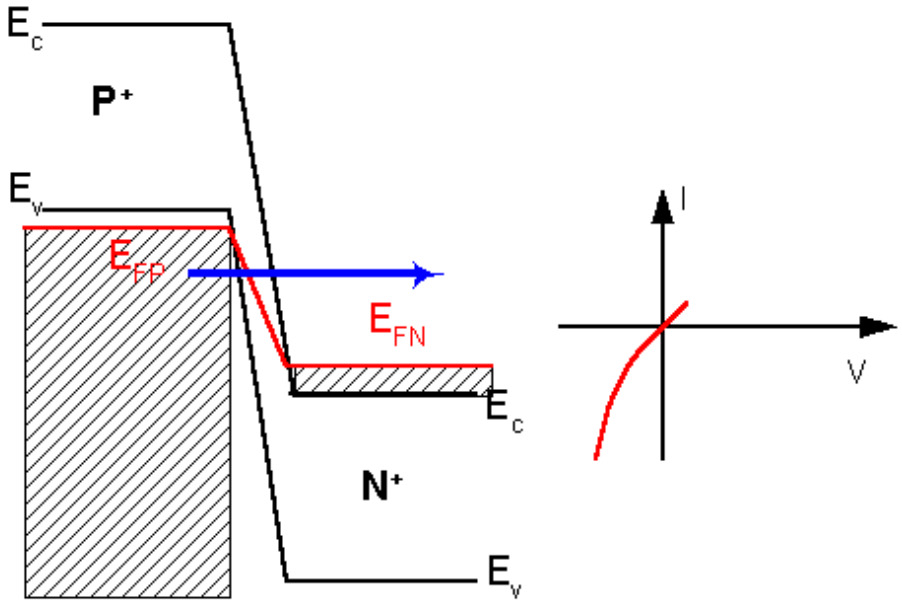
- Gunnovy diody
- tunelový průraz, který nastává v propustném směru
- difúzní + tunelové proudy
- úzká vyčerpaná oblast
- polovodiče s vysokou koncentrací nosičů
- V-A charakteristika typu N



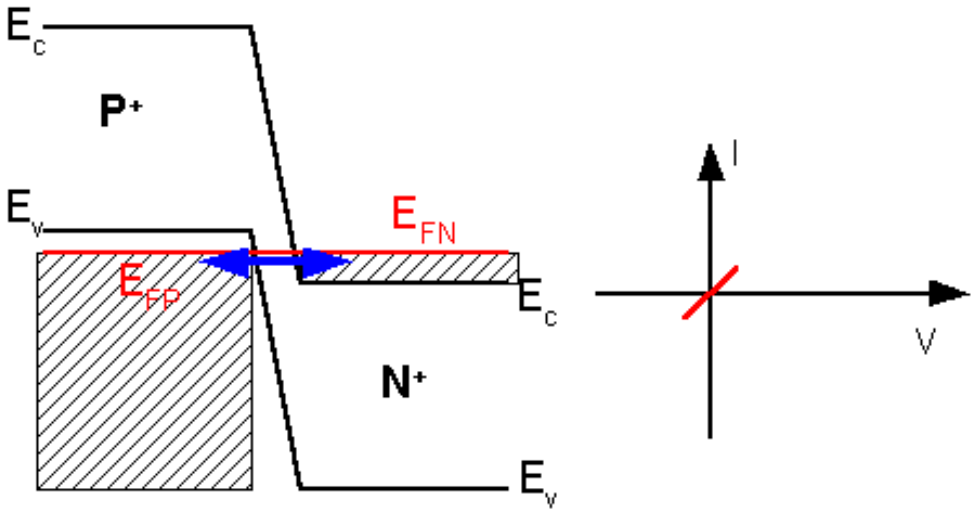




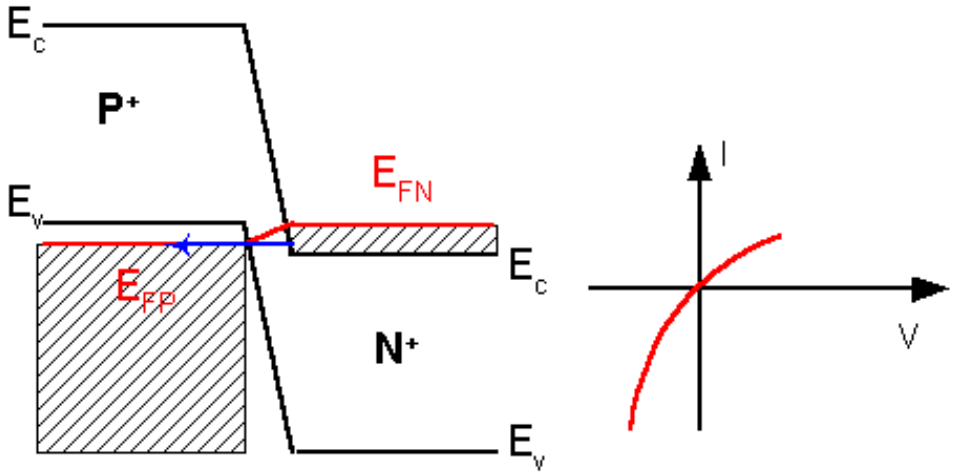
- přechod polarizován v závěrném směru
- elektrony z valenčního pásu (P) přecházejí do vodivostního pásu (N) pomocí tunelování
- dioda je ve vodivém stavu



- není přiloženo vnější napětí
- tepelná rovnováha

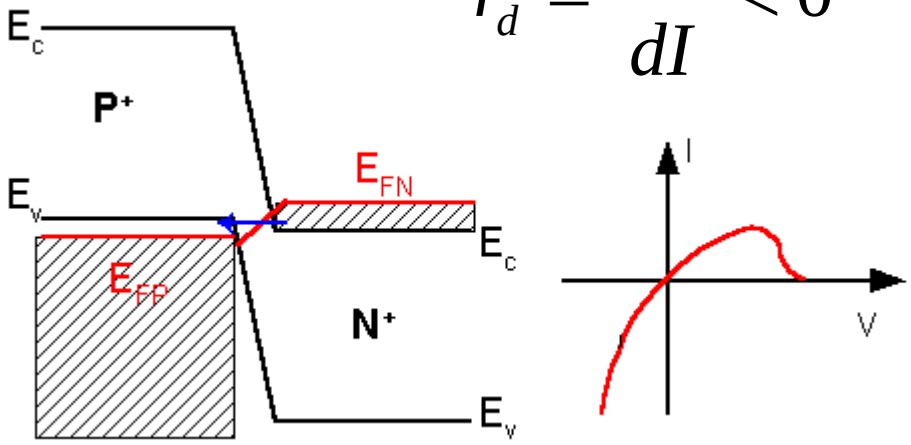


- zvyšování napětí
- tunelování elektronů z vodivostního pásu (N) do valenčního pásu (P)
- dioda je ve vodivém stavu

