# ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

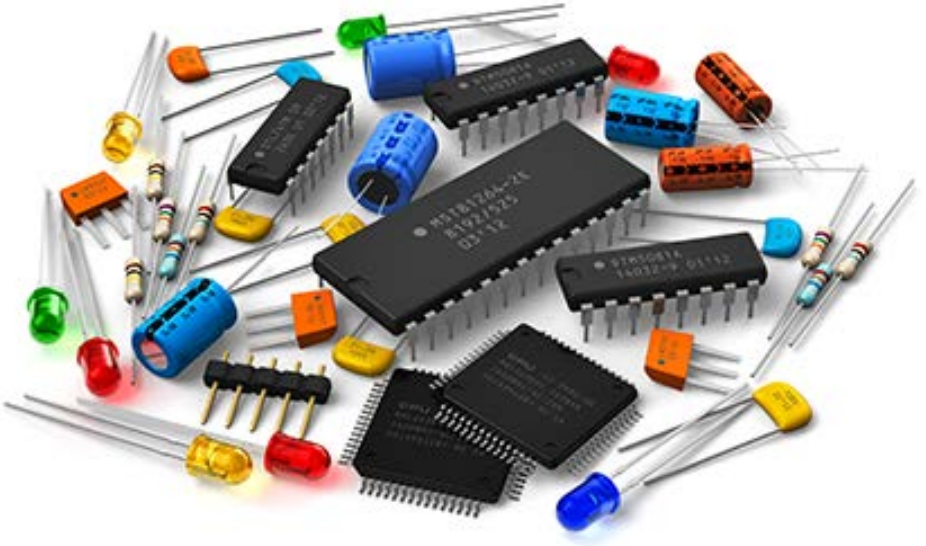
**reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239**

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

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Fyzikální elektronika

KET/FYE



# Fyzika polovodičů 2

## Přednáška 3

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

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

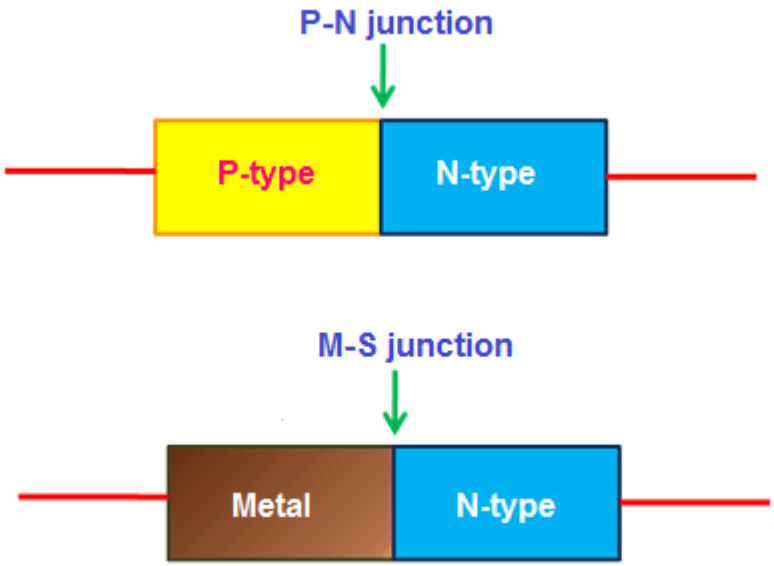
# Co se v přednášce dozvíte?

- Dozvíte se, co je homogenní a heterogenní PN přechod.
- Zjistíte, jak vznikne PN přechod a jaké jsou jeho důležité parametry.
- Dozvíte se, jak se chová PN přechod po připojení napětí a jak vypadá jeho VA charakteristika.
- Zjistíte, jak Debyeho délka omezuje velikost PN přechodu.
- Zjistíte, co je Shockleyho rovnice.
- Dozvíte se, jestli PN přechod vykazuje nějakou kapacitu a jak závisí na přiloženém napětí.
- Dozvíte se, jak se PN přechod chová v dynamickém režimu a proč je dynamický režim důležitý.

# PN přechod

- **polovodičové přechody – kontaktní jevy**
  - rozhraní mezi různě dotovanými polovodiči
  - rozhraní mezi různými polovodiči
  - rozhraní mezi polovodičem a jiným materiálem

- **vznik přechodu na rozhraní mezi polovodičem typu P a N**
  - homogenní přechod
  - heterogenní přechod



## Homogenní přechod

- **přechody uvnitř stejnorodých materiálů (Si, Ge)**
- **vytvořeny různou dotací stejného materiálu**
- **stejná šířka zakázaného pásu na obou stranách**

