



Fyzika III

Pohodlně se usad'te

Přednáška co nevidět začne!

Lasery

Light **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation +y



Zesílení světla průchodem aktivním prostředím (L.A.S.E.R):

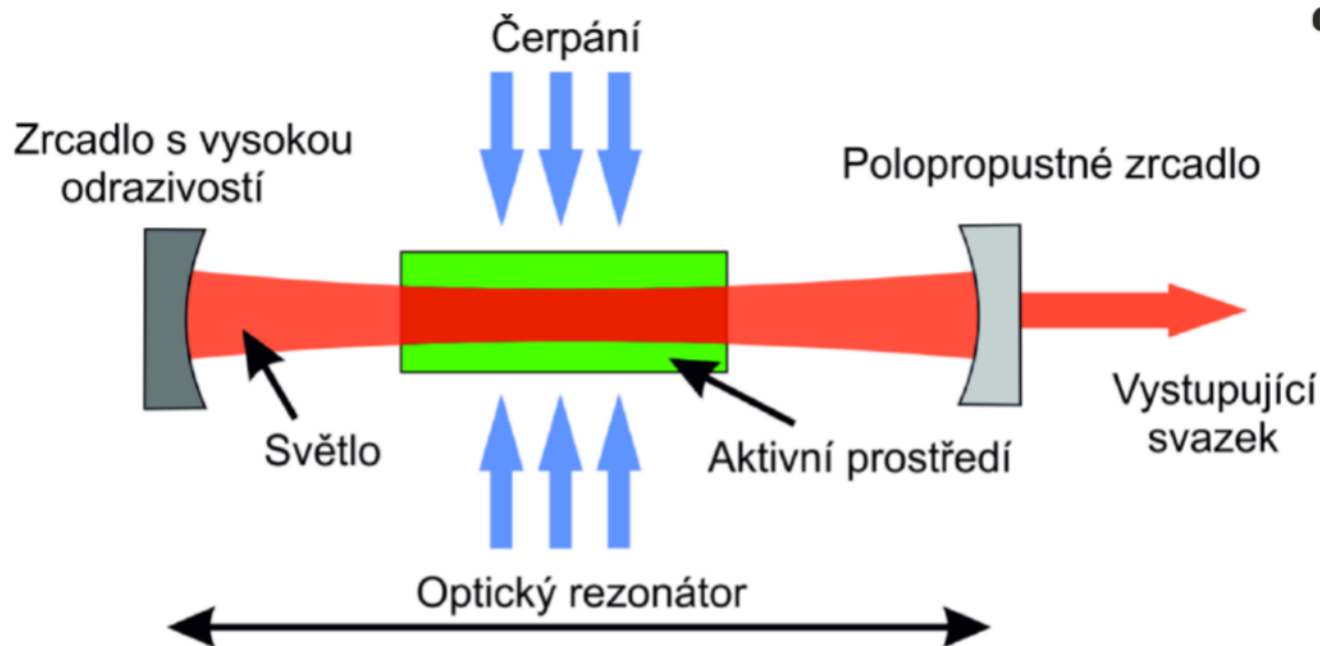
- Možné za předpokladu dosažení **inverzní populace** ($N_2 - N_1 > 1$)
- Teoreticky předpověděl A. Einstein 1917
- První LASER – T. H. Maiman 1960 (3. hladinový rubínový LASER)

Hlavní vlastnosti výstupního světla:

- Intenzita, vlnová délka, příčný profil, divergence, koherenční vzdálenost
- U pulzních laserů navíc časová šířka pulzů a frekvence pulzů

Hlavní složky LASERu:

- **Čerpání** – zajišťuje vznik inverze (světlo, injekce nosičů, el. pole, chem. reakce)
- **Aktivní prostřední** – medium pro zesílení (plyn, polovodič, pevná látka, kapalina)
- **Zpětná vazba** – rezonátor. Většinou zrcadla



Hlavní složky LASERu:

- **Čerpání** – zajišťuje vznik inverze (světlo, injekce nosičů, el. pole, chem. reakce)
- **Aktivní prostředí** – medium pro zesílení (plyn, polovodič, pevná látka, kapalina)
- **Zpětná vazba** – rezonátor. Většinou zrcadla

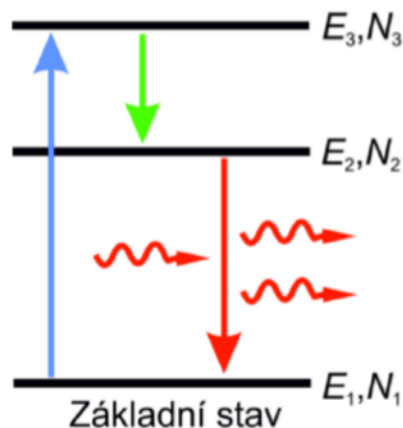
2. Hladinové aktivní prostředí:

- Nemožnost dosáhnout inverze při optickém buzení ($\max. N_2 - N_1 = 1$)



3. Hladinové aktivní prostředí:

3-hladinový systém
Inverze mezi hladinami N_2 a N_1

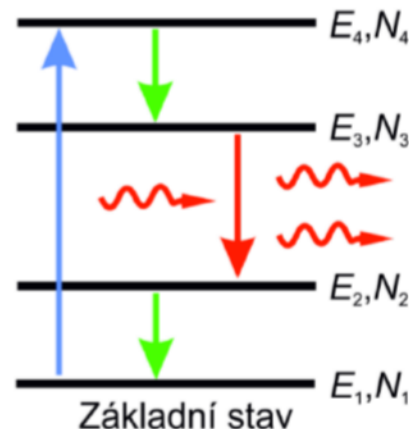


↑ Čerpání ↓ Rychlý nezářivý přechod

- Funguje, ale **velké ztráty** (reabsorpce) (energeticky náročné čerpání)

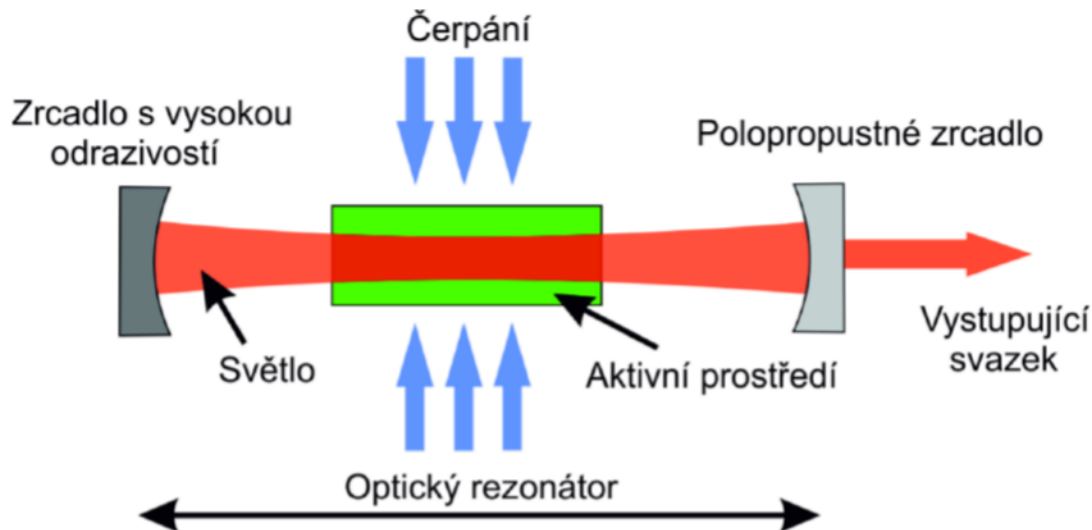
4. Hladinové aktivní prostředí:

4-hladinový systém
Inverze mezi hladinami N_3 a N_2



↓ Přechod vyvolaný stim. emisí

- Funguje. Nižší energetická náročnost



Intenzita světla po jednom oběhu rezonátorem:

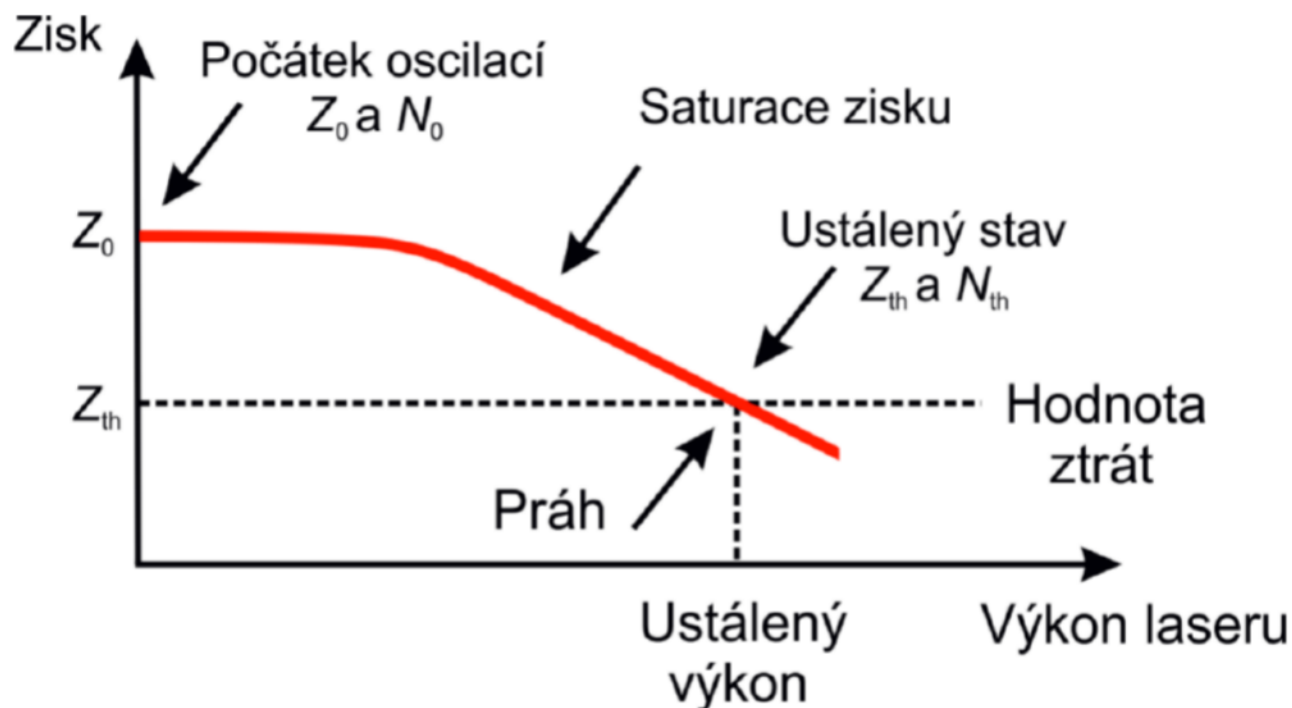
$$I(2l) = I(0) \overset{\text{Odraživost zrcadel}}{\underbrace{R_1 R_2}} \overset{\text{Ztráty rozptylem}}{\underbrace{(1 - \alpha_L)^2}} \overset{\text{Ztráty absorpcí}}{\underbrace{\exp(-2l\alpha)}} \overset{\text{Zesílení světla (efektivita stimul. emise a síla čerpání)}}{\underbrace{\exp(2lg) \text{ Zisk}}}$$

Zesílení světla:

$$\text{Ztráty} \cdot \text{Zisk} \geq 1$$



Dynamika laseru před dosažením ustáleného stavu:



- Z je zisk aktivního prostředí
- Z_{th} a N_{th} jsou prahové hodnoty zisku a populace (min. pro laserování)

1. Vliv na ztráty uvnitř rezonátoru (viz předešlé blány)

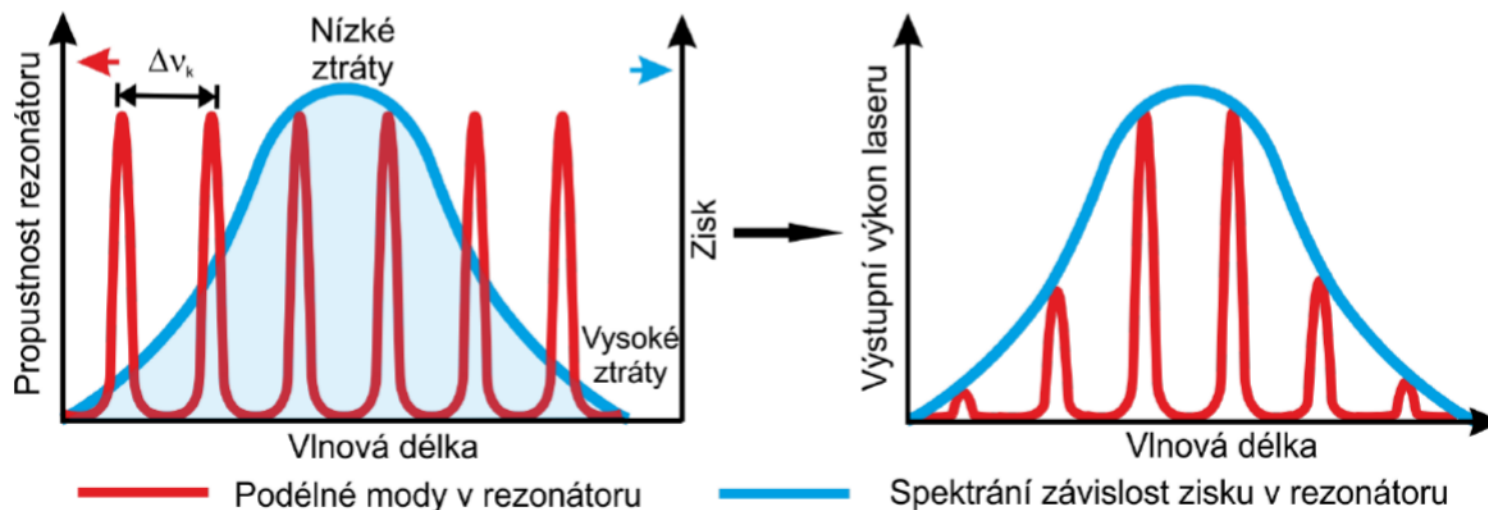
2. Vliv na vlnovou délku výstupního svazku

- Rezonanční podmínka $l = k \frac{\lambda_k}{2}$
(podélné mody)



Spektrální modulace výstupu

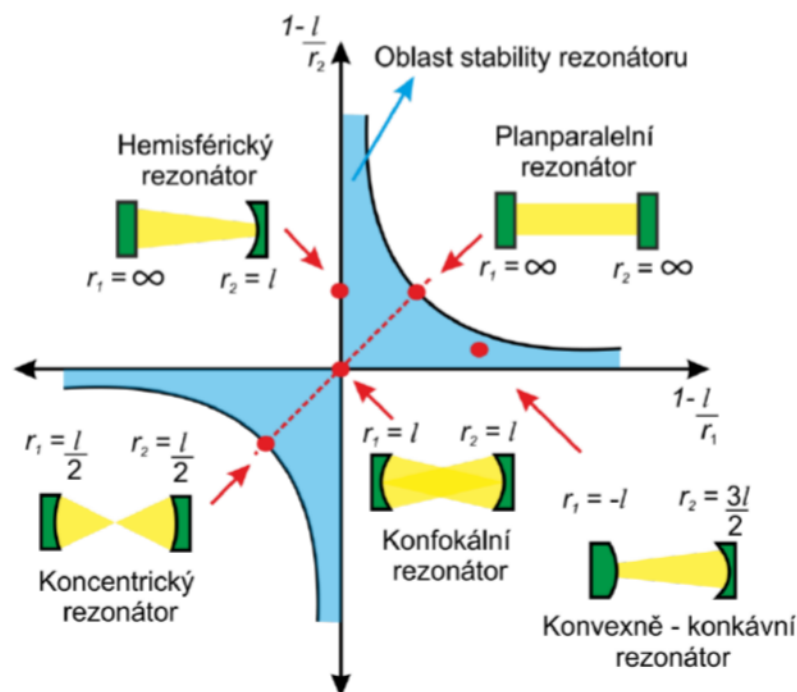
- Spektrální závislost ztrát



3. Podmínky stability:

- Tvar zrcadel určuje míru ztrát. Pro minimální ztráty je nutno splnit podmínku stability:

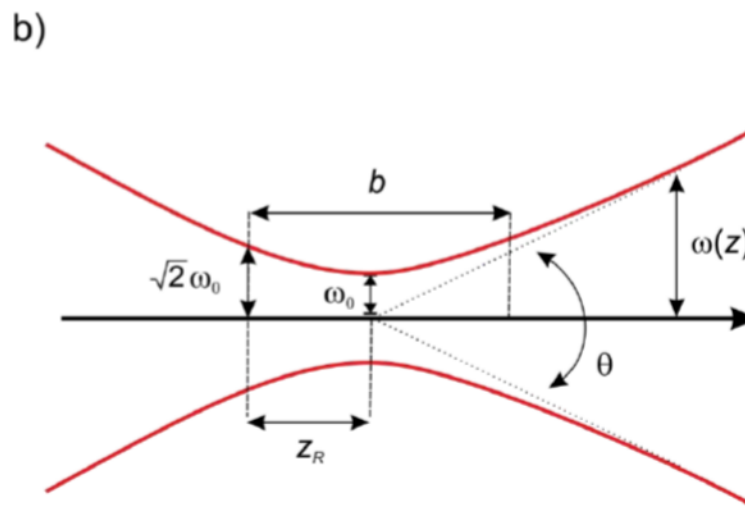
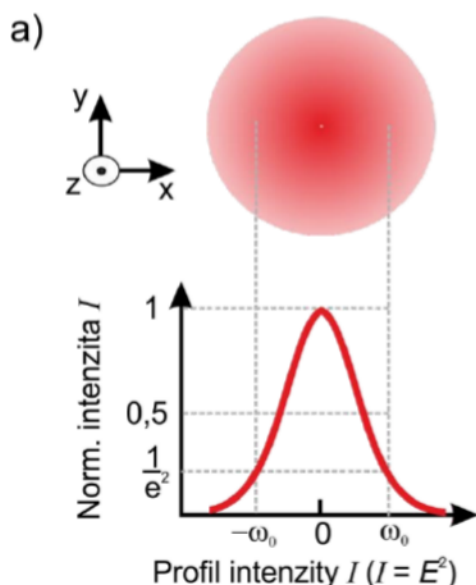
$$0 \leq \left(1 - \frac{l}{r_1}\right) \left(1 - \frac{l}{r_2}\right) \leq 1$$



4. Vliv na příčný profil výstupního svazku:

- Laserová svazek kopíruje tvar zrcadel. Sférická zrcadel ➔ Gaussovský profil

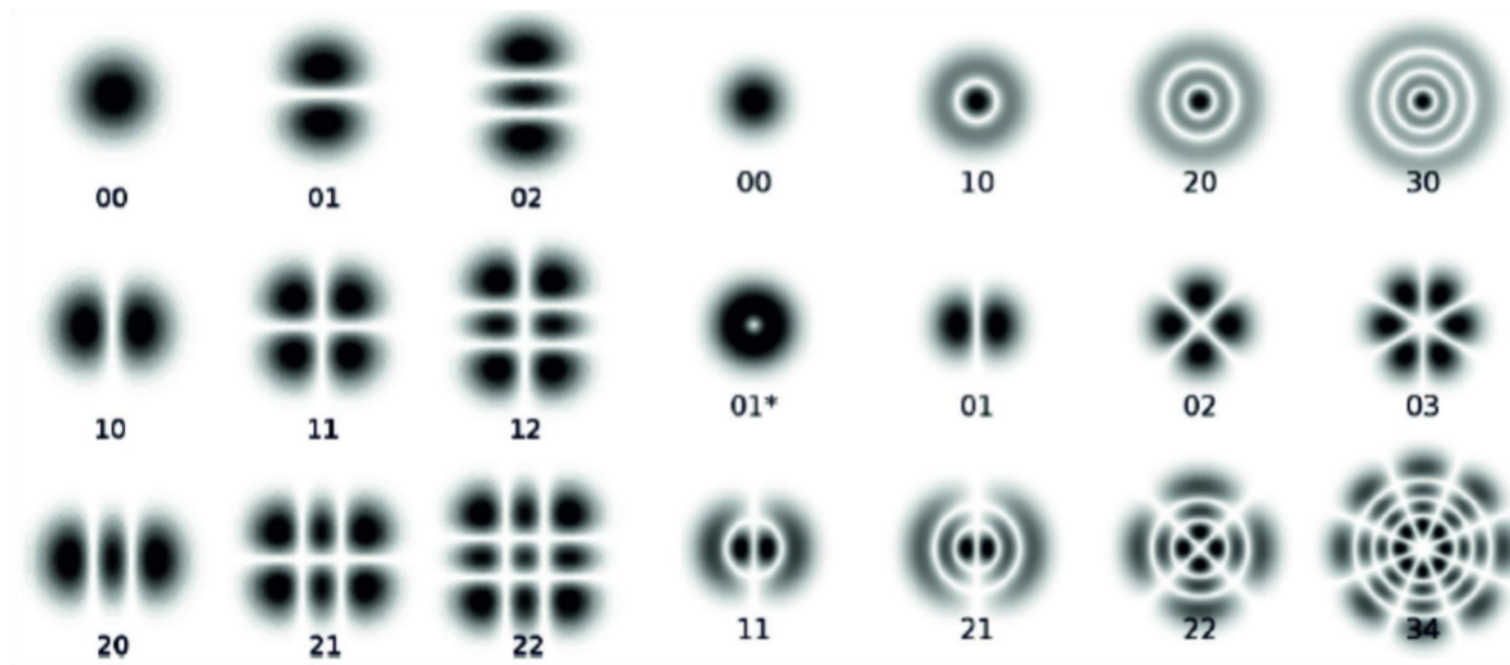
$$E(r, t) = E_0 \frac{w_0}{w(z)} \exp \left[- \left(\frac{r^2}{w^2(z)} \right) \right] \exp[-i(\omega t - kz)] \exp[-i\theta(z)] \exp \left[\frac{ikr^2}{2R(z)} \right]$$





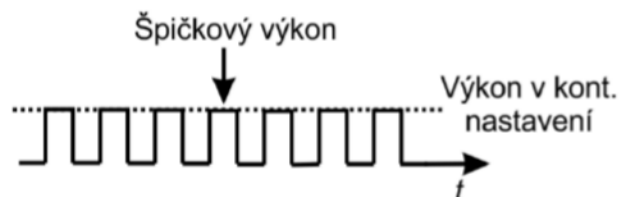
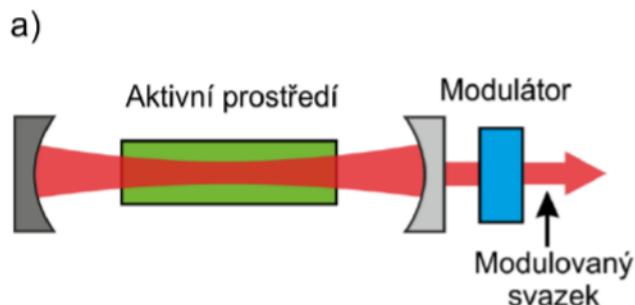
4. Vliv na příčný profil výstupního svazku:

- Další vybrané příčné profily svazků



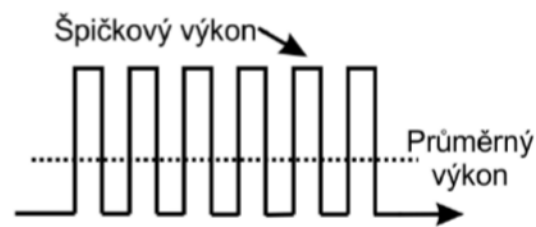
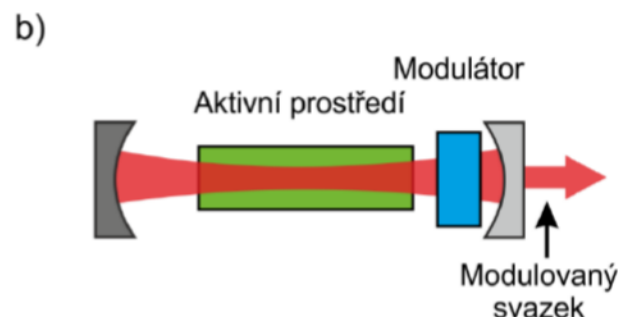
- Čísla určují typ profilu – tzv. Příčné mody laserového svazku. Přejídy mezi mody Změnou nastavená rezonátoru.