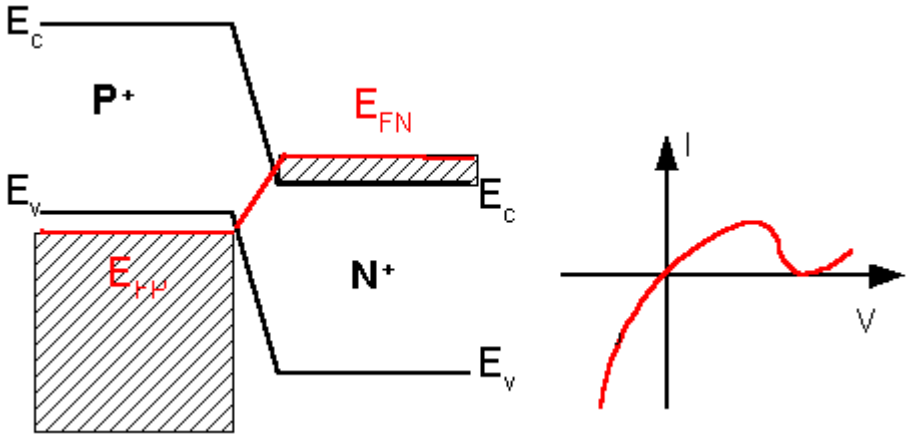


- elektrony ve vodivostním pásu (N) proti zakázanému pásu
- s velikostí napětí narůstá oblast zakázaného pásu
- nosiče nemohou tunelovat
- pokles tunelového proudu
- záporný dynamický odpor

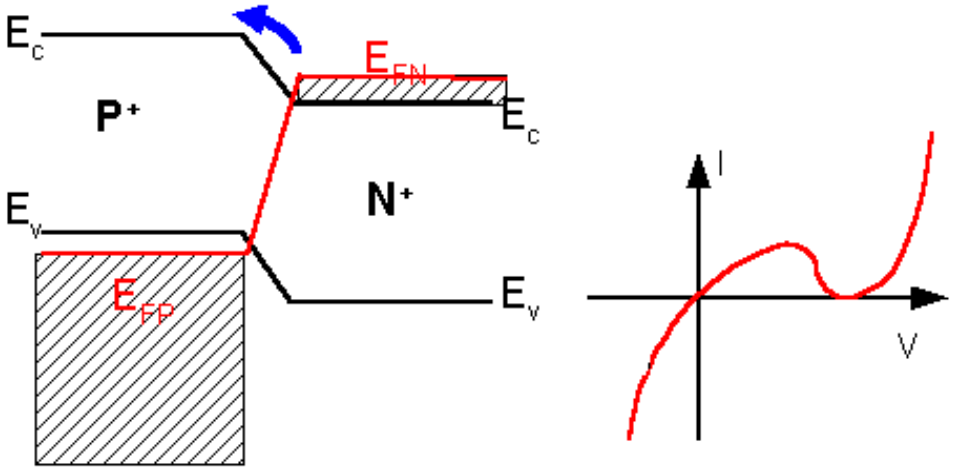
$$r_d = \frac{dU}{dI} < 0$$



- uplatnění tepelné složky proudu od určitého napětí
- nárůst proudu



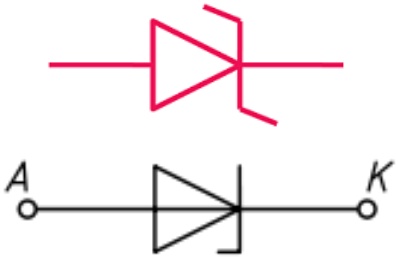
- s větším napětí větší teplota a větší proud
- přímý přechod elektronů z vodivostního pásu (N) do vodivostního pásu (P)



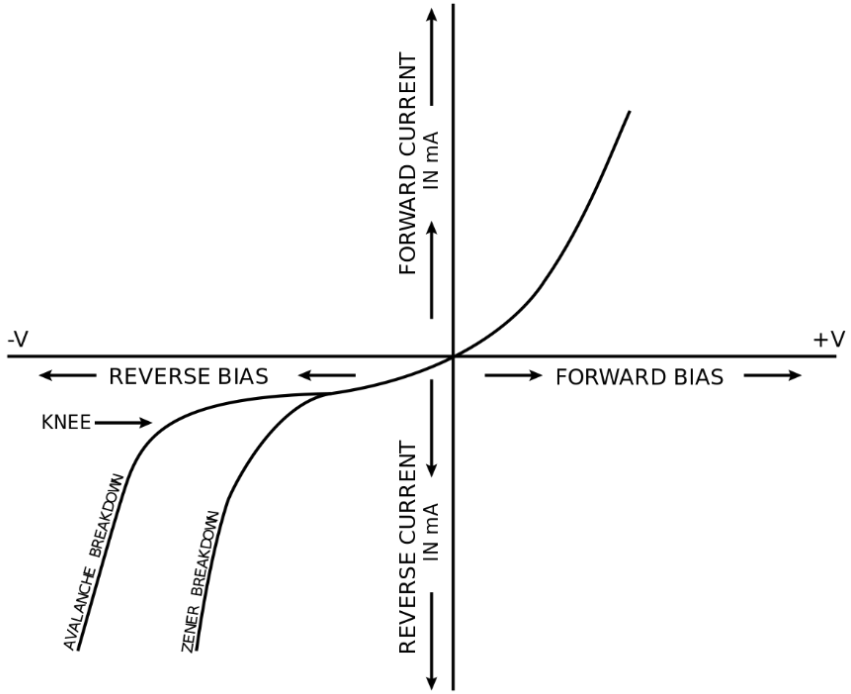
Princip činnosti: https://www.youtube.com/watch?v=6-UkBNqS8ac

