ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

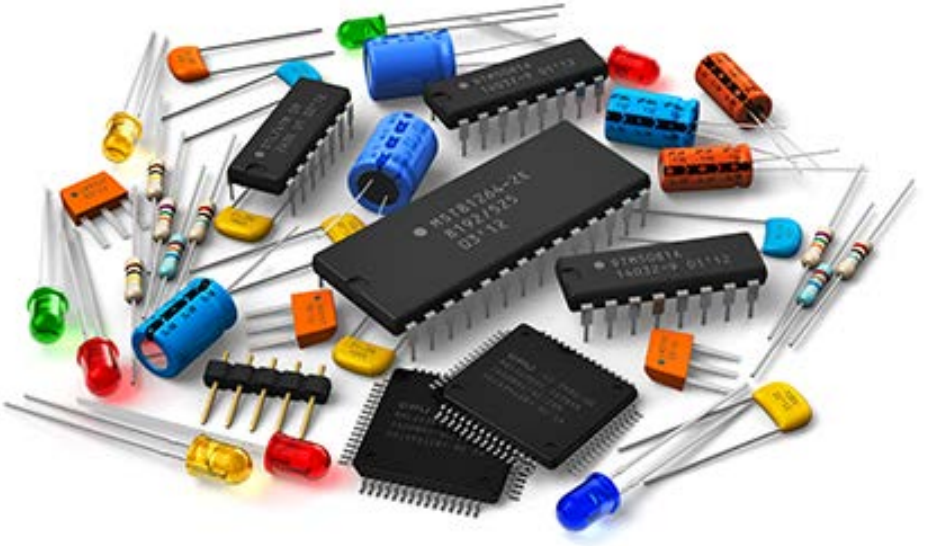
reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239

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

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Fyzikální elektronika

KET/FYE



Fyzika polovodičů 1

Přednáška 2

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

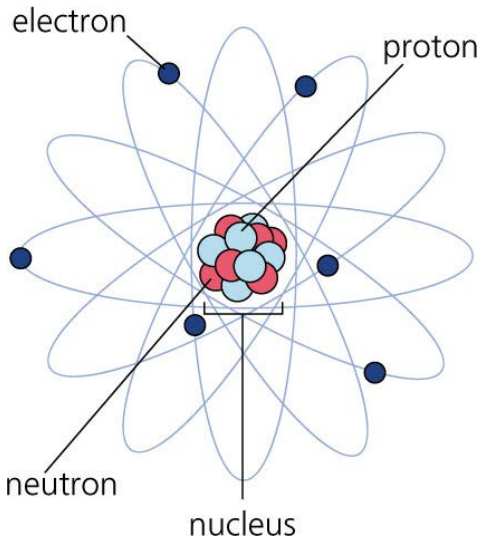
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Co se v přednášce dozvíte?

- Dozvíte se, jak vypadá model atomu a co je vazební energie.
- Zjistíte, co je pásový model pevných látek.
- Dozvíte se, jaký je rozdíl mezi jednoduchými a sloučeninovými polovodiči.
- Zjistíte, co je vlastní a nevlastní polovodič.
- Zjistíte, jaké proudy protékají polovodiči.
- Dozvíte se, co je pohyblivost nosičů, generace a rekombinace.
- Zjistíte, jaká je teplotní závislost polovodičů.
- Dozvíte se princip Hallova jevu.

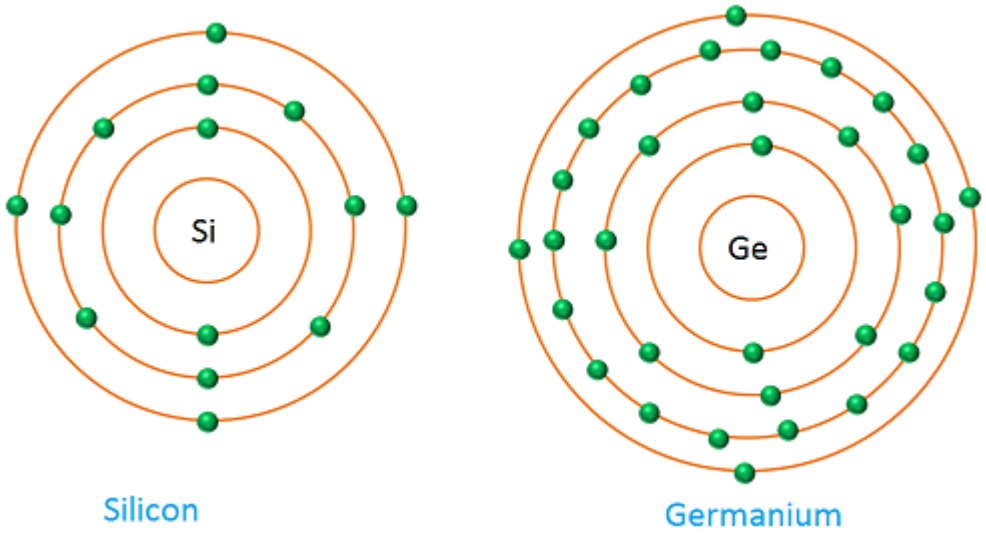
Model atomu

- Niels Bohr – 1913
- **jádro** – neutrony a protony
- **elektrony** – vazební a volné
- elektrony krouží kolem jádra na určitých drahách (kvantové dráhy, orbity)
- konstantní energie při oběhu elektronu na kvantové dráze
- **absorpce nebo emise energie** - přechod elektronu z jednoho orbitu na druhý



Vazební energie

- **eV (elektronvolt) – energie (1 eV = 1,6.10-19 J)**
- **záporná vazební energie**
- E=0 v nekonečnu, volný elektron
- energie omezena na určité hodnoty
- **přechod mezi orbity** – změna energie (světlo, teplo ΔE = hf)



vnitřní elektronů – silná vazební energie
4 valenční elektrony – účastní se chem. reakcí

$$E = -\frac{m_0 Q^4}{2(4\pi\varepsilon_0 hn)^2}$$

m_0 – hmotnost elektronu

Q – náboj

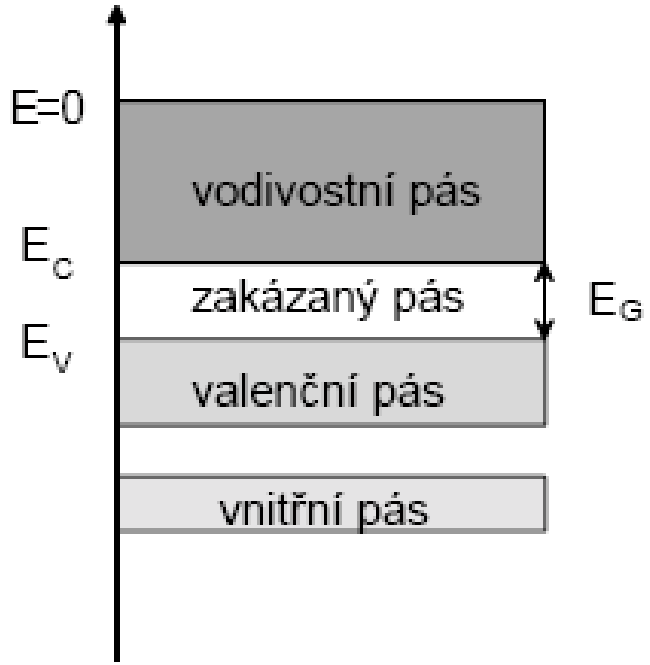
ε_0 – permitivita vakua

h – Planckova konstanta

n – hlavní kvantové číslo

Pásový model pevných látek

- **4 základní typy pásů**
  - **vnitřní** – pro elektrony pevně vázané k jádrům
  - **valenční** – elektrony vytvářející chemickou vazbu
  - **zakázaný** – nelze měnit, materiálová konstanta
  - **vodivostní** – elektrony uvolněné z chemické vazby, možnost pohybu v meziatomovém prostoru, způsobují vodivost, nejvyšší energetický pás