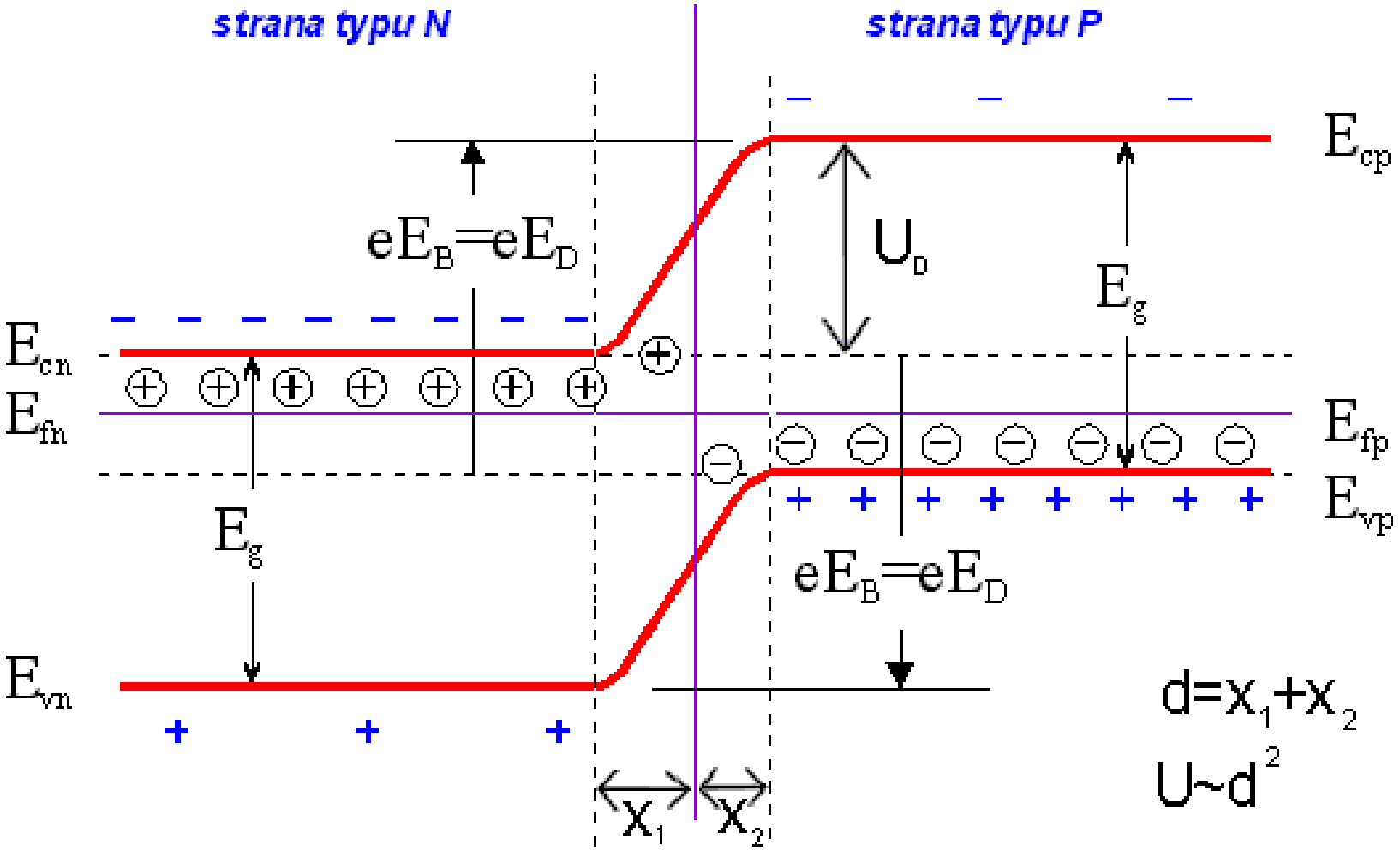
- přechody PN, NP – stejnorodý materiál, různý typ vodivosti
  - souměrné – stejná koncentrace donorů $N_D$ a akceptorů $N_A$
  - nesouměrné – dotace se liší
- přechody $N^+N$, $P^-P$ – stejnorodý materiál stejného typu s různou koncentrací příměsí
- přechody PI, NI, PIN – stejnorodé materiály s nevlastní a vlastní vodivostí

## Heterogenní přechod

- **přechod mezi nestejnorodými materiály s různou krystalovou strukturou**
- **různá šířka zakázaného pásu obou materiálů**
- **přechod mezi nestejnorodými polovodiči – různé kompozity (GaAs, GaP, atd.), různé koncentrace rekombinačních center**
  - malé rozdíly v krystalové struktuře
  - velké rozdíly v krystalové struktuře
- **přechod kov-polovodič** (MS, MP, MN) – **usměrňující i neusměrňující vlastnosti** závisející na výstupní práci obou materiálů
- **přechod kov-izolant** (MIS) – odlišné vlastnosti, základ pro unipolární tranzistor