Lavinová dioda

- pro $U>U_L$ platí Shockleyův vztah
- pro $U<U_L$ prudký nárůst proudu
- **princip činnosti spočívá v lavinovém průrazu**
- dynamický odpor ~ 0 (ve skutečnosti – jednotky Ω)
- kvalitativně shodná se Zenerovou diodou, ale $|U_L|>|U_Z|$
- **stabilizace vyšších napětí**



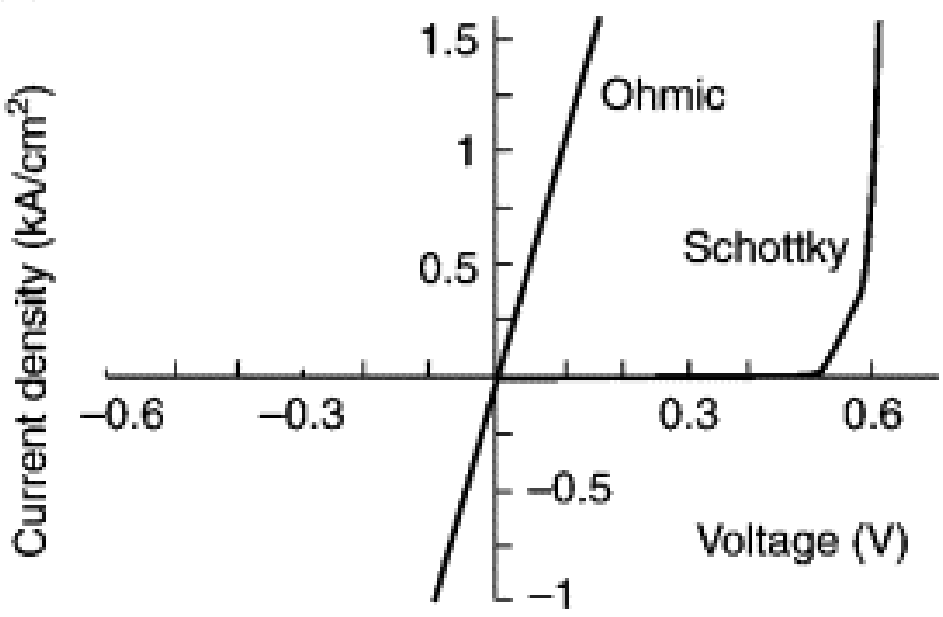
$$r_d = \frac{dU}{dI} \approx 0$$



Přechod kov-polovodič

- vytvoří se při každé konstrukci polovodičových součástek
- vytvoří se při každém měření polovodičových materiálů

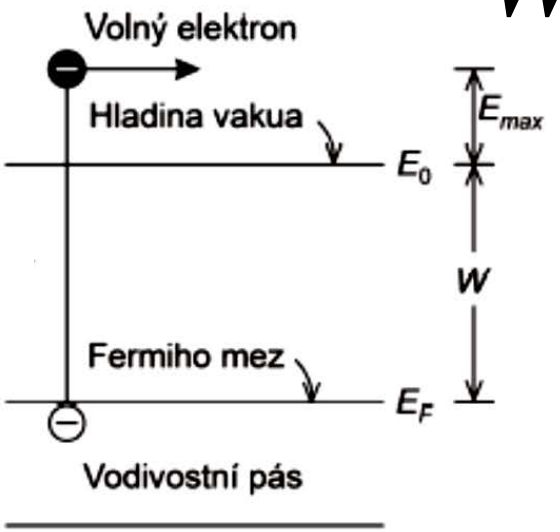
- 2 varianty
  - **usměrňující kontakt (Schottkyho)**
  - **neusměrňující kontakt (ohmický)**

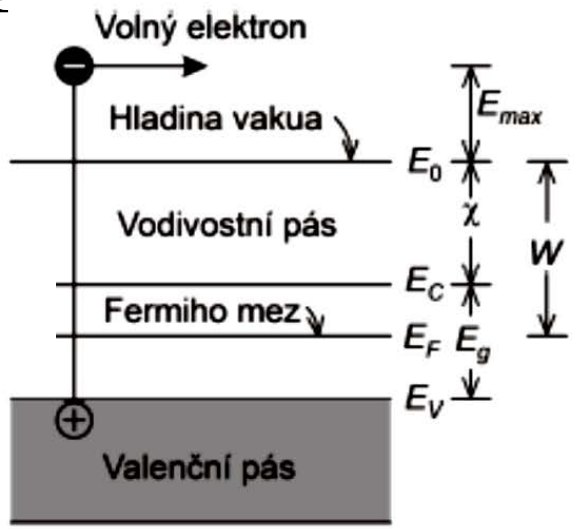


Schottkyho bariéra

- **typ přechodu je určen výstupní prací elektronů z jednotlivých materiálů**
- výstupní práce – energie potřebná k přenosu elektronu z Fermiho hladiny na hladinu o nulové energii (ve vakuu)
- ϕ - výstupní potenciál
- výstupní práce pro Al – 4,3 eV, pro Au - 4,8 eV, pro Si (N) - 4 eV – závisí na typu a dotaci

$$W = q\Phi$$





Schottkyho bariéra

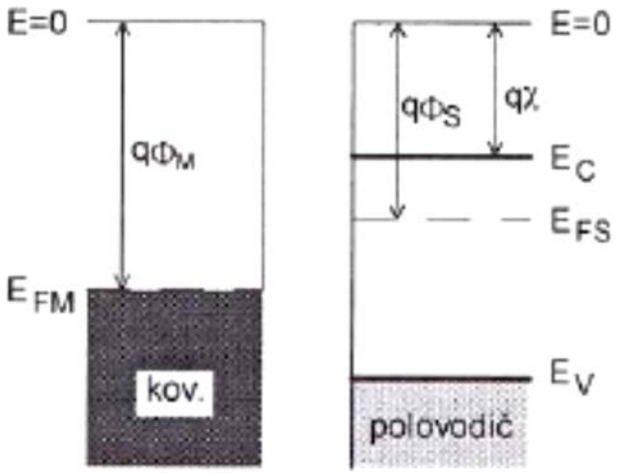
- vytvoření kontaktu – termodynamická rovnováha
- přechod elektronů z polovodiče do kovu – vyrovnání Fermiho hladin
- **vznik vyčerpané oblasti** – ochuzená o volné nosiče náboje
- rovnovážný kontaktní potenciál (difúzní napětí) U_D – brání difúzi elektronů z vodivostního pásu do kovu
- elektronová afinita χ - rozdíl mezi hladinou vakua a dnem vodivostního pásu
- **potenciálový rozdíl lze snižovat přiloženým vnějším napětím – výška Schottkyho bariéry se však nemění**