Vnější modulace



- Jednoduchá konstrukce
- Nízká intenzita pulzů
- Dlouhá délka pulzů

Vnitřní modulace



- Složitá konstrukce
- Možnost generovat intenzivní pulzy
- Krátké pulzy

1. Nárazové otevření rezonátoru

- Rezonátor o velmi nízkých ztrátách (vysoká intenzita) ➡ odstranění zrcadla (silný pulz)

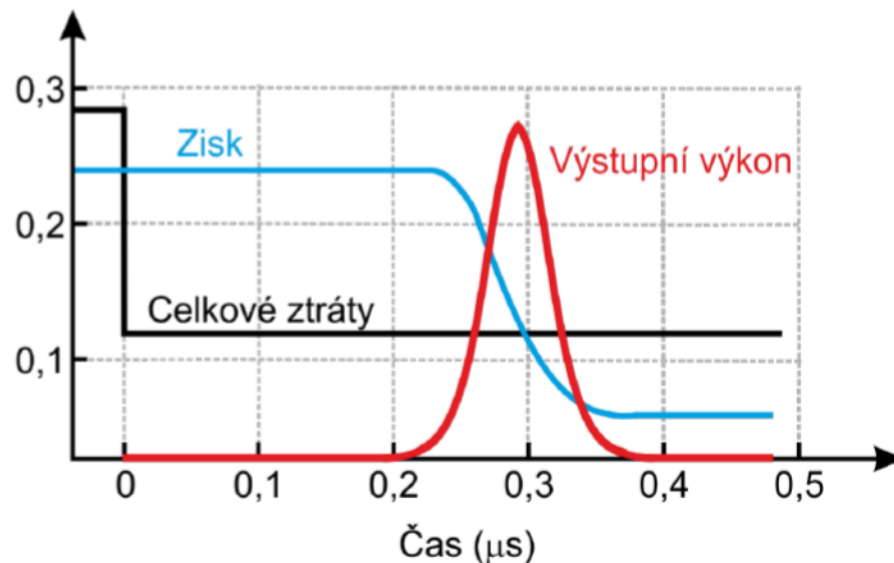
2. Q-spínání (Q = kvalita rezonátoru)

- Rezonátor o velmi vysokých ztrátách (nelaseruje, ale má velmi vysokou populaci)

➡ Nárazové snížení ztrát = silný pulz

- Aktivní Q-spínání: pulz $\sim 10^{-8}$ s
(elektroopticky, akustoopticky, mechanicky)

- Pasivní Q-spínání: pulz < 1 ns
(saturabilní absorber)



Vznik pulzu u Q-spínání

3. Metoda synchronizace módů (Mode-locking)

- Vyrovnání fáze všech podélných módů v rezonátoru vede k jejich interferenci

➡ Vznik jednoho silného pulzu

- Časová šířka pulzů:

$$\Delta t_p = \frac{1}{M \Delta \nu_k}$$

M označuje počet módu v rezonátoru

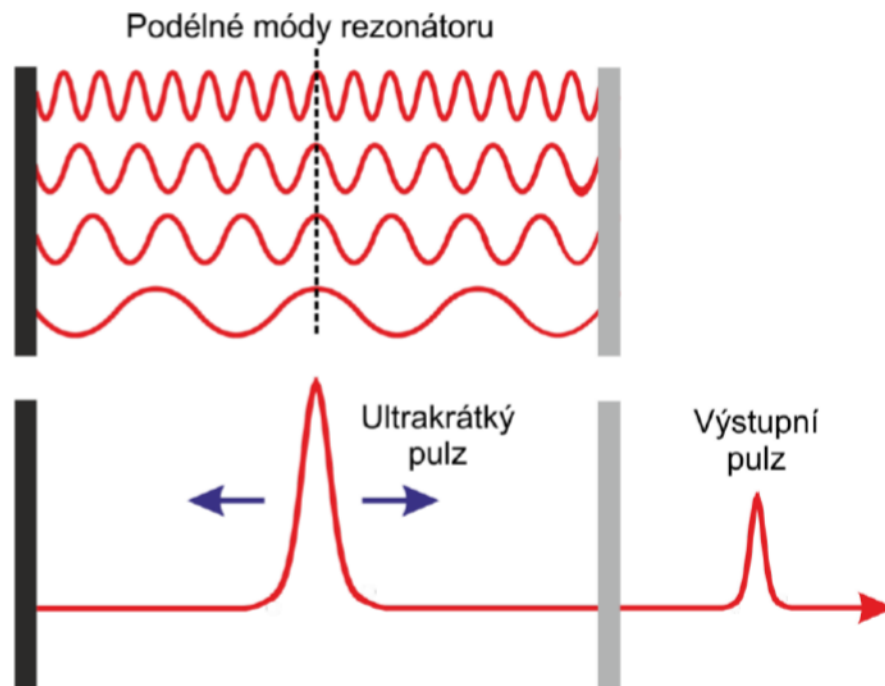
$\Delta \nu_k$ je frekvenční vzdálenost módu

$$\Delta t_p \sim 10^{-9} - 10^{-15} \text{ s}$$

- Intenzita pulzů:

$$I_p = MI$$

I je intenzita v každém podélném módu



Princip synchronizace módů

1. Kontinuální laser

- Výkon $P = \frac{W}{t}$, $[P] = W$
- Intenzita $I = \frac{P}{S}$, $[I] = \frac{W}{cm^2}$

2. Pulzní laser

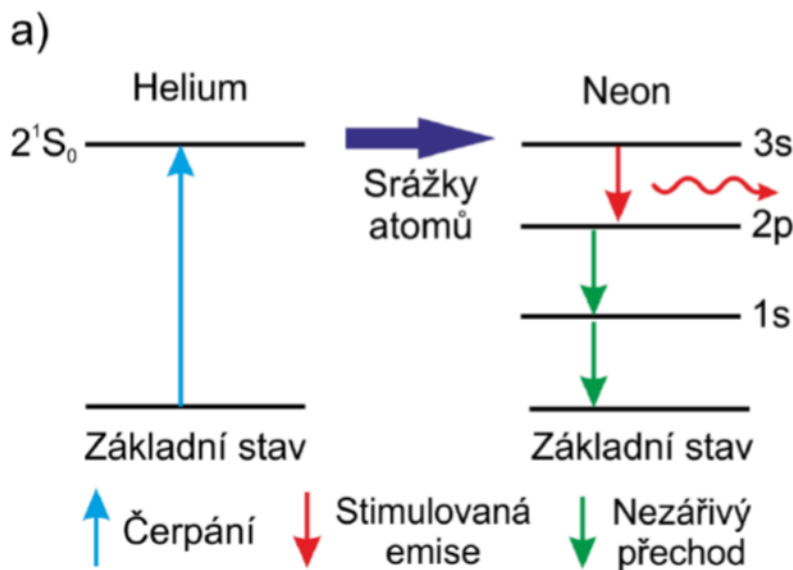
- Energie v pulzu E , $[E] = J$
- Špičkový výkon $P = \frac{E}{\Delta t_p}$, $[P] = W$
- Hustota energie v pulzu $K = \frac{E}{S}$, $[K] = \frac{J}{cm^2}$
- Intenzita pulzu $I = \frac{P}{S}$, $[I] = \frac{W}{cm^2}$