# Vznik PN přechodu

- zjednodušené předpoklady
  - struktura PN přechodu je rovnoměrná – koncentrace příměsí se mění jen v ose x a y, zanedbání okrajových efektů
  - metalurgický přechod leží v x=0 – plocha s rovností koncentrací příměsí
  - přechod je strmý s homogenně dotovanou P a N oblastí
  - kontakty jsou dokonale ohmické, dostatečně vzdálené od metalurgického přechodu – bez vlivu na PN přechod


strana typu N
strana typu P
$E_{cn}$
$E_{fn}$
$E_{vn}$
$E_{cp}$
$E_{fp}$
$E_{vp}$
$eE_B = eE_D$
$U_D$
$E_g$
$E_g$
$eE_B = eE_D$
$x_1$
$x_2$
$d = x_1 + x_2$
$U \sim d^2$

- **rovnovážný stav (U=0 V)**
- **spojení dvou matriálů s různou koncentrací nosičů**
  - gradient vyvolá difuzní proud
  - přechod děr v oblasti styku do polovodiče typu N → N nabito kladně
  - přechod elektronů v oblasti styku do polovodiče typu P → P nabito záporně
  - porušení nábojové neutrality (vznik gradientu) → driftový proud
- **rekombinace volných nosičů v oblasti přechodu**
- **vznik dynamické rovnováhy**

$$\vec{J} = \vec{J}_n = \vec{J}_p = 0$$

$$\vec{J}_n = \vec{J}_{n,dr} + \vec{J}_{n,dif} = e\mu_n n\vec{E} + eD_n \nabla n = 0$$

$$\vec{J}_p = \vec{J}_{p,dr} + \vec{J}_{p,dif} = e\mu_p n\vec{E} - eD_p \nabla p = 0$$

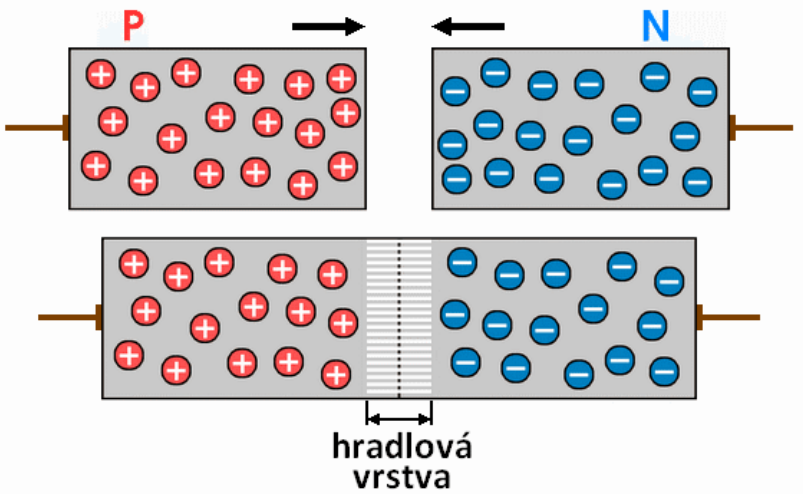
- **elektrické pole brání přechodu majoritních nosičů →** proud majoritních nosičů závislý na výšce potenciálové bariéry
- difuzní síly brání přechodu minoritních nosičů **→ proud minoritních nosičů nezávisí na výšce potenciálové bariéry**
- kolik nosičů přejde na jednu stranu, pak stejný počet opačných nosičů přejde na stranu druhou
- **termodynamická rovnováha –** Fermiho hladina vždy konstantní, ostatní hladiny se přizpůsobují
- konstantní Fermiho hladina → **vznik potenciálové bariéry o výšce difuzního potenciálu - difuzní napětí**

$$E_F = konst. \qquad U_D = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{N_D N_A}{n_i^2}\right)$$

# Prostorový náboj

- **v oblasti přechodu PN malá koncentrace volných nosičů**
- **vznik vyčerpané (ochuzené, vyprázdněné, depletiční) vrstvy → oblast prostorového náboje (d), hradlová vrstva**
- vyčerpaná oblast – pouze menšinové nosiče
- vyčerpaná oblast
  - zasahuje do N – $x_1$
  - zasahuje do P – $x_2$
- oblasti P a N - vysoká koncentrace volných nosičů → kvazineutrální oblast

$$x_1 N_D = x_2 N_A$$



# Debyeho délka

- **vyčerpaná oblast – d**

$$d = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_r}{e}\frac{N_A + N_D}{N_A N_D}U_D}$$

- jednostranný přechod (např. $N_D >> N_A$)

$$d = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_r}{e}\frac{U_D}{N_D}}$$

- **Debyeho délka – souvislost s vyčerpanou oblastí**
- **omezení integrace –** elektrody nelze umístit přímo na PN přechod nebo do vyčerpané oblasti

$$d \approx L_D = \frac{1}{e}\sqrt{\frac{\varepsilon_0\varepsilon_r kT}{n+p}}$$

# PN přechod s přiloženým vnějším napětím

- **nenulové napětí na PN přechodu**
  - zanedbání úbytku v kvazineutrálních oblastech
  - napětí mezi hranicemi vyčerpané oblasti