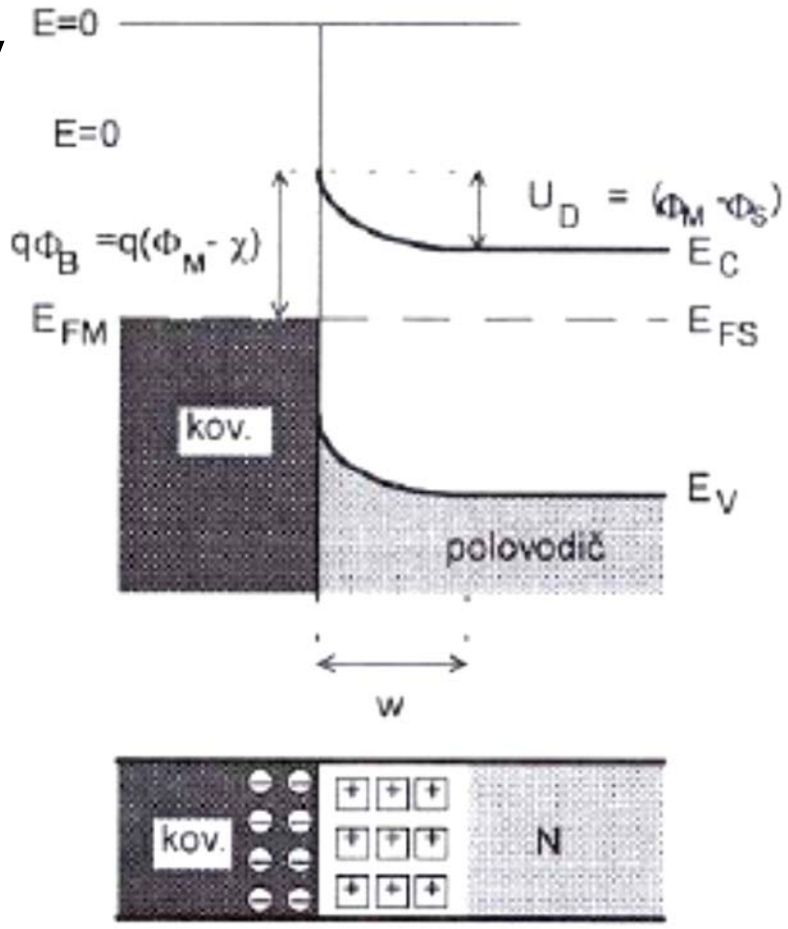
Princip činnosti:
https://www.youtube.com/watch?v=6-UkBNqS8ac

https://www.youtube.com/watch?v=-J78Rt3Q5Ys

Schottkyho bariéra

$q\Phi_M$ – výstupní práce kovu
$q\Phi_S$ – výstupní práce polovodiče
Φ_B - výška potenciálové Schottkyho bariéry