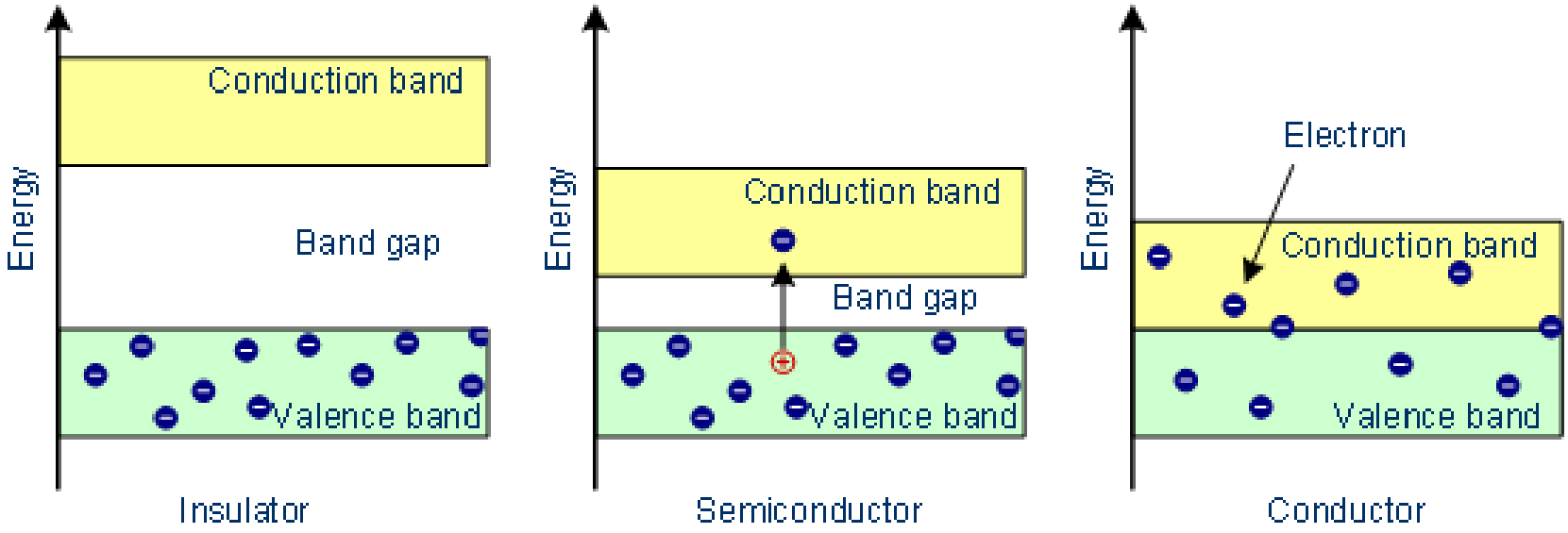


E_c – vodivostní pás (conductivity)

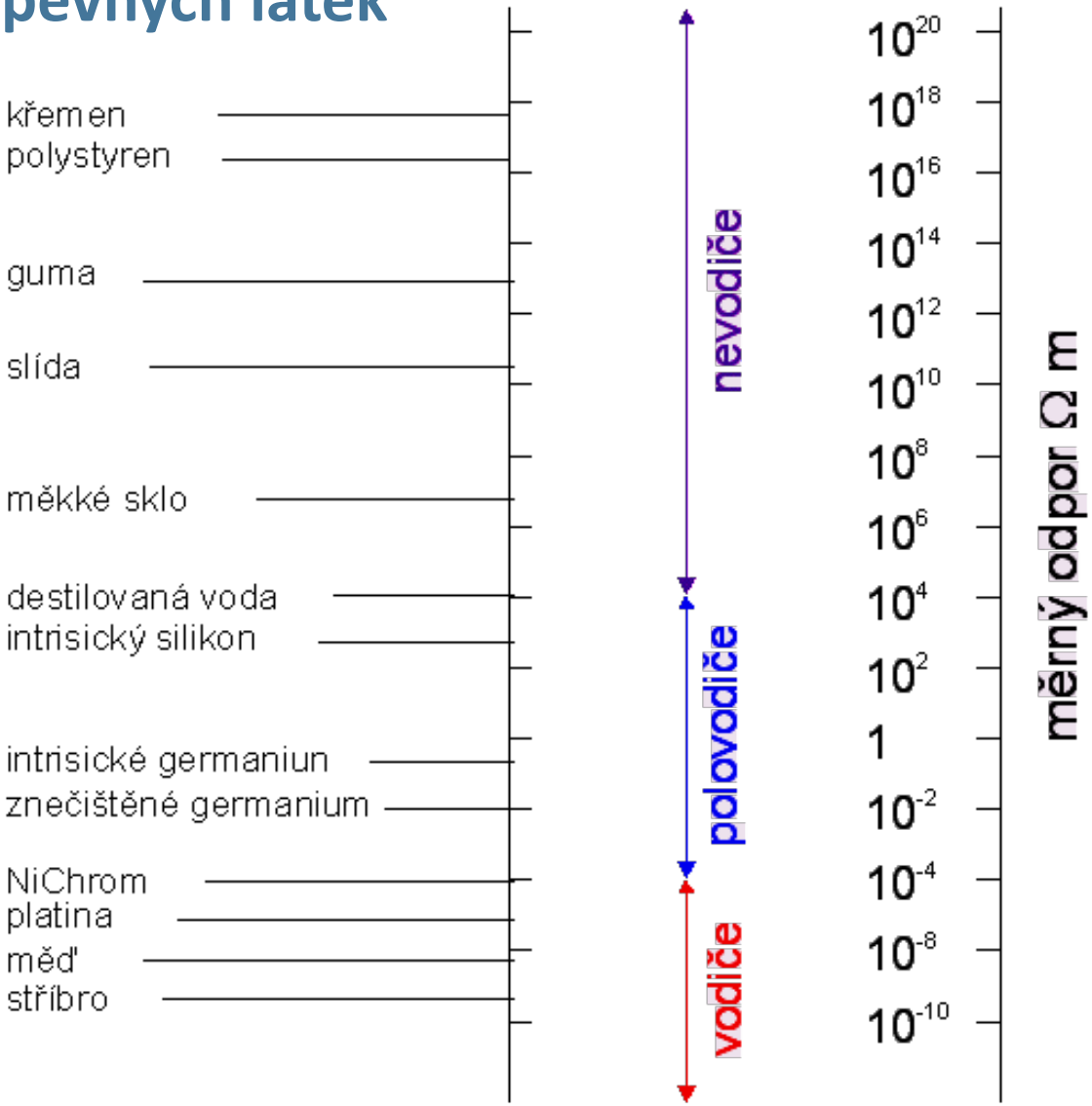
E_v – valenční pás (valence)

E_g – zakázaný pás (gap)