- **snížení potenciálové bariéry** – propustný směr - $U_F$
- **zvýšení potenciálové bariéry** – závěrný (zpětný) směr – $U_R$

- potenciálový rozdíl ve vyčerpané oblasti dán rozdílem difuzního $U_D$ a vnějšího napětí U
- **šířka vyčerpané oblasti souvisí s velikostí přiloženého napětí**

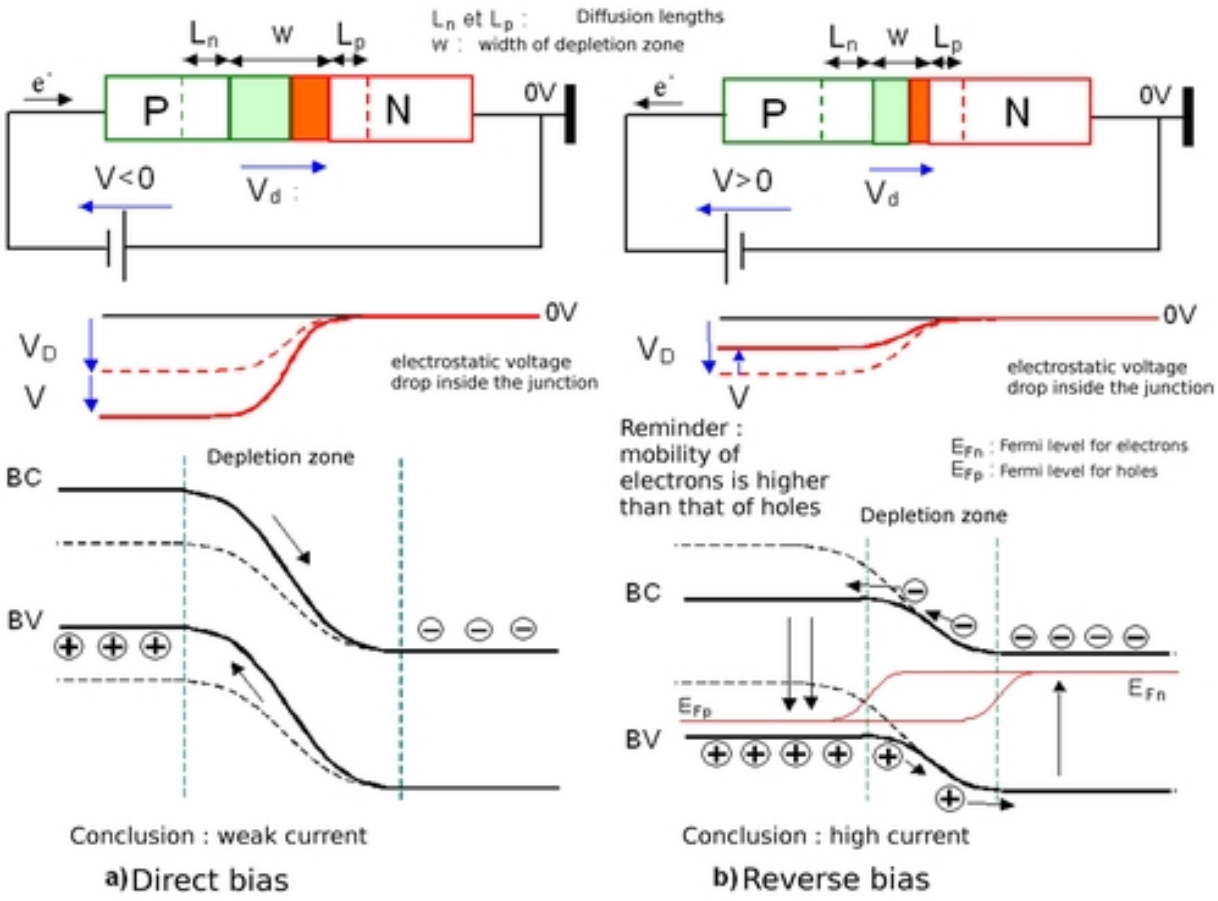
$$d = \sqrt{\left[\frac{2\varepsilon}{q}\left(U_D - U\right)\frac{N_A + N_D}{N_A N_D}\right]}$$

## Závěrné napětí

- zvýšení potenciálové bariéry, rozšíření vyčerpané oblasti, zvýšení el. pole ve vyčerpané oblasti

## Kladné napětí

- snížení potenciálové bariéry, zúžení vyčerpané oblasti, snížení el. pole ve vyčerpané oblasti