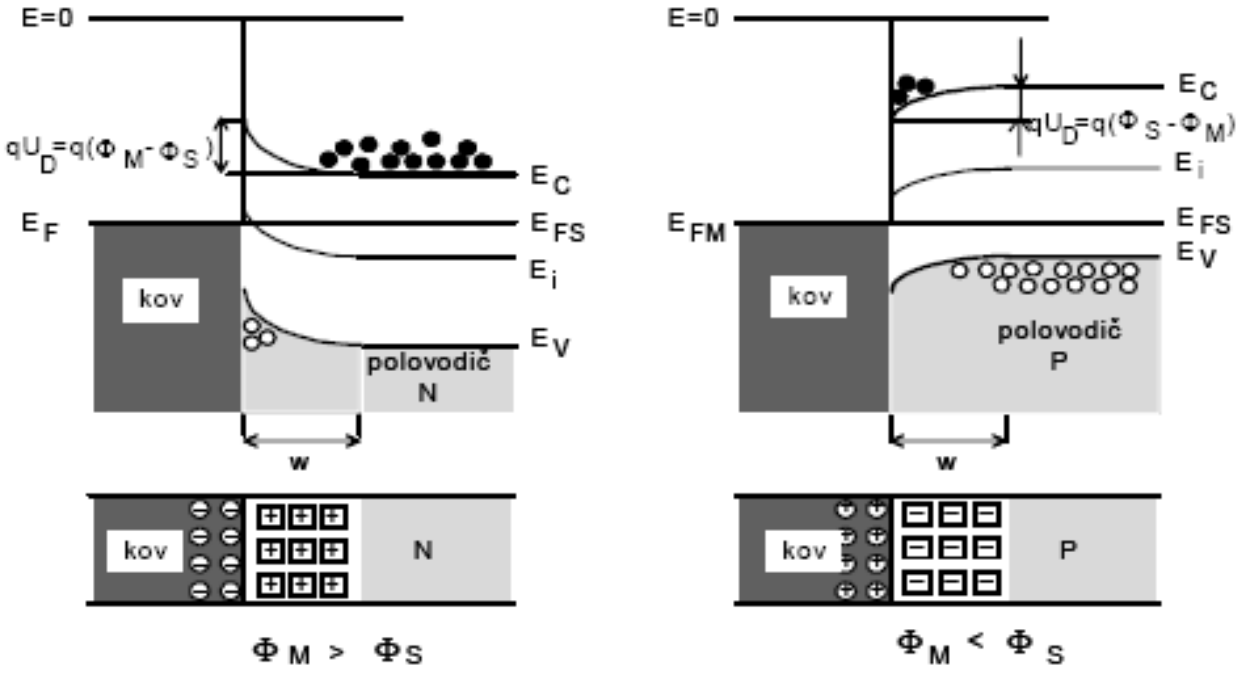


$$U_D = \Phi_M - \Phi_S$$

$$\Phi_B = \Phi_M - \chi$$

Usměrňující kontakt kov-polovodič

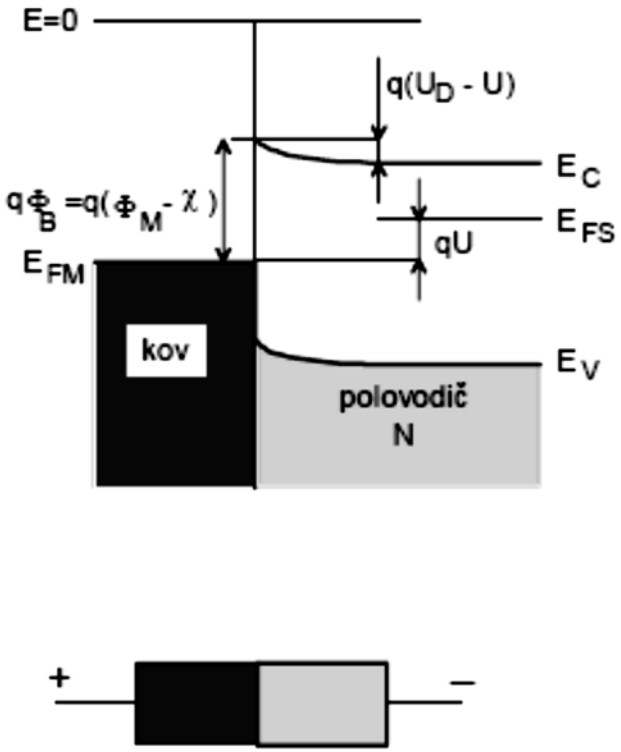
- kov-polovodič typu N: $\Phi_M > \Phi_S$
- kov-polovodič typu P: $\Phi_M < \Phi_S$
- vznik ochuzené vrstvy



snížení U_D – kov(+), polovodič (–)

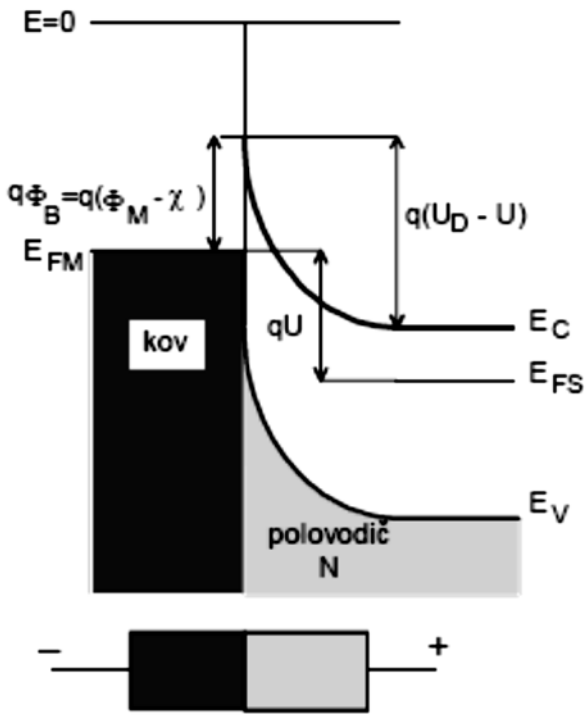
zvýšení U_D – kov(-), polovodič (+)

Usměrňující kontakt kov-polovodič



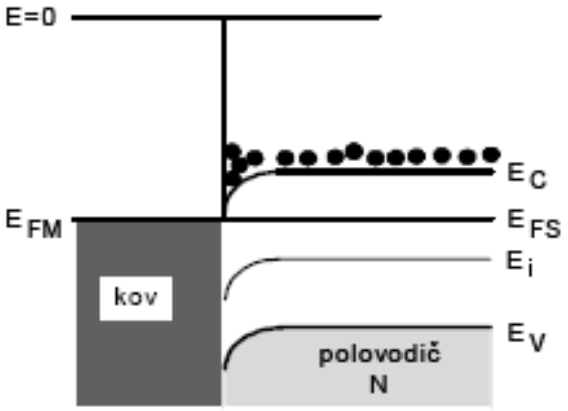
propustný směr

závěrný směr



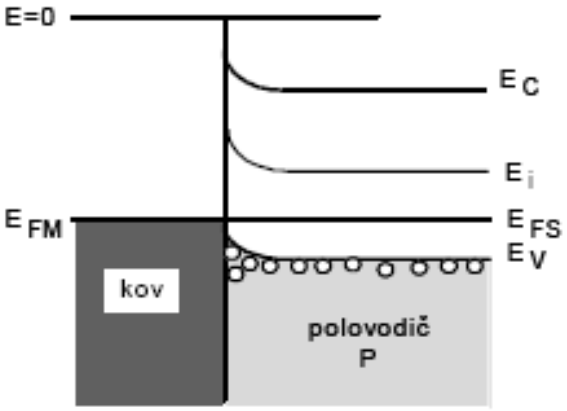
Neusměrňující kontakt kov-polovodič

- kov-polovodič typu N: $\Phi_M < \Phi_S$
- kov-polovodič typu P: $\Phi_M > \Phi_S$
- vznik obohacené vrstvy
- tok elektronů z kovu do polovodiče – vyrovnání Fermiho hladiny, hromadění v blízkosti přechodu