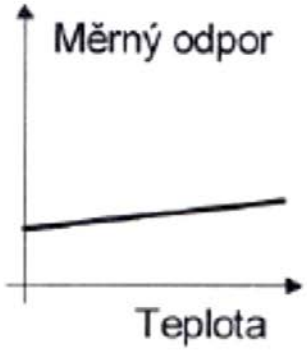
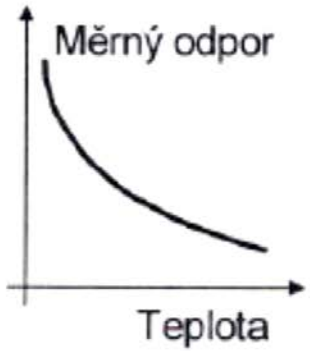
- elektrické vlastnosti určeny šířkou zakázaného pásu
- šířka zakázaného pásu závislá na meziatomové vzdálenosti atomů v krystalu
- **izolant** – $E_g > 3$ eV, valenční pás zaplněn elektrony
- **polovodiče** - $E_g = 0{,}1 – 3$ eV, pro 0 K žádné volné elektronů, uvolnění elektronů s vyšší teplotou – zvýšení vodivosti
- **vodiče** - $E_g < 0{,}1$ eV, volné elektrony ve vod. pásu



Vodivost pevných látek



Vliv teploty a osvětlenosti na měrný odpor

VLASTNOST	VODIČ	POLOVODIČ
Teplotní závislost měrného odporu		
Světelná závislost měrného odporu		

Jednoduché polovodiče

- prvky 4. skupiny Mendělejovy tabulky
- **kovalentní vazba – sdílené elektrony**
- **křemík (Si)** – 4 valenční elektrony, E_g=1,12 eV
- **germanium (Ge)** – 4 valenční elektrony, E_g=0,66 eV



Křemík (Si)



Germánium (Ge)

Sloučeninové polovodiče

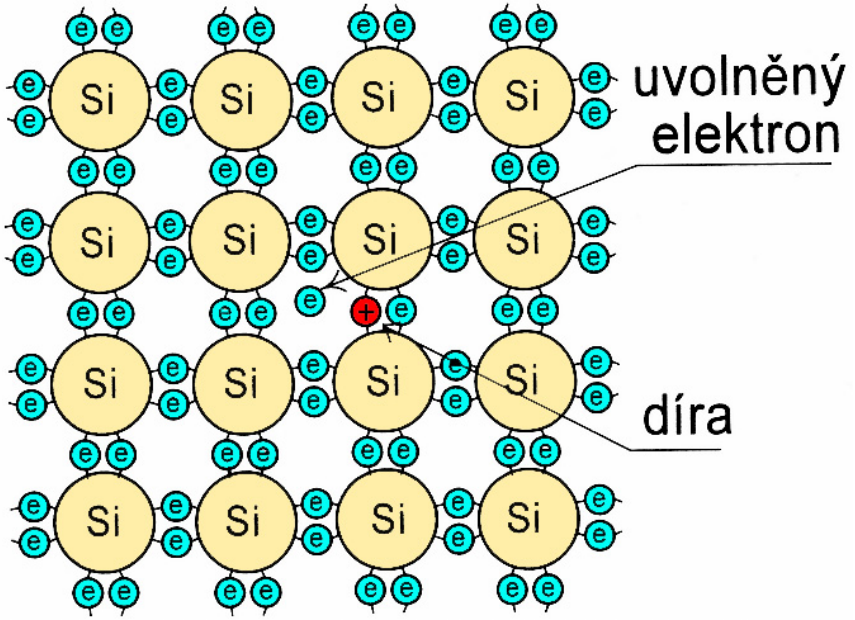
- A^{III} a A^{V} skupina – GaAs, GaP, GaN, InP, InSb, AlN
- B^{II} a A^{VI} skupina – CdS, CdSe, CdTe, ZnS, ZnSe, ZnTe
- A^{IV} a A^{VI} skupina – PbO, PbO2
- trojné sloučeniny – $GaAs_xP_{1-x}$

Vlastní polovodiče

- **polovodiče s vlastní vodivostí** – intrinsická vodivost
- polovodič – pevná látka s měrným odporem 10^{-2} – 10^{6} Ω.m
- 2 typy nosičů proudu
- **krystal bez poruch a příměsí** – pouze atomy základní mřížky (pro 0 K se podobá izolantu)
- ionizační (aktivační) energie – odpovídá Eg, nutná k uvolnění elektronu
- zdroj energie - tepelné kmity krystalové mřížky, energie fotonu při osvětlení (Ef > Eg), energie od jiného elektronu (Ee > Eg)

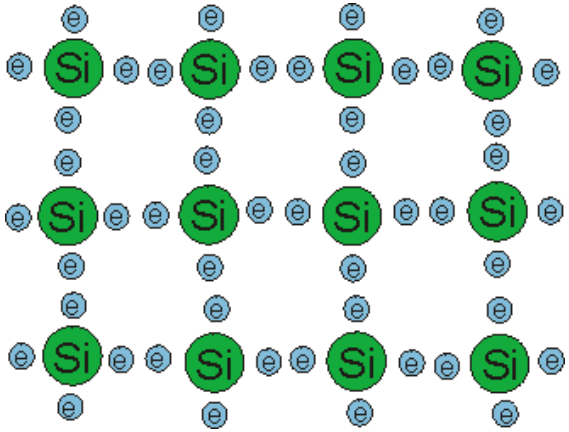
Nosiče náboje

- **elektrony** – zanechávají volnou vazbu
- **díry** – fiktivní nosič el. proudu, kladný náboj
- ke každému uvolněnému elektronu (-Q) vznik díry (+Q)
- **přeskakování elektronů ve vazbách** – změna náboje u atomu
- **nedochází ke změně celkového náboje**
- dokonalý vlastní polovodič téměř neexistuje



Koncentrace nosičů náboje

- **n – koncentrace elektronů**
- energie elektronů ve vodivostním pásu - E>Ec
- **p – koncentrace děr**
- energie elektronů ve vodivostním pásu - E<Ev
- **ni – intrinzická koncentrace nosičů**
- **koncentrace silně závislá na teplotě**