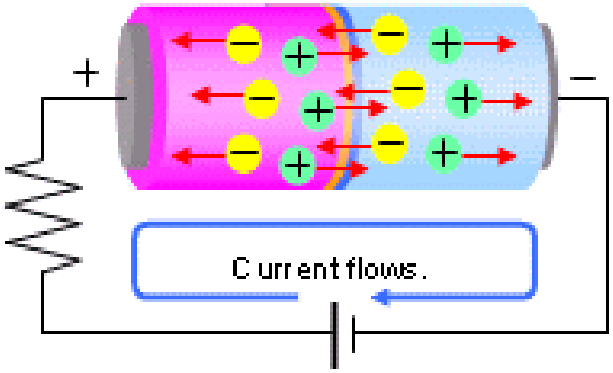


- PN přechod není v termodynamické rovnováze
- **změna výšky potenciálové bariéry ovlivní velikost proudu majoritních nosičů**
- **změna výšky potenciálové bariéry neovlivní velikost proudu minoritních nosičů – konstantní proud**

**Princip činnosti:** https://www.youtube.com/watch?v=Hk1E7G-nuKM

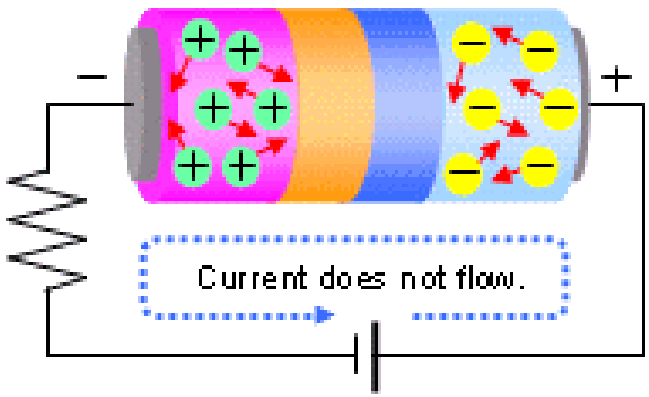
## Propustný směr PN přechodu

- **snížení potenciálové bariéry - $U_D$**
- **oblast P – kladné napětí, oblast N – záporné napětí**
- energie majoritních nosičů > výška potenciálové bariéry
- zvětšení difuzního proudu majoritních nosičů
- malý driftový proud minoritních nosičů
- majoritní nosiče vstřikovány do kvazineutrálních oblastí – zvýšení koncentrace minoritních nosičů
- **zvýšení difuzního proudu se snížením vyčerpané oblasti**
- **propustný proud- exponenciální závislost na přiloženém napětí**



## Závěrný směr PN přechodu

- **zvýšení potenciálové bariéry**
- **oblast P – záporné napětí, oblast N – kladné napětí**
- zvýšení potenciálové bariéry – snížení majoritních nosičů se schopností překonat bariéru → snížení difuzního proudu
- stejný driftový proud minoritních nosičů – nezávisí na potenciálové bariéře
- malý proud – opačný směr
- **velikost proudu dána množstvím tepelně generovaných minoritních nosičů – nezávislé přiloženém napětí**
- konstantní proud v rozsahu desítek V



# VA charakteristika PN přechodu

## Shockleyho rovnice

- **vyjadřuje celkový proud PN přechodem**
- $L_n$, $L_p$ – střední difúzní délka minoritních nosičů – průměrná dráha minoritních nosičů s dobou života τ difundující do P nebo N než zaniknou rekombinací

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} \qquad L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$$

- $U_T$ – teplotní napětí
- $I_0$ ($I_S$) – saturační proud

$$U_T = \frac{kT}{q} \rightarrow 25mV \qquad pro \;\; 300K$$

$$I_0 = qS\left(\frac{D_n}{L_n N_A} + \frac{D_p}{L_p N_D}\right) n_i^2$$

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

## Saturační proud

- **roste s plochou přechodu**
- klesá s koncentrací $N_A$, $N_D$
- **roste s teplotou T**
- klesá se šířkou zakázaného pásu
- klesá se zvětšující se dobou života minoritních nosičů $\tau_n$, $\tau_p$