Hranice fyz. efektů na intenzitě:

- $10 W/cm^2$ – hranice poškození rohovky ➡ zesílení okem $10^4 - 10^5$ ➡ **1 mW!!!!!!**
- $12, 24$ a $34 W/cm^2$ – popáleniny 1., 2. a 3. třídy
- $10 W/cm^2$ – podpálení papíru/degradace plastů
- $10^9 W/cm^2$ – řezání kůvů (CO_2 lasery)
- $10^{12} W/cm^2$ – Ionizace vzduchu (záblesky)
- $10^{15} - 10^{16} W/cm^2$ – Totální ionizace atomů ($C^{6+}, Ta^{45+}, W^{46+}$)
- $10^{18} W/cm^2$ – hranice relativistických efektů

1. Plynné lasery

- Aktivní prostředí plyn. Jednoduchá konstrukce a nízká cena
- Nejběžnější He-Ne laser. $\lambda = 632,88 \text{ nm}$, $P = 0,5 - 50 \text{ mW}$

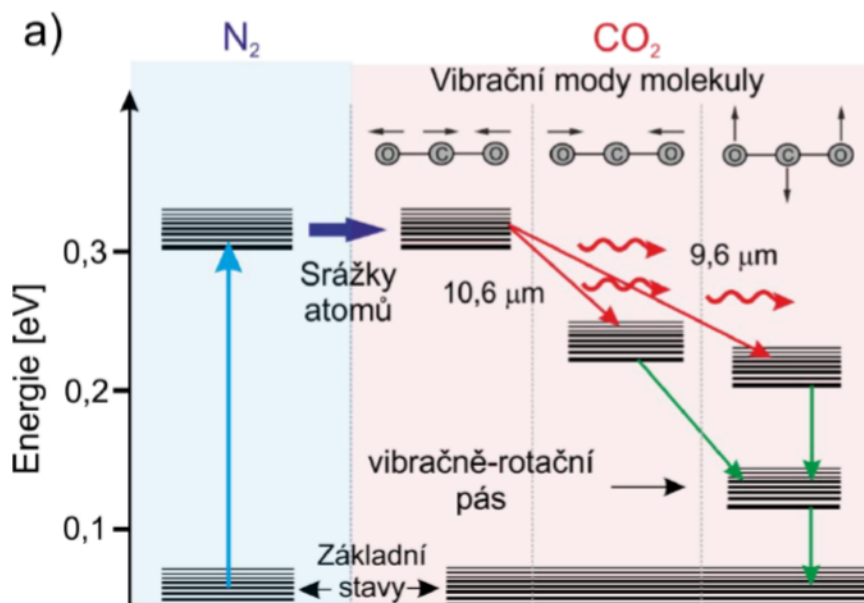


b)

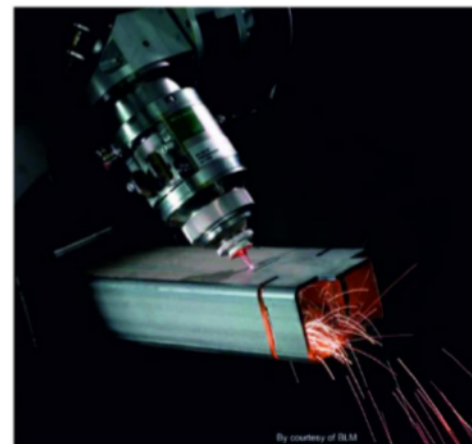


1. Plynné lasery

- Aktivní prostředí plyn. Jednoduchá konstrukce a nízká cena
- Nejběžnější průmyslový laser: CO a CO₂, $\lambda = 5$ a 10 μm
- Vibračně-rotační přechody
- Kontinuální i pulzní režim, $P = 10\text{kW}$



b)



1. Plynné lasery

- Aktivní prostředí plyn. Jednoduchá konstrukce a nízká cena
- Chemické plynné lasery: čerpání exotermickou chemickou reakcí
- Vodíkovo-fluorový HF laser. Reakce vodíku a fluoru ➡ HF a mnohá energie
- Kontinuální svazek o MW výkonu bez nutnosti el. zdroje (vojenské aplikace)
- Kyslík-jód (COIL), jodový (AGIL), deuterio-fluorový (DF).

2. Pevnolátkové lasery

- Aktivní prostředí krystal/sklo dotovaný vhodným iontem/přechodným kovem:
- Nosné prostředí (čerpané látka): křemen, safír nebo yttrito-hlinitý granát (YAG)
- Ionty: Cr^{3+} , Er^{3+} , Nd^{3+} , Cr^{3+} , přechodný kov: Ti, V, Ni (přechody)
- Jsou stabilní, snadno čerpatelné (opticky, elektricky), odolné, pulzní i kont. režim., široké přechody (úzké pulzy) a laditelné spektrum. P až 10^{19} W/cm^2

a)



b)

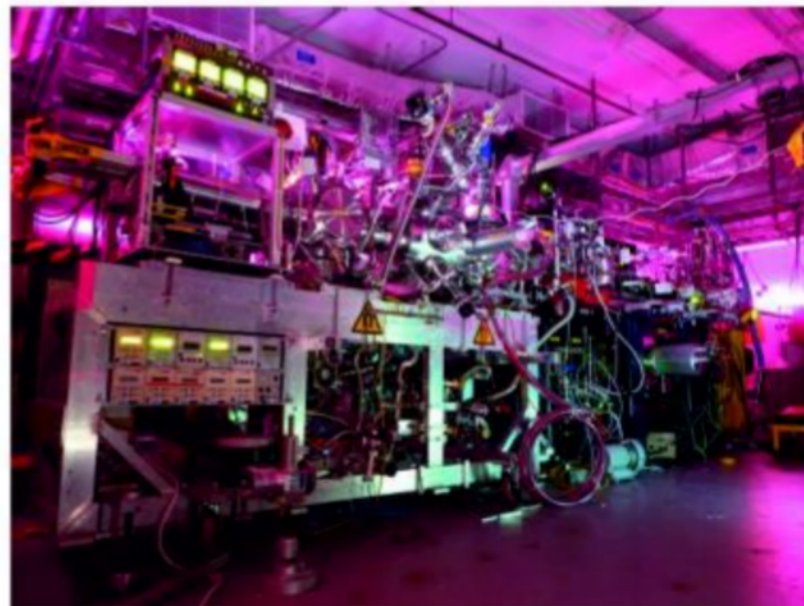


3. Kapalinové lasery

- Aktivní prostředí je organické barvivo ve vodě nebo etanolu.
- Výhody: laditelnost výstupu a úzké pulzy
- Nevýhody: Degradace barviva (nutnost výměny) a toxicita (rhodamin-6G, kumarin)