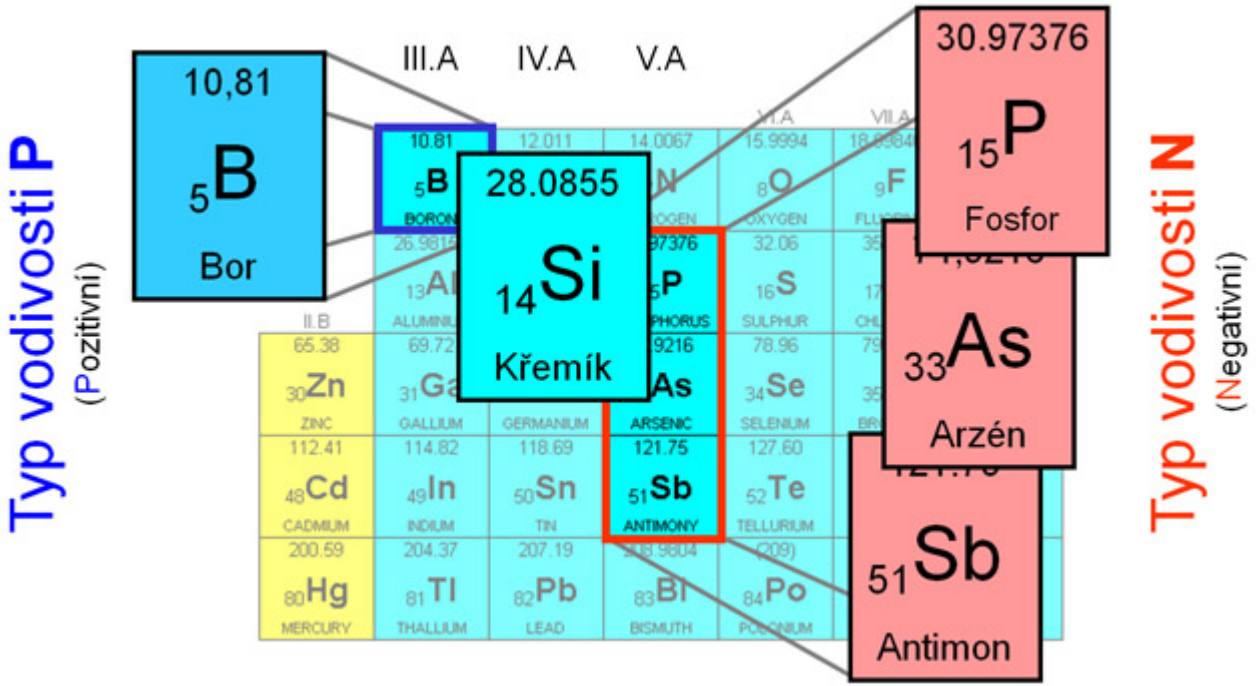
$$n = p = n_i$$

$$Ge \ldots n_i = 10^{19}\, m^{-3} = 10^{13}\, cm^{-3} \qquad T = 300K$$

$$Si \ldots n_i = 10^{16}\, m^{-3} = 10^{10}\, cm^{-3}$$

Nevlastní polovodiče

- vlastní polovodiče - omezené použití (fotoodpor, čidla)
- **nevlastní polovodiče** - použití ve většině elektronických součástek
- **záměrně upravená vodivost (dotování)** – nevlastní vodivost
  - během výroby
  - při vytváření struktur
- **typ N**
- **typ P**



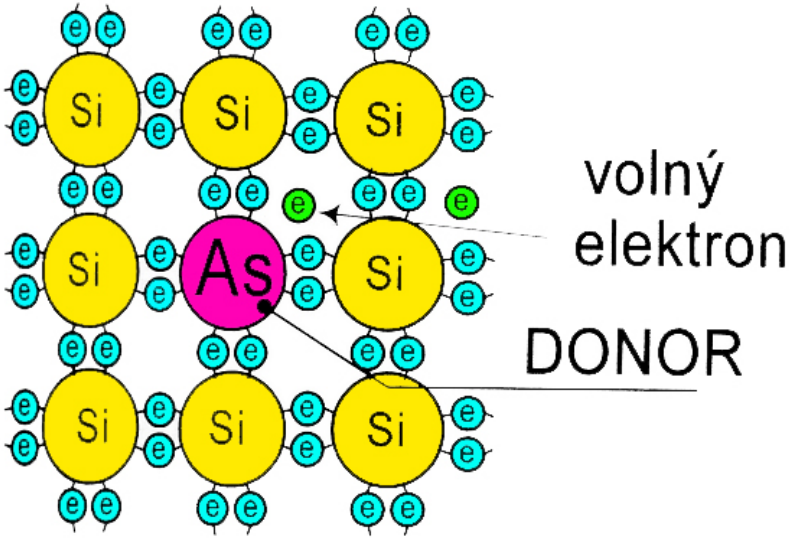
Typ N

- **donory – As, P, Sb (V. skupina)**
- **volný elektron**
- na 100 000 Si postačuje 1 As
- **majoritní nosiče – elektrony**
- **minoritní nosiče – díry**
- N_D – koncentrace donorů
- **elektron příměsi slabě vázán**
- koncentrace děr velmi malá

$$n > p$$

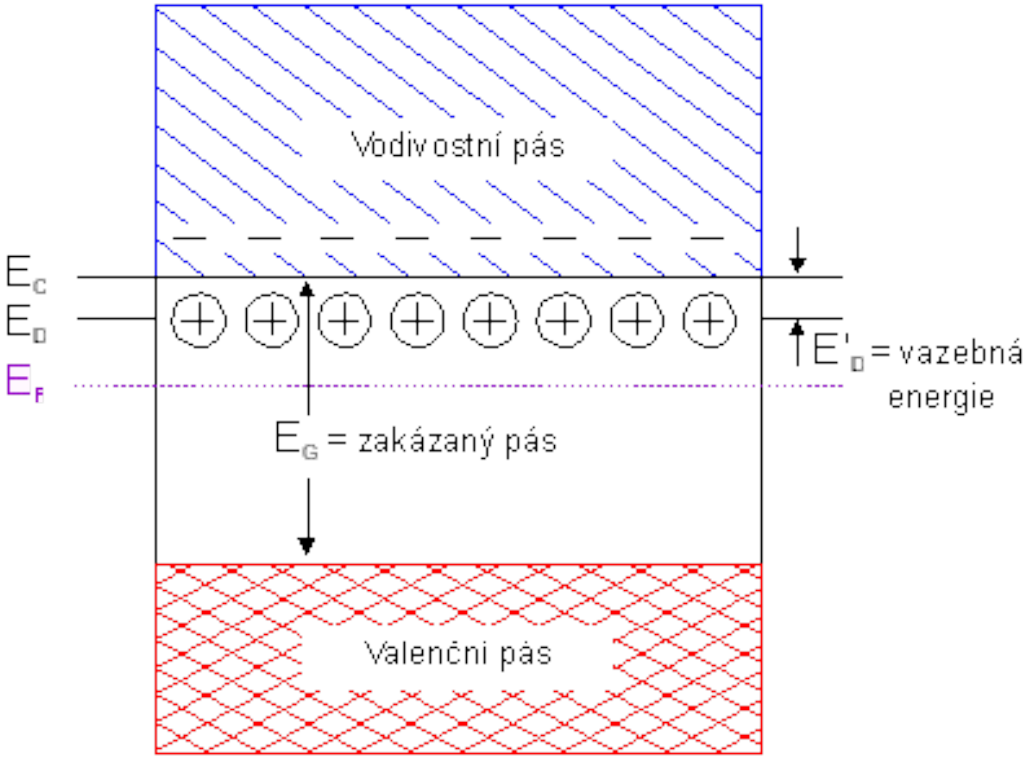
$$n = p + N_D^+$$

$$n \cong N_D^+$$



Typ N – pásový model

- elektrony vázané kovalentní vazbou
- **volné elektrony donorových příměsí**
- ionizace donorové hladiny – vznik kladně nabitého iontu N_D^+
- E_F - Fermiho hladina
- E_D – donorová hladina
- **aktivační energie – 0,05 eV**



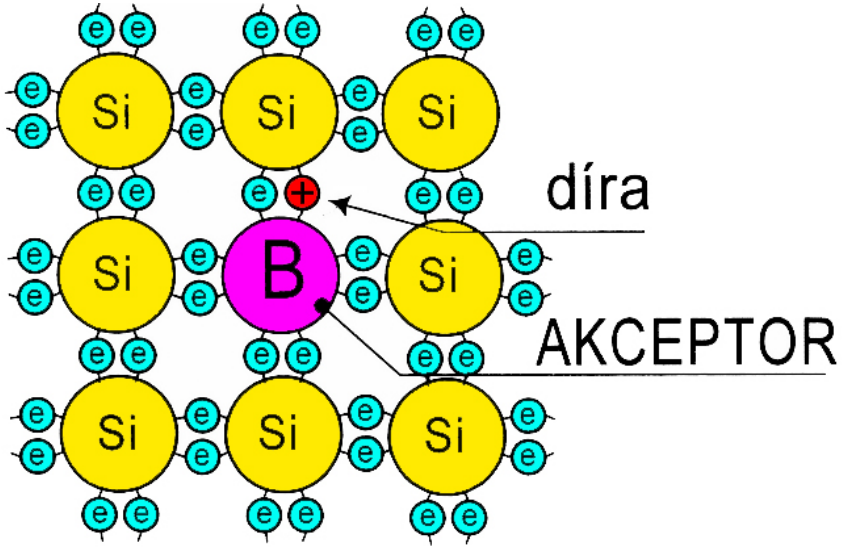
Typ P

- **akceptory – B, In, Ga, Al (III. skupina)**
- **volná díra**
- **majoritní nosiče – díry**
- **minoritní nosiče – elektrony**
- N_A – koncentrace akceptorů
- chybějící elektron (díra) vázán velice slabě
- koncentrace elektronů velmi malá