- pro Si → $I_S = 10^{-12} – 10^{-8}$ A
- pro Ge → $I_S = 10^{-5} – 10^{-3}$ A

$$I_0 = qS\left(\frac{D_n}{L_n N_A} + \frac{D_p}{L_p N_D}\right) n_i^2$$

## Vazební energie

- **závěrný směr**

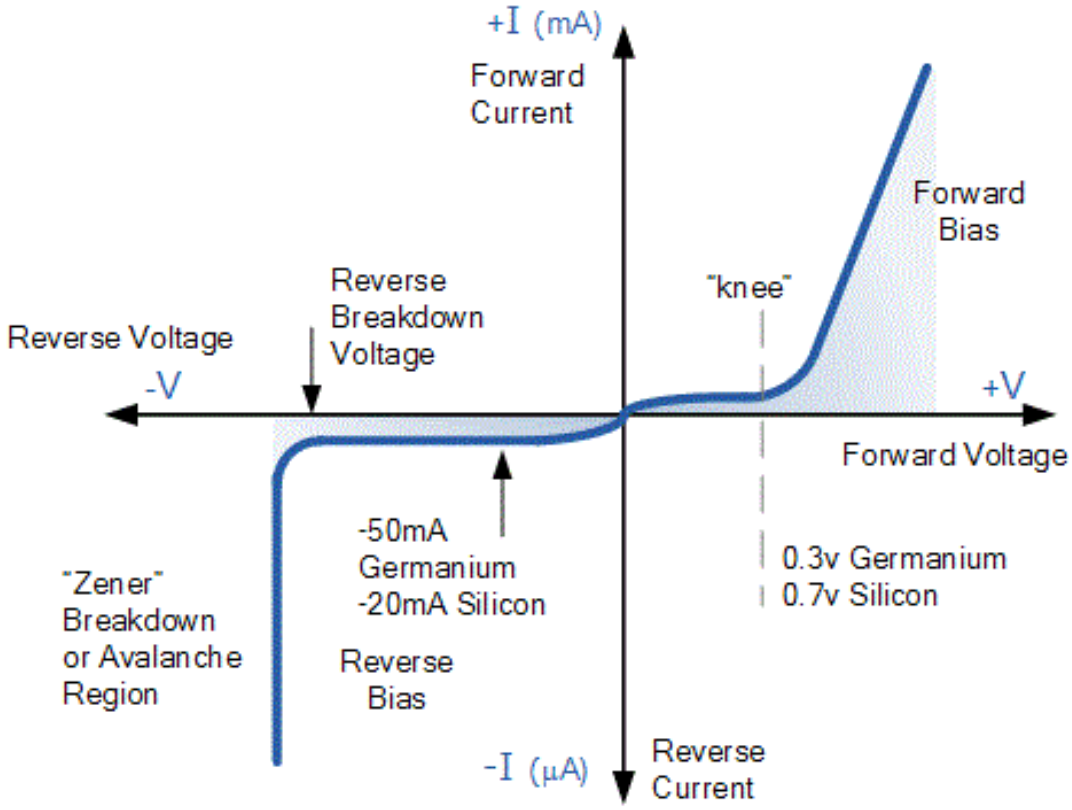
$$U << \frac{kT}{q} \rightarrow e^{\frac{qU}{kT}} << 1$$

$$I \approx I_0$$

- **propustný směr**

$$U >> \frac{kT}{q} \rightarrow e^{\frac{qU}{kT}} >> 1$$

$$I \approx I_0 \left( e^{\frac{qU}{kT}} \right)$$



# Kapacita PN přechodu

## Bariérová kapacita $C_j$

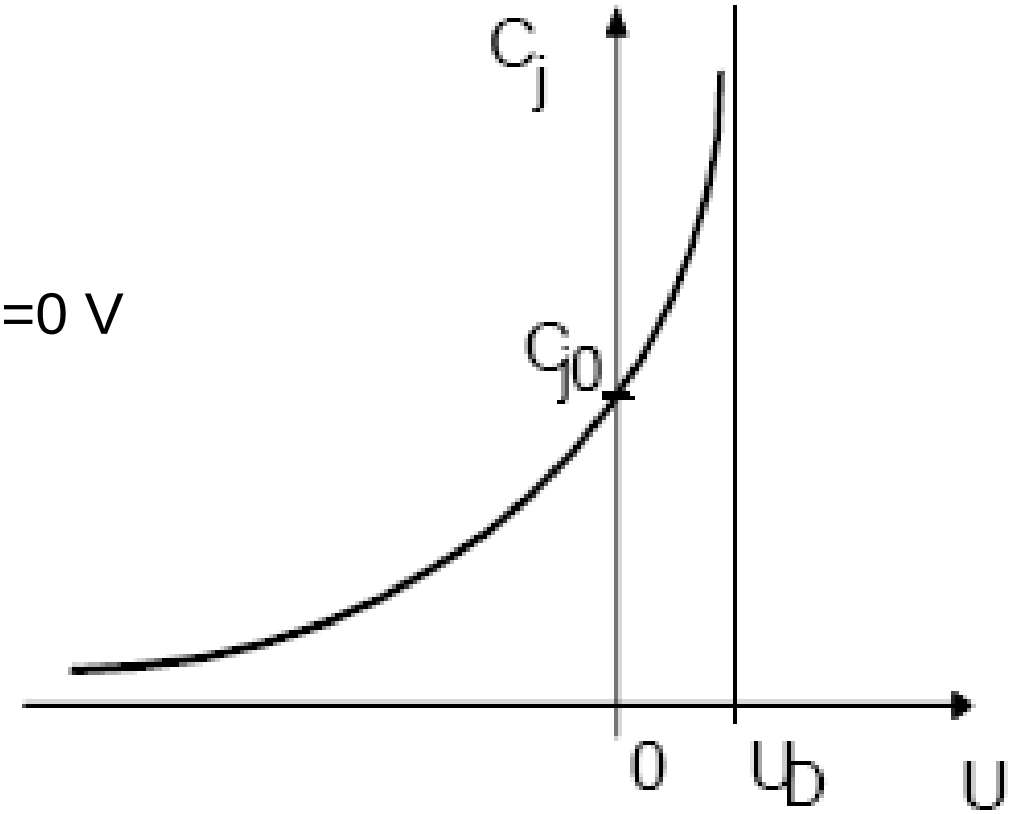
- **vytvořena prostorovým nábojem ve vyčerpané oblasti**
- závislost na
  - ploše přechodu S
  - koncentracích $N_A$ a $N_D$
  - na velikosti přiloženého napětí ~ $U^{-1/2}$