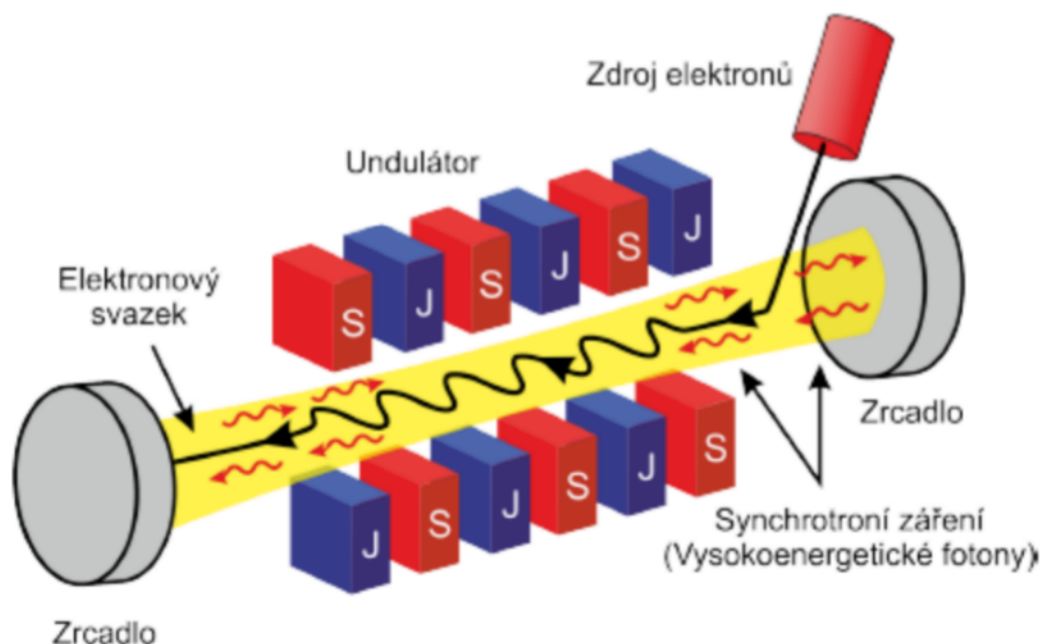
4. Plasmatické rtg lasery

- Obtížná generace i vedení svazku
- Generace C^{6+} , Ta^{45+} , W^{46+} laserem
- Chladnutí plazmatu = vznik pulzu
- Destrukce aktivního prostředí



5. Lasery s volným elektronem (free electron lasers – FEL)

- Vychylování elektronů mag. Polem – synchrotronní záření ($0,2 - 1000 \mu\text{m}$)
- Laditelný dle energie elektronů a frekvence vychylování.



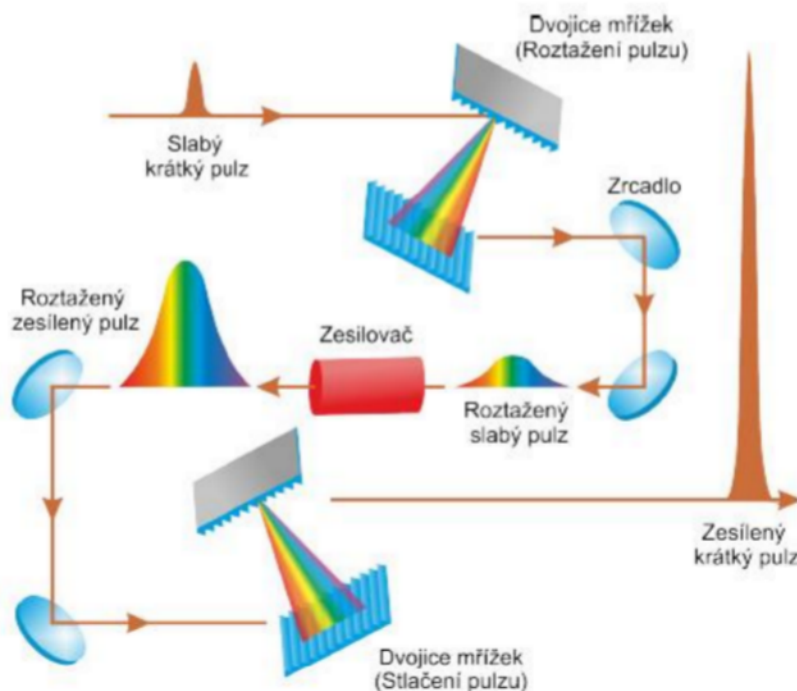
Obrázek 10.15: Konstrukce FEL.

6. Lasery o extrémních parametrech

- Požadavek: extrémně krátké a intenzivní pulzy – nelze splnit současně

6a. Extrémně silné

- CPA metoda: Chirped pulse amplification



Obrázek 10.16: Schéma fungování CPA.

- Závislost polarizace na elektrické intenzitě:

$$P(E) = \varepsilon_0 \chi^L E + \varepsilon_0 \chi^{(2)} E^2 + \varepsilon_0 \chi^{(3)} E^3 + \varepsilon_0 \chi^{(4)} E^4,$$

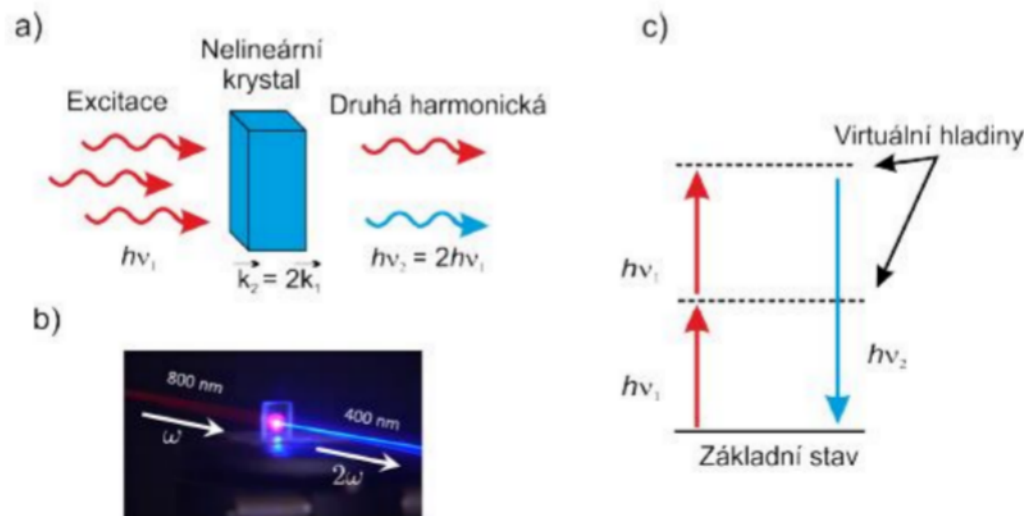
- Běžné hodnoty:

$$\chi^L \approx 1 - 100$$

$$\chi^{(2)} \approx 10^{-11} - 10^{-13} \text{ m/V}$$

$$\chi^{(3)} \approx 10^{-15} - 10^{-19} \text{ m}^2/\text{V}^2$$

- Efekty spojené s $\chi^{(2)}$: a) generace 2. harmonické frekvence ($\lambda/2$)



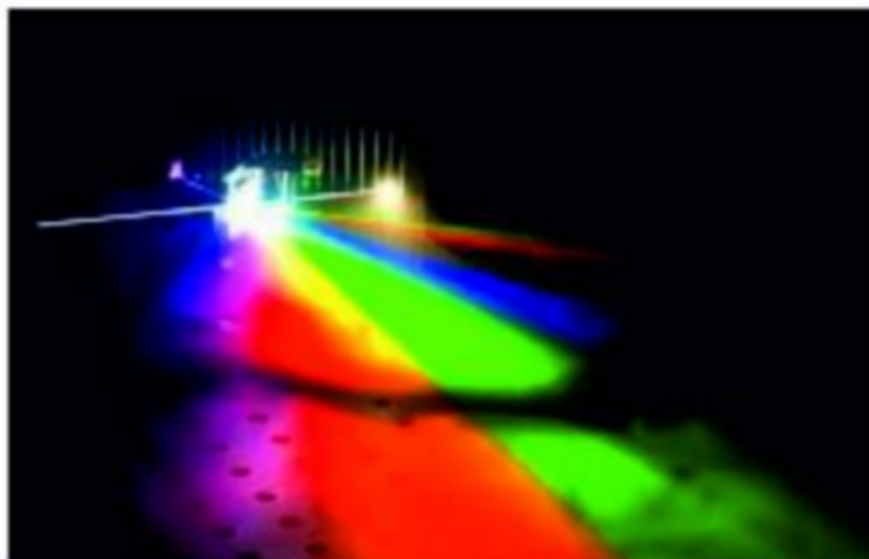
- Závislost polarizace na elektrické intenzitě:

$$P(E) = \varepsilon_0 \chi^L E + \varepsilon_0 \chi^{(2)} E^2 + \varepsilon_0 \chi^{(3)} E^3 + \varepsilon_0 \chi^{(4)} E^4,$$