$$p > n$$

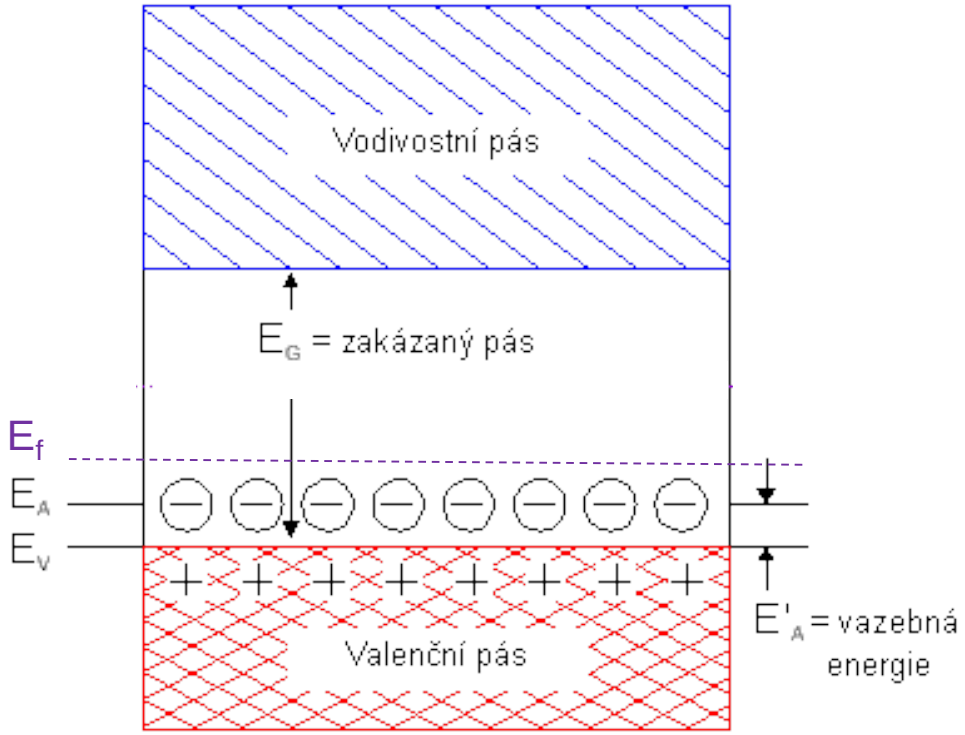
$$p = n + N_A^-$$

$$p \cong N_A^-$$



Typ P – pásový model

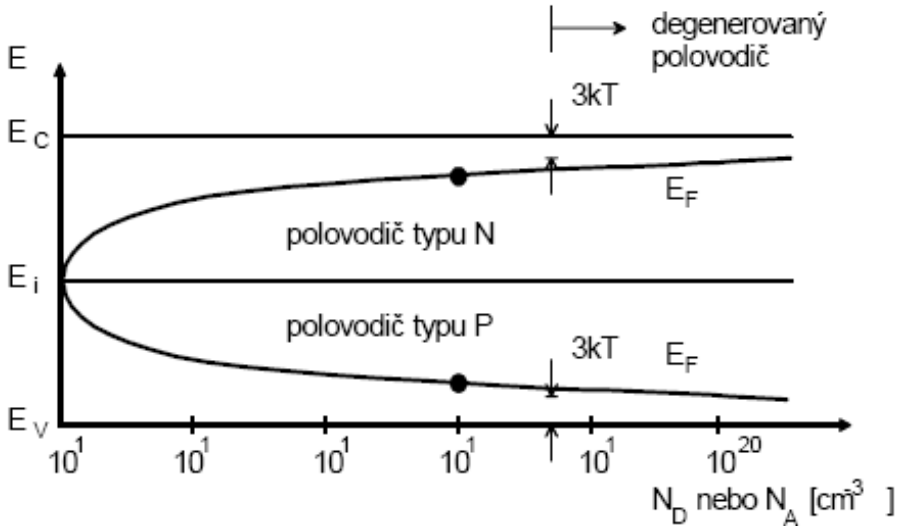
- elektrony vázané kovalentní vazbou
- volné elektrony akceptorových příměsí
- přeskok z jedné volné vazby do druhé – vznik záporně nabitého iontu N_A^-
- E_F - Fermiho hladina
- E_A – akceptorová hladina
- **aktivační energie – 0,05 eV**

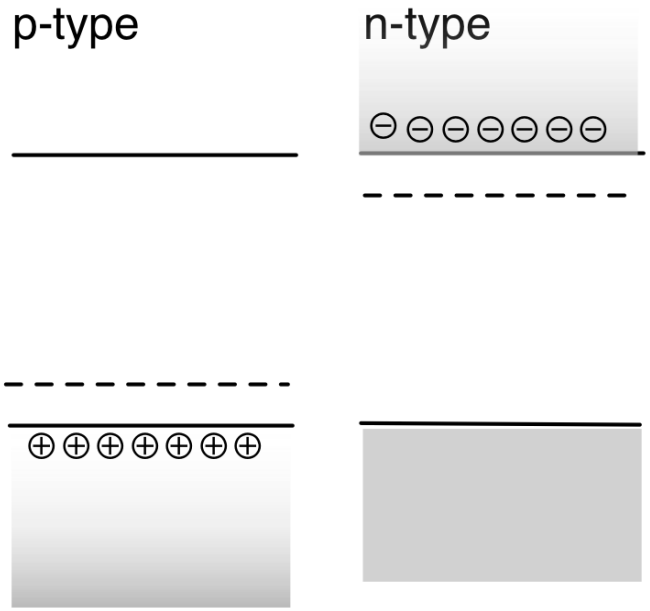


Fermiho hladina (energie)

- pro T=0 K - oddělení obsazených stavů od neobsazených
- pro T> 0 K - hladina s pravděpodobností obsazení 0,5
- závislost polohy Fermiho hladiny na koncentraci nosičů
- vliv teploty na polohu Fermiho hladiny

$$n = n_i e^{\frac{E_F - E_i}{kT}} \qquad p = n_i e^{\frac{E_i - E_F}{kT}}$$





Teplotní závislost koncentrace nosičů

- **nevlastní polovodič – vlastní i nevlastní vodivost**
- tepelná rovnováha
- koncentrace volných nosičů závislá na koncentraci donorů, akceptorů, teplotě a pásové struktuře
- **pro T=0 K → n=0, p=0**
- **první aktivační teplota (T=100 K)** → aktivace příměsí
- **druhá aktivační teplota (T= 450 K)** – aktivace vlastních nosičů, vznik vlastního polovodiče
- **T=100-450 K – normální pracovní režim, koncentrace rovná koncentraci donorů, malá teplotní závislost**
-

$$np = n_i^2 = konst.$$

Pohyblivost nosičů

- **míra schopnosti pohybu nosičů v polovodiči**
- **úměrná elektrickému poli a rychlosti pohybu nosičů**
- skalární veličina
- **pohyblivost elektronů a děr – závislá na koncentraci příměsí** (větší koncentrace → menší pohyblivost)
- **rozptylové mechanismy** – faktory působící na elektrony, odchýlení od přímočarého pohybu
- rozptylové mechanismy – **columbovské síly, kmity atomů v mřížce**
- malá teplotní závislost