$\Phi_M < \Phi_S$



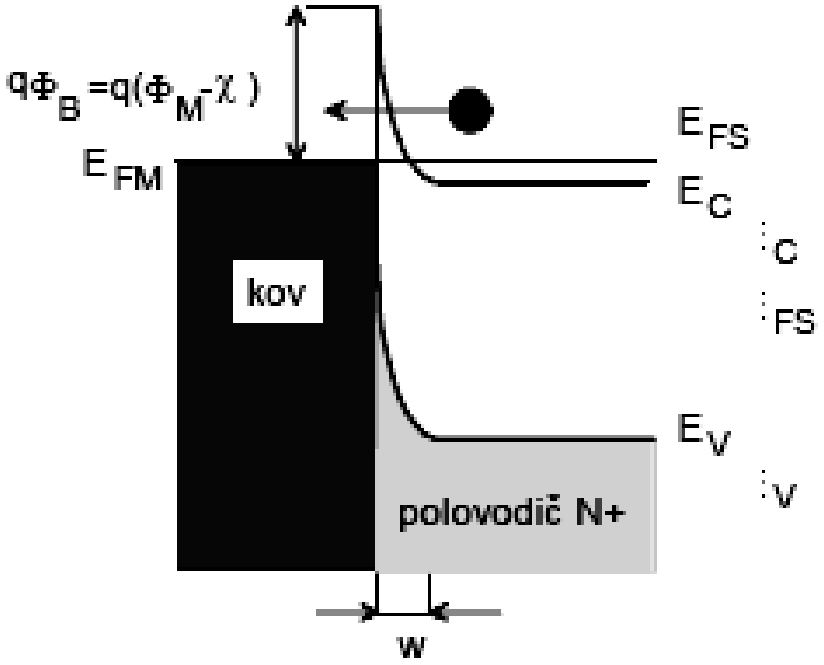


$\Phi_M > \Phi_S$

- **vznik nízké potenciálové bariéry**
- **snadno překonatelná pro nízká napětí**

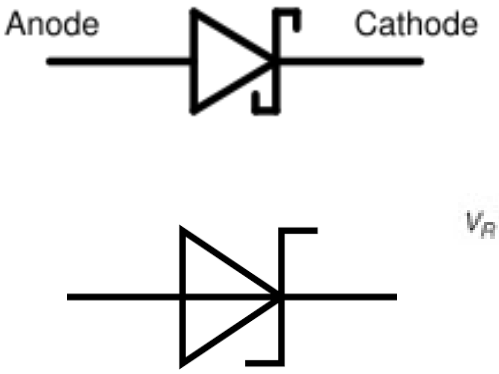
Kontakt kov-polovodič – tunelový průraz

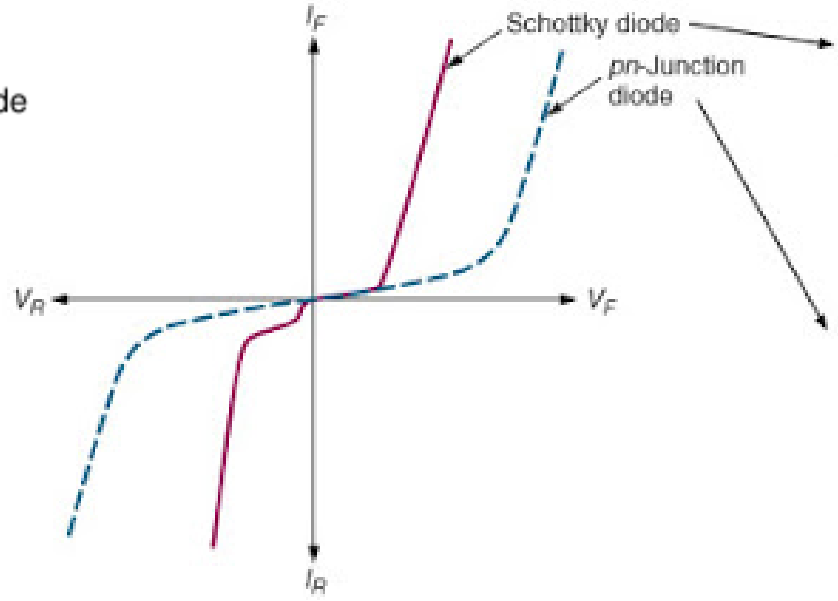
- kontakt kovu se silně dotovaným polovodičem
- vyšší koncentrace nosičů → užší potenciálová bariéra
- **pro úzkou bariéru prochází elektrony tunelováním**
- **nezáleží na výstupních pracích materiálů**

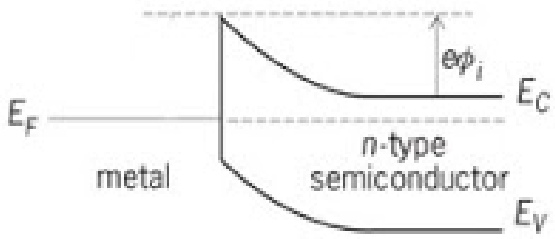


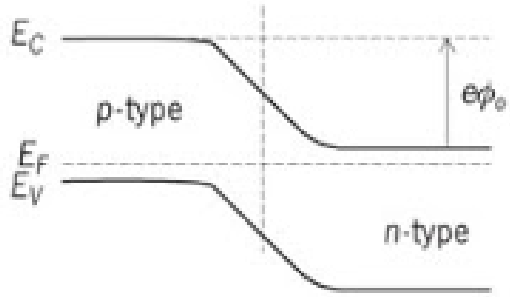
Schottkyho dioda

- **využívá přechodu kontakt kov-polovodič**
- **výborné dynamické vlastnosti** (teoreticky doba zotavení = 0)
- **výborné vf a spínací vlastnosti**
- malý úbytek napětí v propustném směru – 0,3 – 0,5 V
- **velký závěrný proud**
- používá se Si nebo GaAs