- Běžné hodnoty:

$$\begin{aligned}\chi^L &\approx 1 - 100 \\ \chi^{(2)} &\approx 10^{-11} - 10^{-13} \text{ m/V} \\ \chi^{(3)} &\approx 10^{-15} - 10^{-19} \text{ m}^2/\text{V}^2\end{aligned}$$

- Efekty spojené s $\chi^{(2)}$:
 - a) generace 2. harmonické frekvence ($\lambda/2$)
 - b) generace součtové nebo rozdílové vlny
 - c) parametrické zesílení (předání energie jedné vlny druhé)
- Efekty spojené s $\chi^{(3)}$:
 - a) Autofokusace svazku (*závislost n na intenzitě*)
 - b) Automodulace fáze (superkontinuum)
 - c) Vícefotonová absorpce



- Efekty spojené s $\chi^{(3)}$:
 - a) Autofokusace svazku (*závislost n na intenzitě*)
 - b) Automodulace fáze (superkontinuum)
 - c) Vícefotonová absorpce

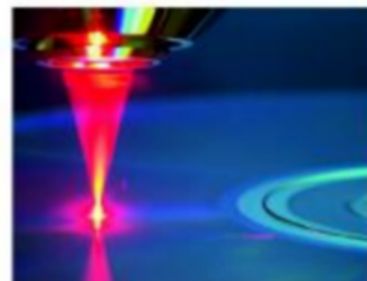
1. Běžný život

- Čtečky čárových kódů – He-Ne laser
- Laserová ukazovátka, čtečky v elektronice, lasery a 3D v tiskárnách (polovodič. lasery)
- CD/DVD/Blu-ray – 780 nm (pit 0,6 μm , 700 MB), 650 nm (0,32 μm , 4,7 GB) 405 nm (0,15 μm , 25-100 GB)
- Projektory kin, měřiče vzdálenosti, komunikační technologie (polovodič/pevnolátkový)

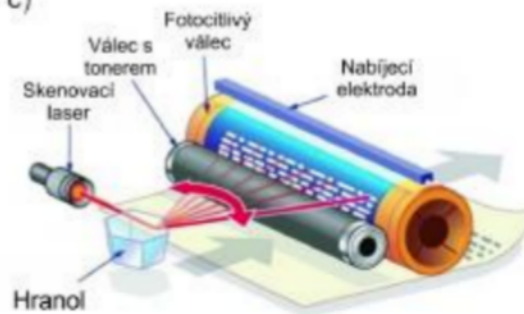
a)



b)



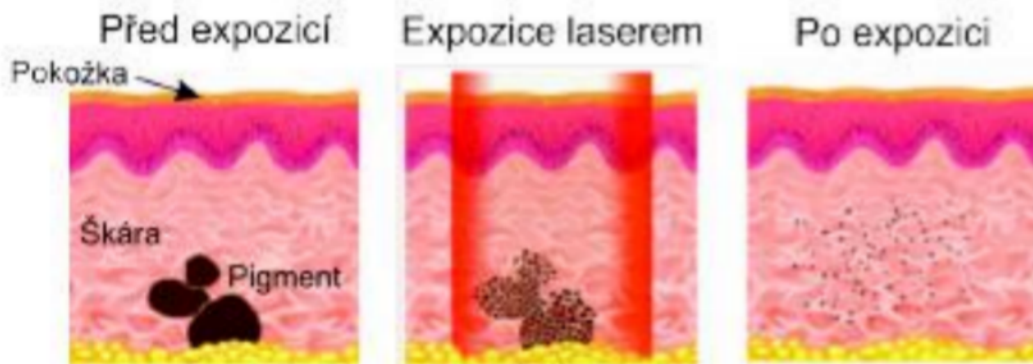
c)



2. Medicína

- Odstraňování tetování: Q-spínané CO_2 , $\text{Er}^{3+}:\text{YAG}$, $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$
- Chirurgie (skalpel/zastavení krvácení/endoskopie): CO_2 a FEL (tkáň silně absorbuje $10\mu\text{m}$)
- Dentální laser: $\text{Er}^{3+}:\text{YAG}$ (žádné mechanické vibrace, mírně anestetický)

a)

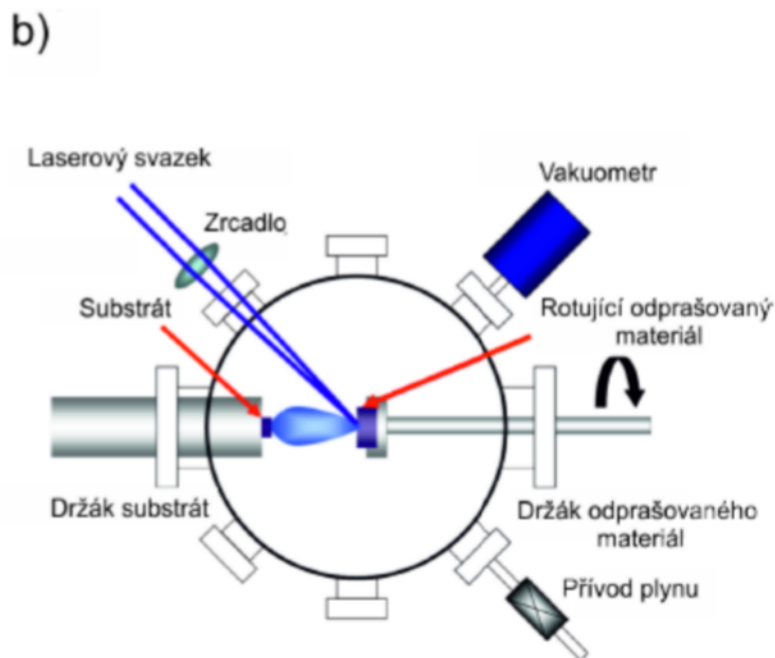
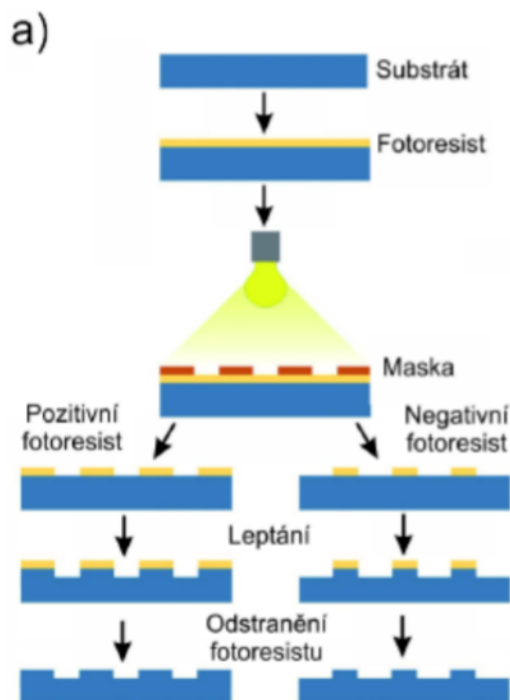


b)



3. Průmysl

- Obrábění, svařování, řezání, píjení atd. (CO_2 , $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$)
- Fotolitografie a depozice tenkých vrstev pro pokročilou elektroniku (různé)