$$\mu \ldots \left[m^2 / Vs \right]$$

$$\vec{v} = \mu \vec{E}$$

$$\mu_n > \mu_p$$

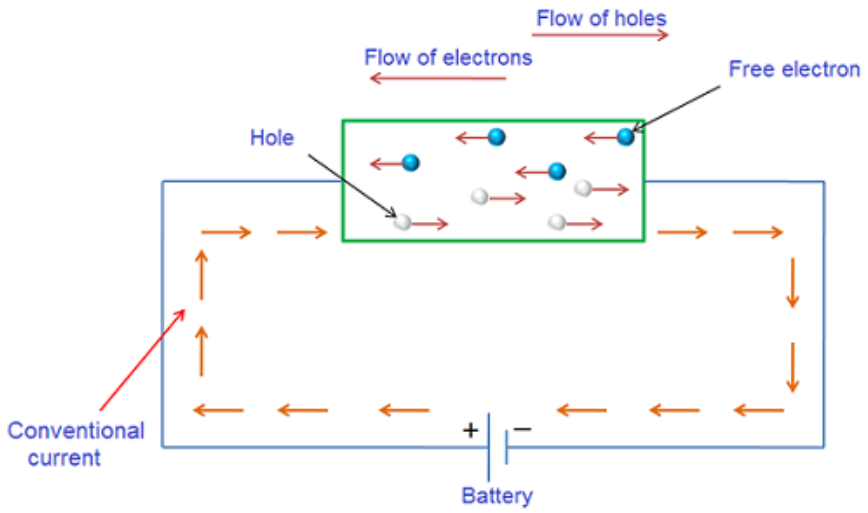
Princip činnosti: https://www.youtube.com/watch?v=zgOG8YwEjNg

Proudy v polovodičích

Driftový proud

- **pohyb nabité částice způsoben elektrickým polem**
- Ohmův zákon ve vektorovém tvaru
- elektronová složka proudu
- děrová složka proudu
- **nabitá částice – příčina pohybu, přenos náboje**

$$\vec{v} = \mu\vec{E} \qquad \vec{j}_{dr} = \sigma\vec{E} \qquad I = \frac{Q}{t} = envS \rightarrow J = \frac{I}{S} = env$$



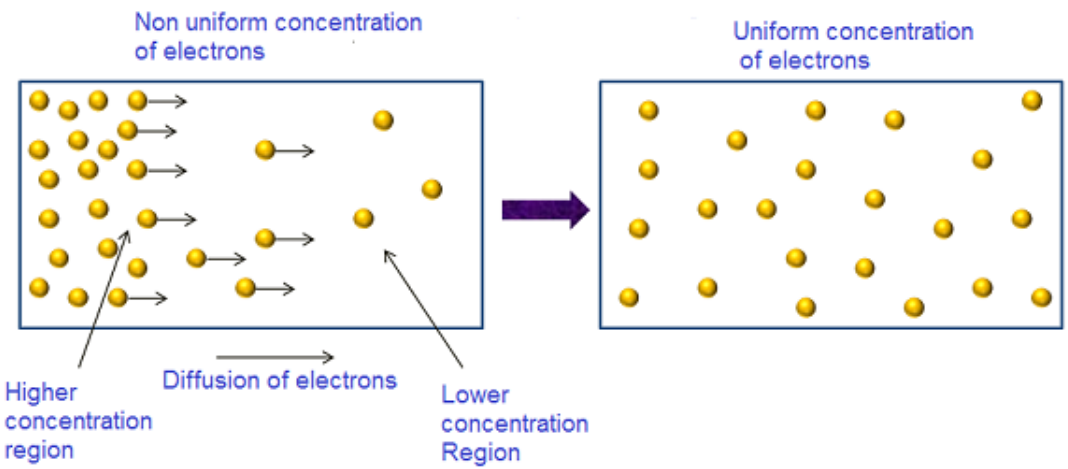
$$\sigma = e\mu_n n + e\mu_p p$$

$$\vec{j}_{dr} = e\mu_n n\vec{E} + e\mu_p p\vec{E} = \vec{j}_n + \vec{j}_p$$

Difuzní proud

$$j_{dif} = e\left(D_n \nabla n - D_p \nabla p\right)$$

- **neexistuje v kovech**
- **způsoben prostorově nerovnoměrným rozdělením nosičů (gradient koncentrací)**
- II. termodynamická věta – vyrovnání všech gradientů (max. entropie)
- difuzní pohyb nosičů nezávisí na náboji - nabitá částice je jen nesena
- **pohyb ve směru klesající koncentrace**
- D_n a Dp [m^2/s] – difuzní konstanty



$$D_n = \frac{kT}{e}\mu_n$$

$$D_p = \frac{kT}{e}\mu_p$$

- **elektronová složka proudu**
  - driftová část
  - difuzní část

$$\vec{j}_n = e\left(\mu_n n\vec{E} + D_n \nabla n\right)$$

- **děrová složka proudu**
  - driftová část
  - difuzní část

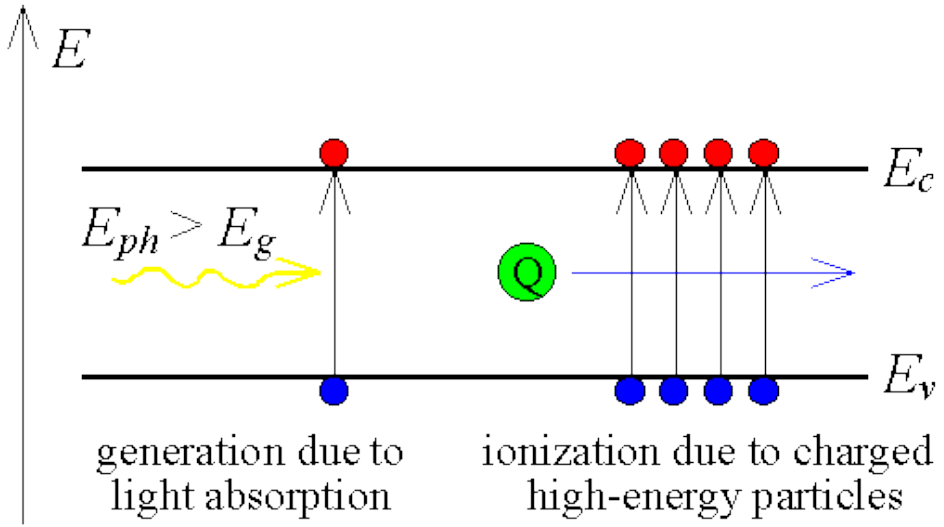
$$\vec{j}_p = e\left(\mu_p p\vec{E} + D_p \nabla p\right)$$