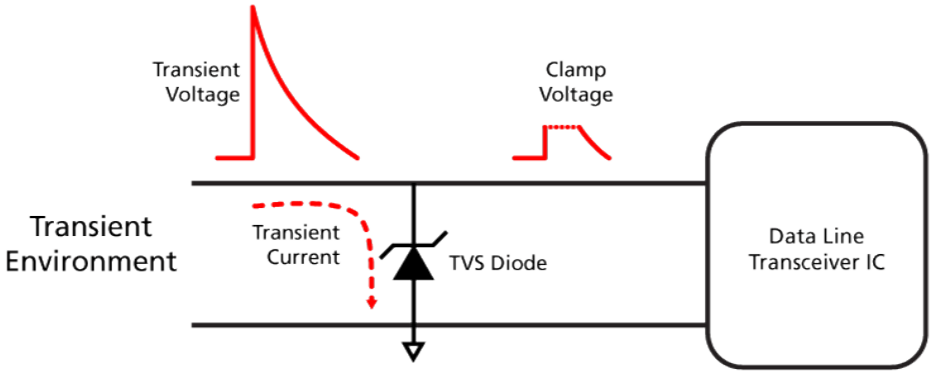


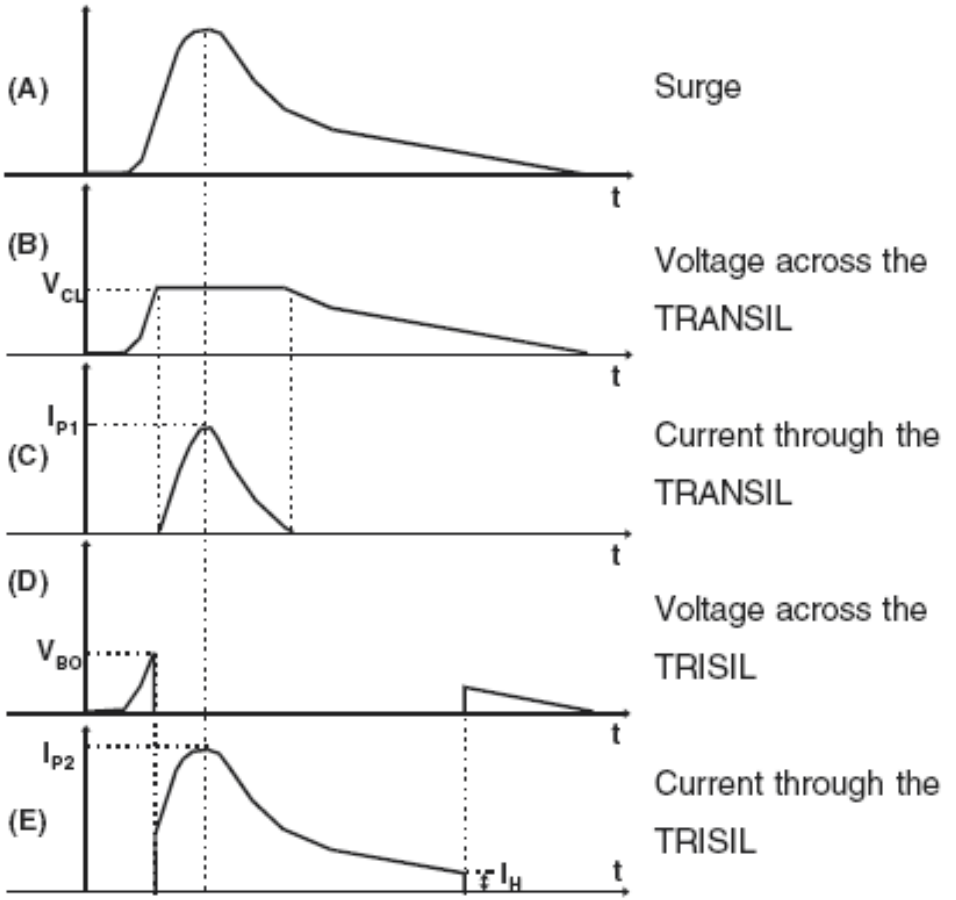




Supresorové diody

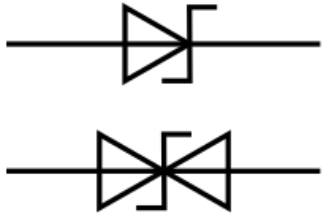
- **transil a trisil**
- **ochrana proti přepětí**
- rychlá odezva na přepěťovou vlnu - ns
- změna VA charakteristiky
- impulzní proud A až kA