$$Q = qSx_1N_D = qSx_2N_A \qquad d = \sqrt{\left[\frac{2\varepsilon}{q}(U_D - U)\frac{N_A + N_D}{N_AN_D}\right]}$$

$$C_j = \frac{dQ}{dU} = \varepsilon_0\varepsilon_r\frac{S}{d}$$

# Bariérová kapacita

$C_{j0}$ – kapacita pro U=0 V




$$C_j = \varepsilon_0 \varepsilon_r S \sqrt{\left[ \frac{q}{2\varepsilon_0 \varepsilon_r} \frac{1}{(U_D - U)} \frac{N_A N_D}{(N_A + N_D)} \right]} = \frac{C_{j0}}{\sqrt{1 - \frac{U}{U_D}}}$$

## Difuzní kapacita $C_D$

- **vytvořena akumulací náboje vlivem průchodu proudu**
- **převažuje v propustném směru**

$$Q = I\tau_p = qSL_p p_n e^{\frac{qU}{kT}} \qquad C_D = \frac{q^2}{kT} SL_p p_n e^{\frac{qU}{kT}} = \frac{q}{kT} I\tau_p$$

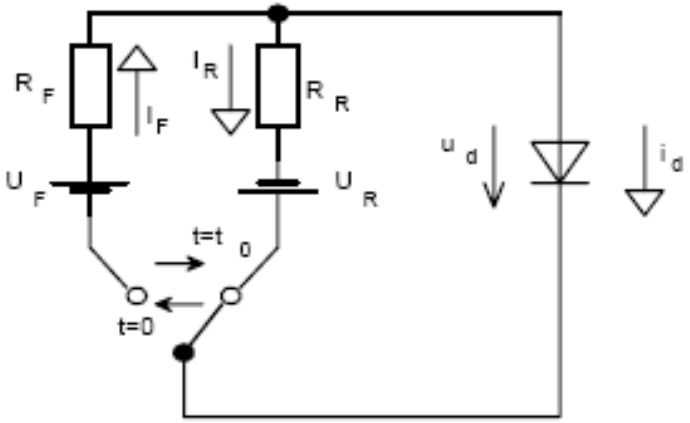
$$C_D = \frac{dQ}{dU}$$

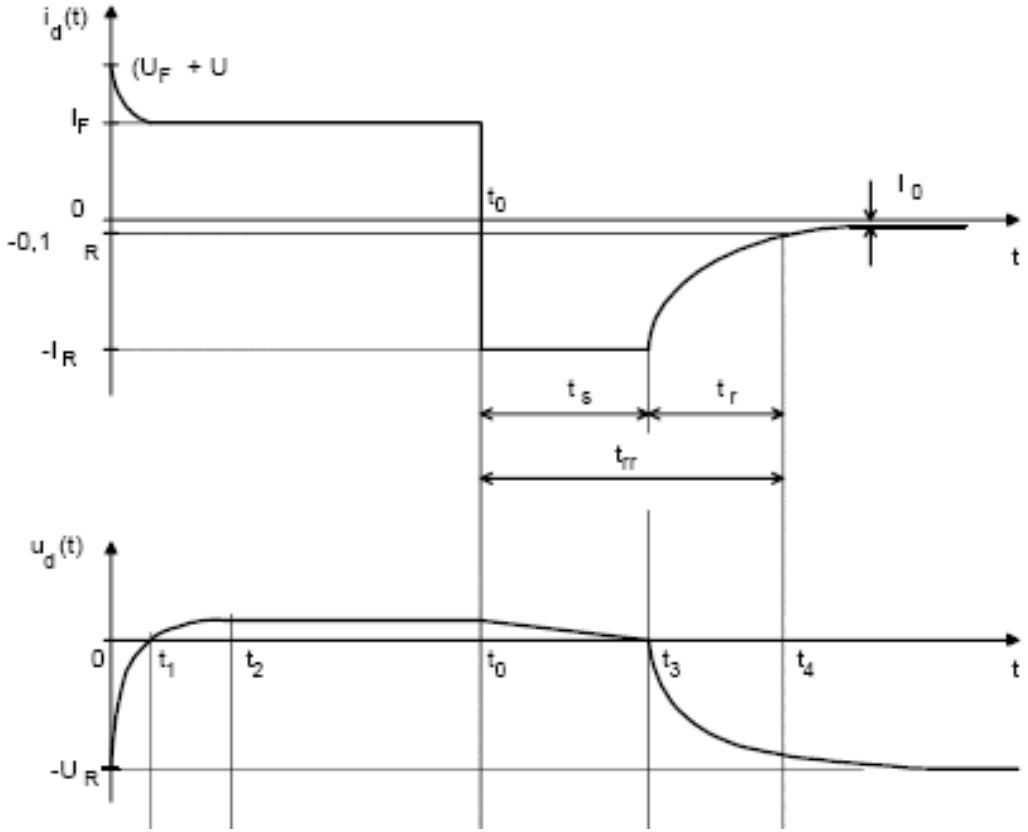
celková kapacita PN přechodu:

$$C = C_j + C_D$$

# Dynamický režim PN přechodu

- **rychlý přechod z propustného stavu do nepropustného a naopak**
- Shockleyho rovnice platná jen pro pomalé změny napětí a proudu
- **rychlé změny ovlivněny přechodovými jevy – difúzní a bariérová kapacita**




$t_S$ – doba zpoždění (akumulace)

$t_r$ – doba poklesu (doběhu)

**$t_{rr} = t_s + t_r$ – doba zotavení**

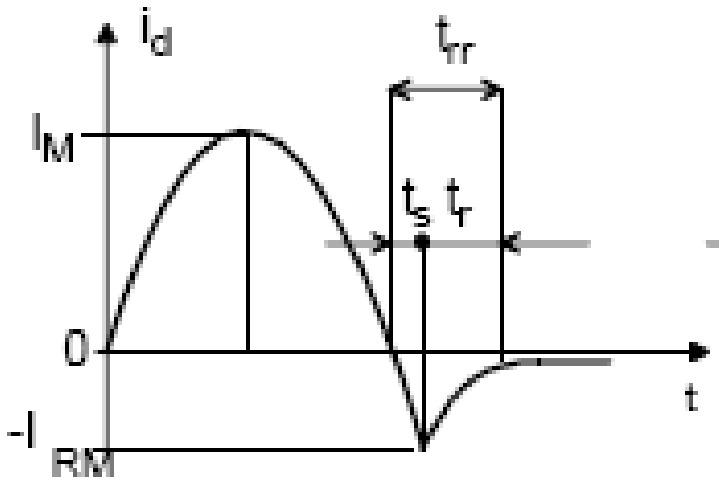
## Doba zotavení

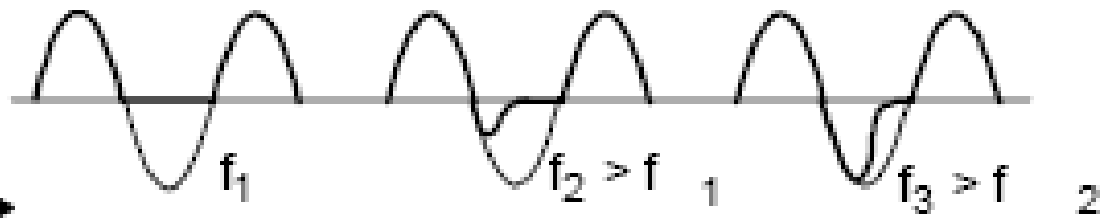
- **přímo úměrná době života τ minoritních nosičů**
- **přímo úměrná velikosti proudu $I_F$**
- **nepřímo úměrná velikosti proudu $I_R$**

- skoková změna proudu – není v reálném obvodu
- rychlost změny proudu limitována indukčností obvodu – lineární pokles proudu

## PN přechod při sinusovém napětí

- **nízký kmitočet**
  - ustálená koncentrace nosičů
  - proud sleduje napětí
  - záporná půlperioda – pouze saturační proud
- **vysoký kmitočet**
  - neustálená hodnota nosičů
  - zotavovací proces – překmity proudu v závěrném směru
  - **PN přechod vodivý i v závěrném směru - neusměrňuje**



# Kontrolní otázky

- Popište princip vzniku PN přechodu.
- Co je prostorový náboj?
- Co je Debyeho délka?
- Popište chování PN přechodu v propustném a závěrném směru.
- Napište matematický vztah pro výpočet proudu v PN přechodu.
- Vysvětlete VA charakteristiku PN přechodu.
- Čím je určena kapacita PN přechodu a na čem závisí?
- Co je doba zotavení PN přechodu?



# 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