Generace nosičů náboje

- **vytvoření páru elektron-díra**
- při narušení rovnováhy nosičů působením excitačního mechanismu
- **nutné dodání energie – tepelná, světelná, elektrická**
- rovnovážný stav → $n_0 p_0 = n_i^2 = konst.$
- rovnováha porušena vnějšími vlivy
- koncentrace nerovnovážných nosičů Δn, Δp
- injekce nosičů → $np > n_i^2$
- extrakce nosičů → $np < n_i^2$

$$n = n_0 + \Delta n$$

$$p = p_0 + \Delta p$$

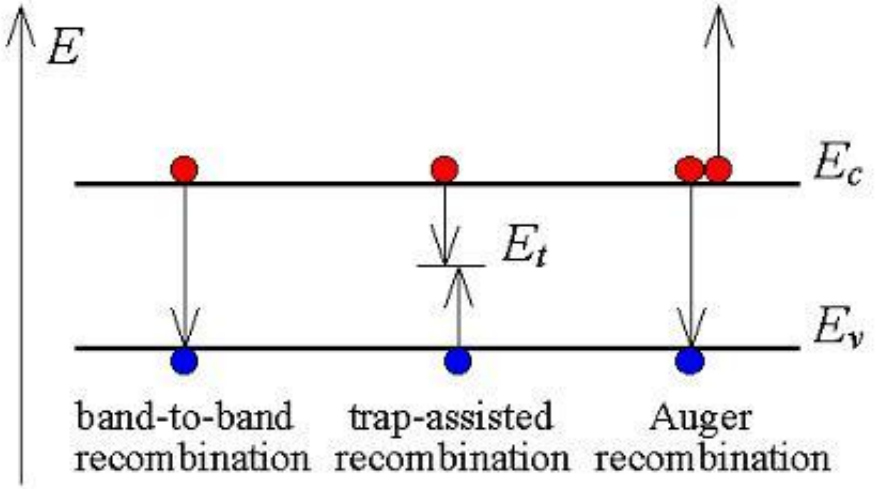


Rekombinace nosičů náboje

- rekombinační proces – **uvedení zpět do rovnovážného stavu** po excitaci nerovnovážných nosičů
- **zánik páru elektron-díra**
- **přechod elektronu na nižší energetickou hladinu – ztráta energie (teplo, světlo)**
- pravděpodobnost rekombinace roste s koncentrací nosičů
- **přímá rekombinace** – přechod elektronu přímo do valenčního pásu
- **nepřímá rekombinace** – přes rekombinační centrum
- **povrchová rekombinace** – nastává u povrchu polovodiče

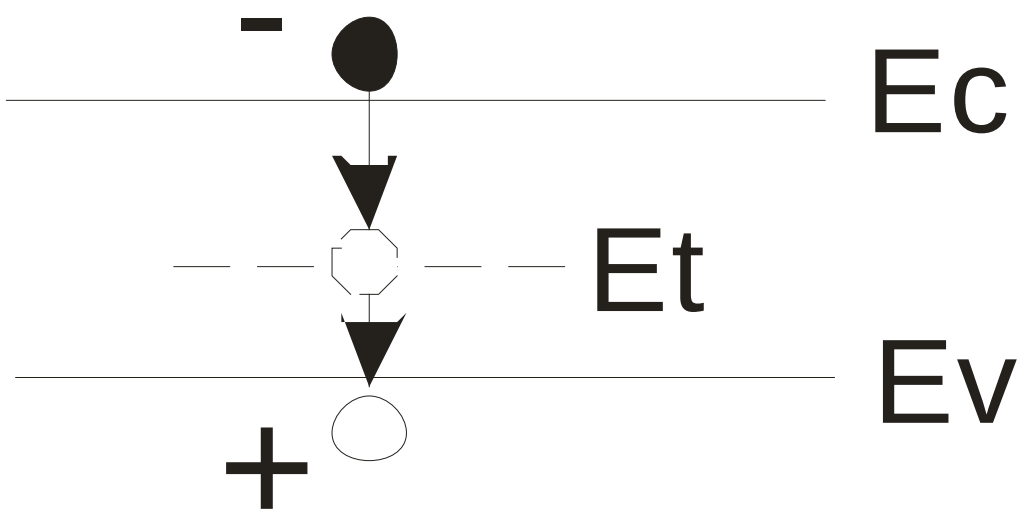
Přímá rekombinace

- **přímé setkání páru elektron-díra**
- málo pravděpodobný jev
- 3 druhy přímé rekombinace
  - **zářivá rekombinace**
  - **nezářivá rekombinace**
  - **Augerova rekombinace** – srážka 3 nosičů, 2 rekombinují, energie předána třetímu



Nepřímá rekombinace

- ne každý pár elektron-díra přímo rekombinují
- platí zákon zachování energie a impulzu
- **rekombinační centrum E_t**– elektron zachycen, čeká na vhodnou díru



Nepřímá rekombinace

- koncentrace rekombinačního centra N_t
- energetická hladina rek. centra E_t
- rekombinační rychlost [$m^{-3}s^{-1}$] – počet rekombinujících nosičů v jednotce objemu a času
- rekombinační doba života nerovnovážných nosičů
- vlastní polovodič → $\tau_n = \tau_p$
- doba života µs - ms

$$\tau_n = \frac{1}{\sigma_n v_t N_t}$$

$$\tau_p = \frac{1}{\sigma_p v_t N_t}$$

τ_n – doba života elektronů v typu P

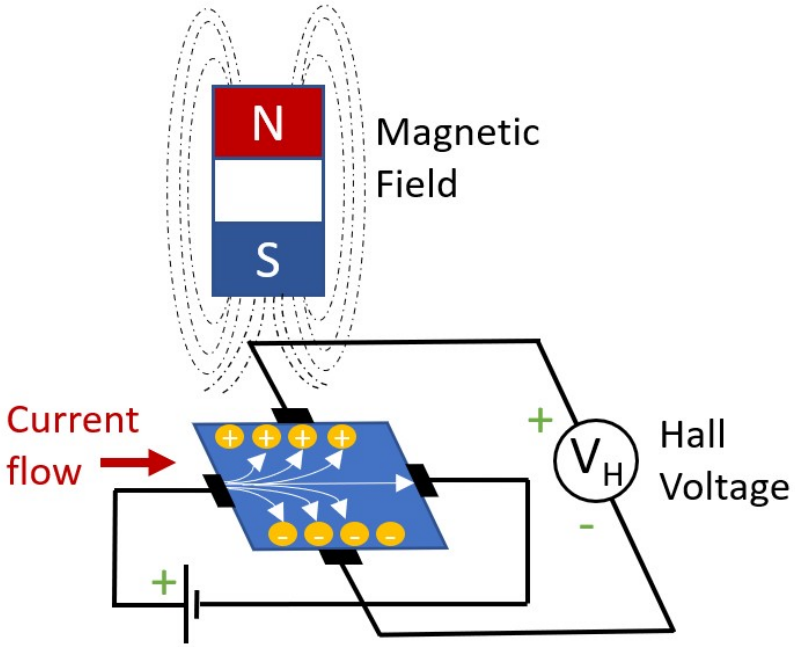
τ_p – doba života elektronů v typu n

v_t – tepelná rychlost

Hallův jev

- Edwin Hall - 1879
- zjištěn na kovech
- **praktická realizace na polovodičích**
- patří mezi galvanomagnetické jevy
- **vzájemná interakce magnetického pole a pohybující se částice**
- **založeno na Lorentzově síle**
- příčinou je B
- InSb – vysoká pohyblivost