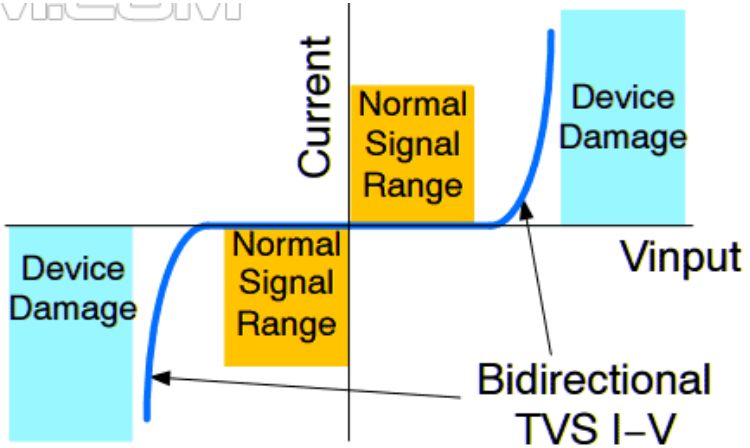


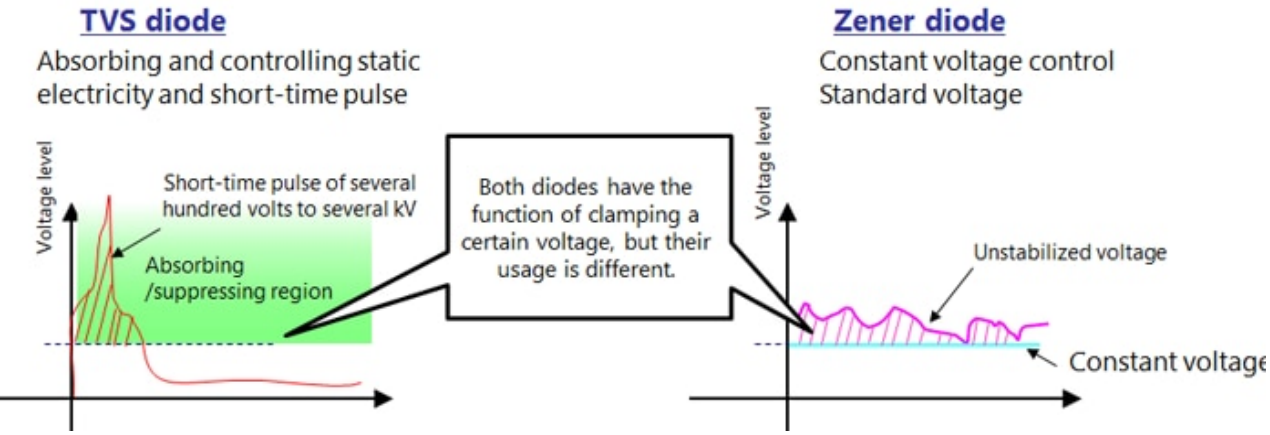


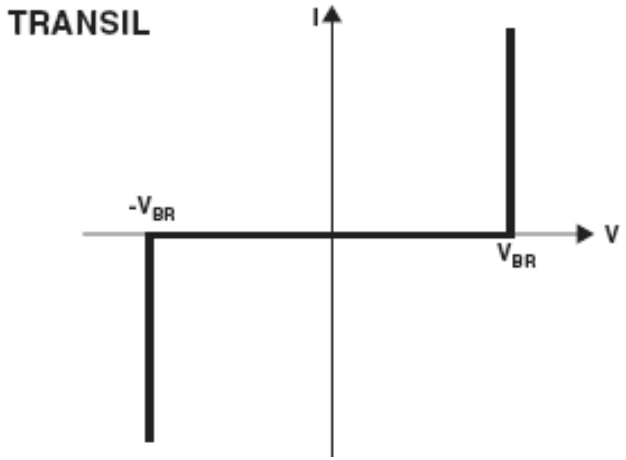
Transil

- **ochrana před napěťovými špičkami**
- jednosměrný nebo obousměrný
- **velký klidový odpor**
- **zanedbatelný odpor při přepětí**
- VA charakteristika podobná Zenerově diodě
- nelze nahradit Zenerovou diodou → zničení



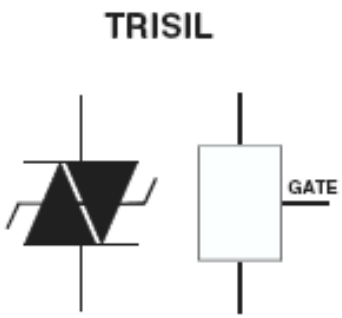


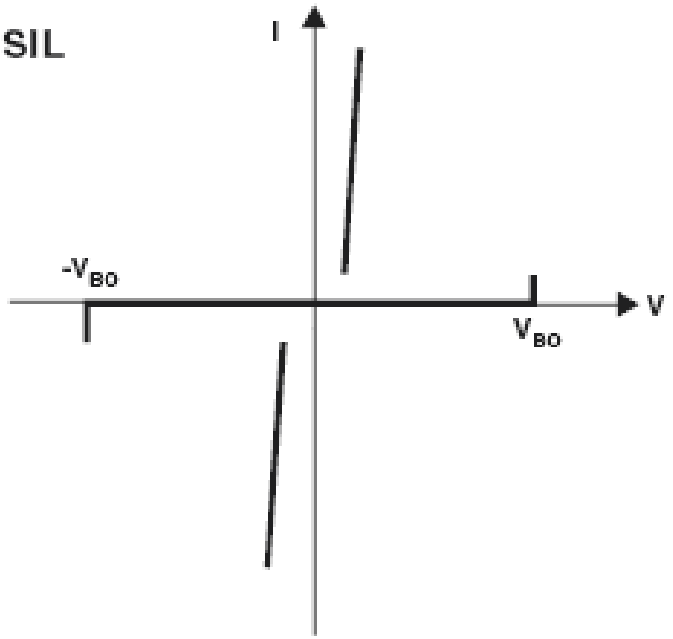




Trisil

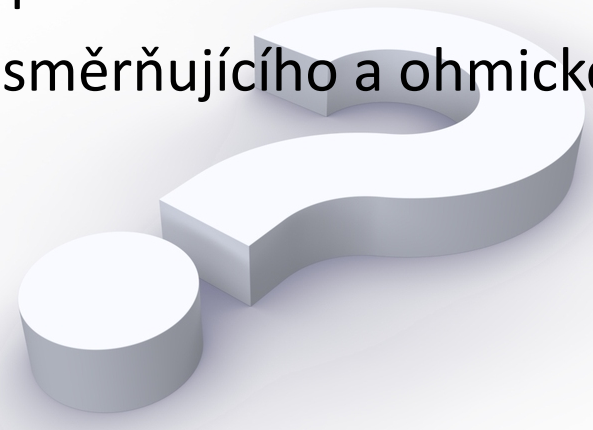
- **ochrana před napěťovými špičkami**
- obousměrný
- **velký klidový odpor**
- **zanedbatelný odpor při přepětí**
- VA charakteristika podobná triaku
- vypnutí – pokles proudu pod určitou hodnotu
- nelze nahradit triakem → zničení





Kontrolní otázky

- Co je varikap?
- Vysvětlete princip usměrňující diody?
- Nakreslete a vysvětlete jednocestný a dvoucestný usměrňovač.
- Jaké existují průrazy diod?
- Vysvětlete princip Zenerovy diody.
- Vysvětlete princip lavinového průrazu.
- Co je ohmický a usměrňující kontakt kov-polovodič?
- Jaký je rozdíl mezi V-A charakteristikou usměrňujícího a ohmického kontaktu?
- Vysvětlete funkci transilu.
- Vysvětlete funkci trisilu.



Použitá literatura

- Musil, V.: **Elektronické součástky.** VUT Brno, 2005, ISBN 80-214-2627-6
- Vaníček, F.: **Elektronické součástky: principy, vlastnosti, modely.** ČVUT Praha, 2004, ISBN 80-01-03112-8
- Jerhot, J.: **Elektronické součástky a zesilovače.** VŠSE Plzeň, 1979
- FOIT, J.; HUDEC, L.: **Základy elektroniky.** ČVUT v Praze, 2009, ISBN 978-80-01-04236-6
- Vobecký, J.; Záhlava, V.: **Elektronika : součástky a obvody, principy a příklady.** Grada Publishing, 2005, ISBN 80-247-1241-5
- Sze, S.M.; Kwok, K.Ng.: **Physics of semiconductor devices.** Wiley-Interscience, 2007, ISBN 978-0-471-14323-9
- Kasap, S.O.: **Principles of electronic materials and devices.** McGraw-Hill, 2006, ISBN 0-07-124458-1
- Schroder, D.K.: **Semiconductor material and device characterization.** John Wiley & Sons, 2006, ISBN 0-471-73906-5