$$\vec{F} = e\vec{E} + e\left(\vec{v} \times \vec{B}\right)$$

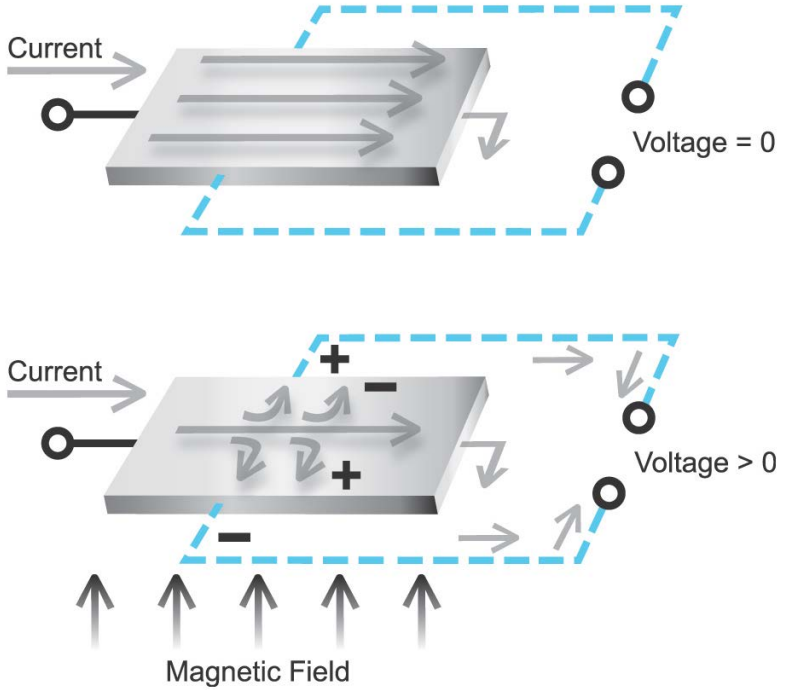


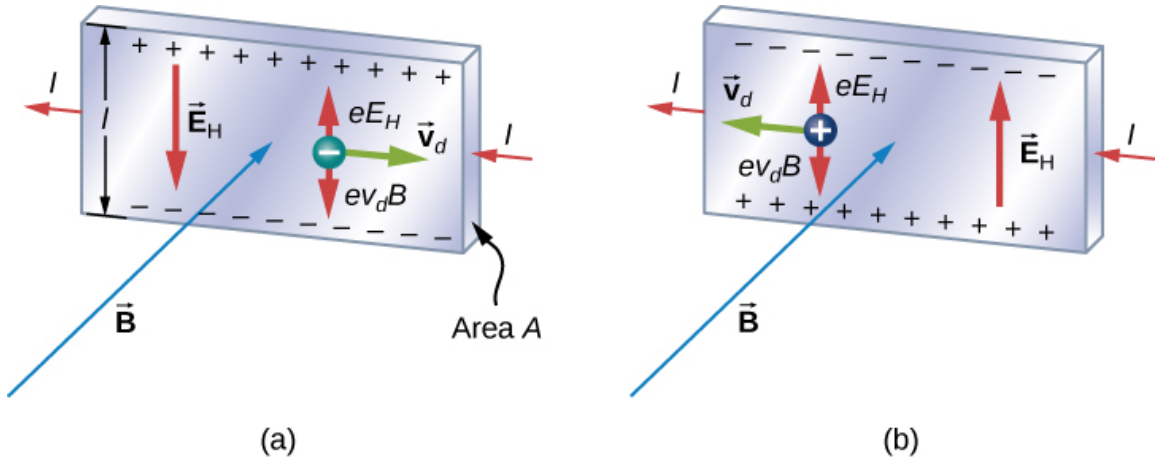
$$\vec{F}_m = e\left(\vec{v} \times \vec{B}\right) \quad \vec{F}_e = e\vec{E}$$

$$\vec{F}_m = \vec{F}_e \qquad \vec{E} = \vec{v} \times \vec{B} \rightarrow E = vB$$

$$I = JS \rightarrow J = env$$

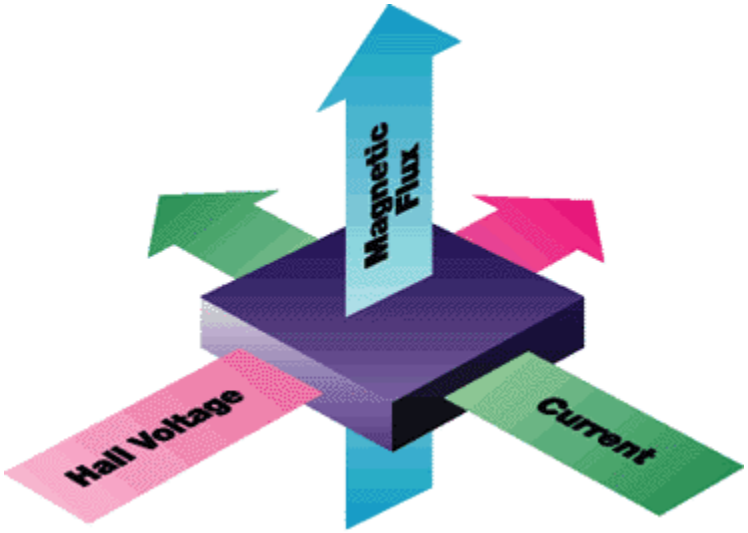
$$E = \frac{U_H}{b} \qquad v = \frac{I}{endb}$$

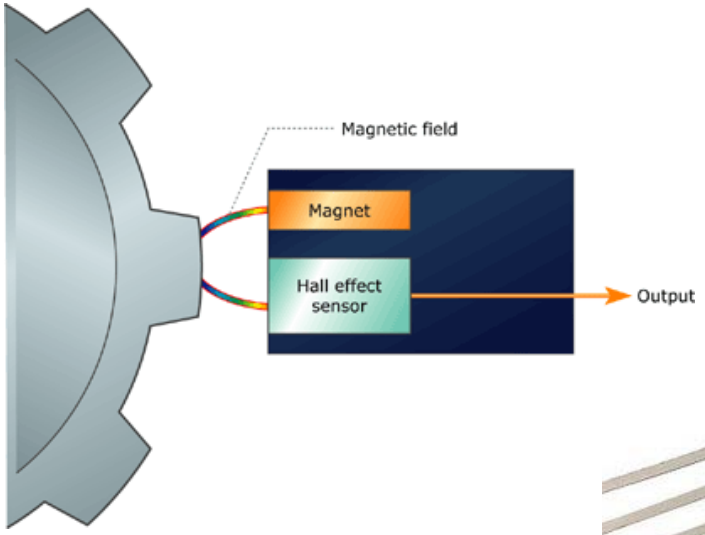




$$U_H = R_H \frac{BI}{d}$$

- podmínka Hallova jevu
  - **v ⊥ B**
  - **n >>p, p>>n**
- R_H - Hallova konstatnta
- r_H – Hallův rozptylový faktor
- **θ – úhel natočení v a B**
- **senzory a snímače (Hallova sonda)**







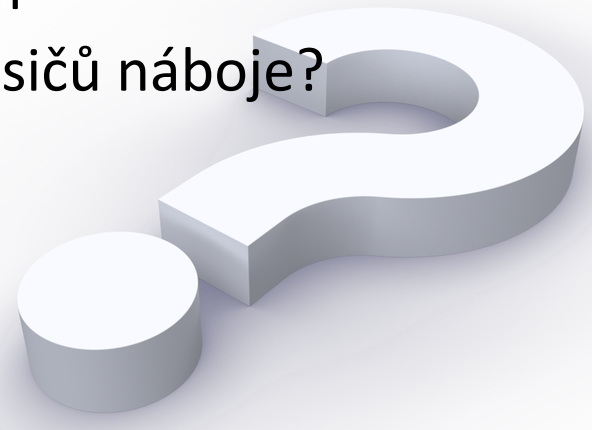
$$R_H = \frac{1}{en} \rightarrow R_H = \frac{r_H}{en}$$

$$U_H = R_H \frac{BI}{d} \sin\theta$$

Princip činnosti: https://www.youtube.com/watch?v=wpAA3qeOYiI

Kontrolní otázky

- Co je vazební energie?
- Vysvětlete pásový model pevných látek.
- Uveďte příklady jednoduchých a sloučeninových polovodičů.
- Definujte vlastní a nevlastní polovodiče.
- Jaký je rozdíl mezi polovodičem typu P a N?
- Co je pohyblivost nosičů?
- Vysvětlete princip jednotlivých proudů v polovodičích.
- Co znamená generace a rekombinace nosičů náboje?
- Vysvětlete princip Hallova jevu.
- Na čem závisí Hallovo napětí?



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