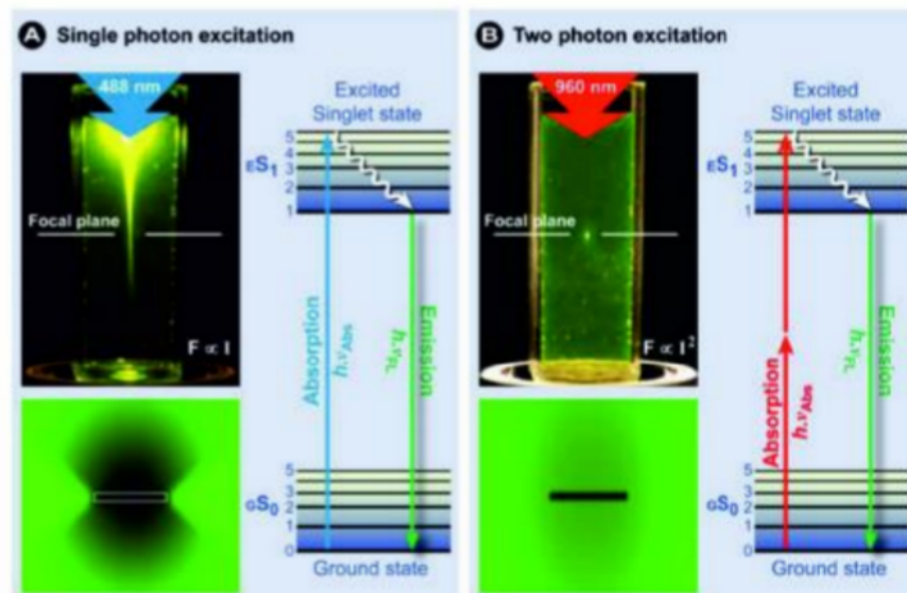
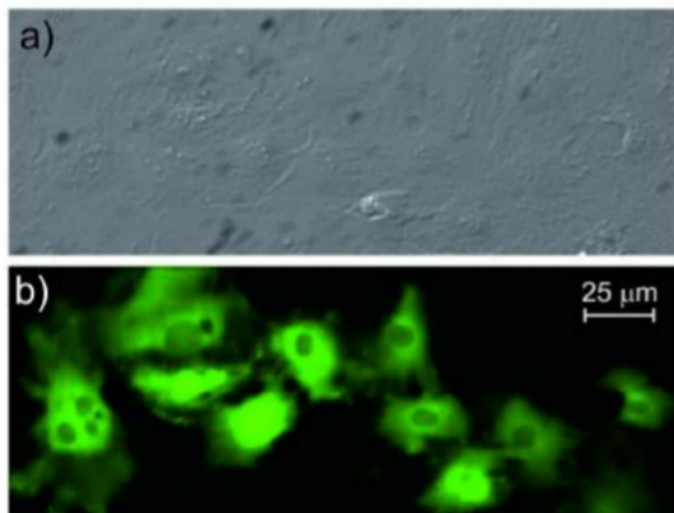
4. Vojenství

- Laserové navádění/zaměřování (polovodičové lasery)
- Dočasné oslepení nepřítele (PHASR). Od roku 1980 smrtelné: zakázané (mimo ZM-87)
- US army – ZEUS, kolové vozidlo na ničení min (CO_2 , $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$)
- Zbraně na sestřelování letadel/střel/potápění lodí (chemické/pevnolátkové lasery)
 - a) YAL-1A ABL – COIL b) MTHL (DF) ničení střel, MIRACL (DF) ničení satelitů/lodí



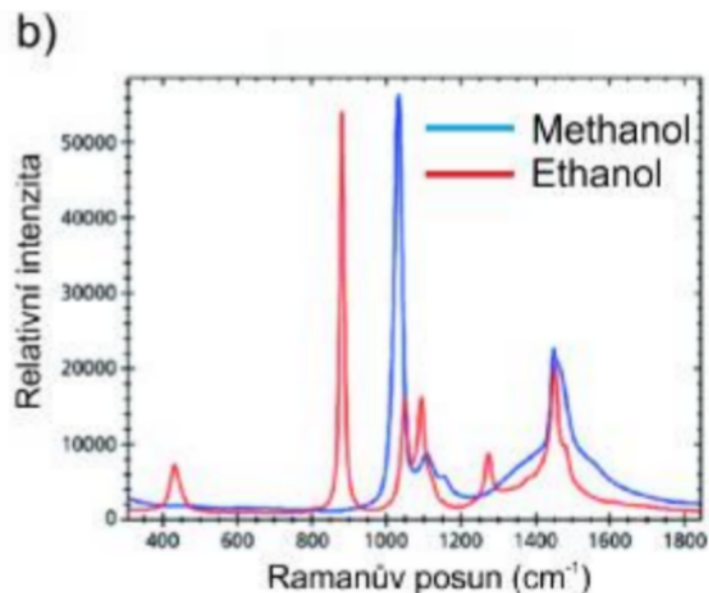
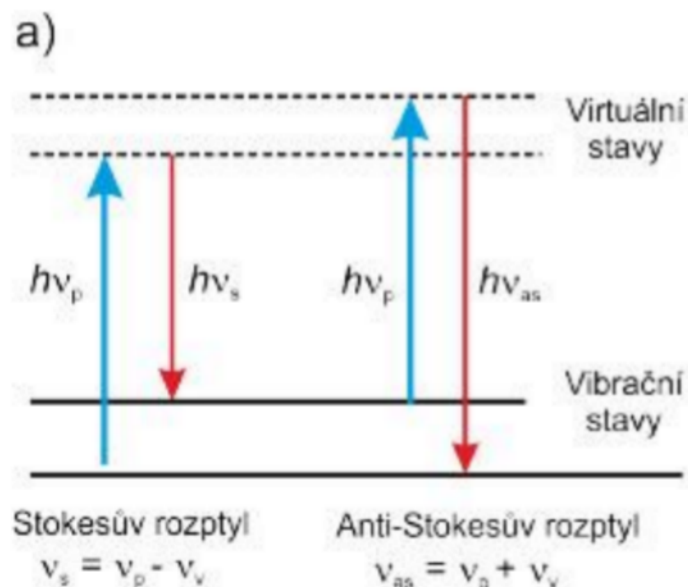
5. Věda a výzkum

- Fluorescenční mikroskopie (jedno i dvoufotonová)



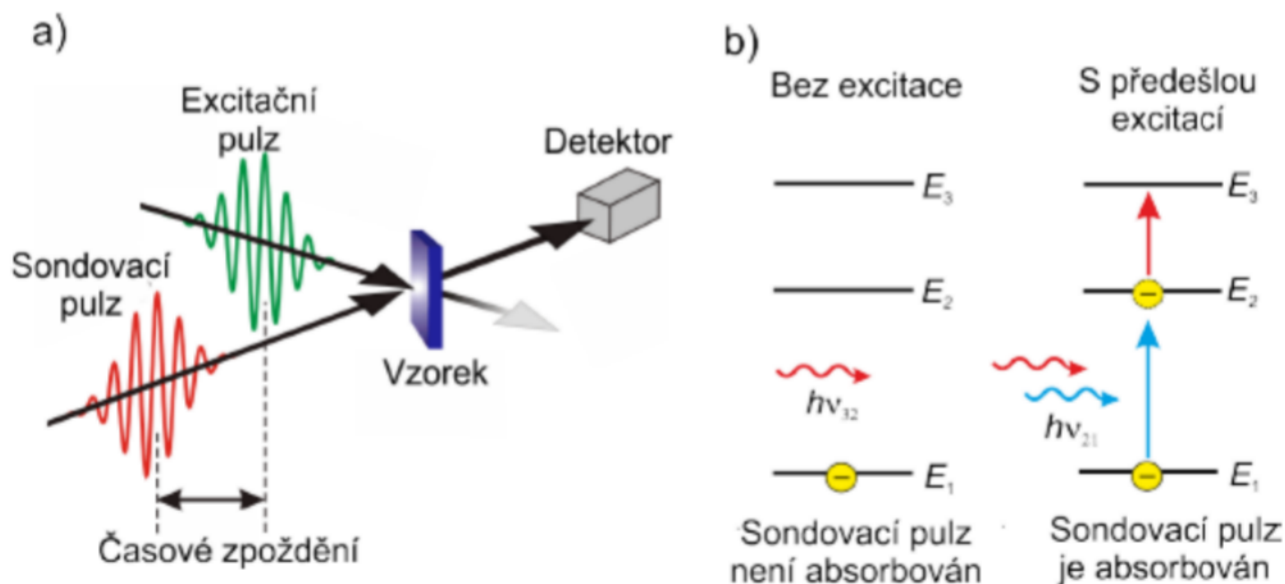
5. Věda a výzkum

- Fluorescenční mikroskopie (jedno i dvoufotonová)
- Laserová spektroskopie: a) Raman (i stimulovaný – nelineární effect)



5. Věda a výzkum

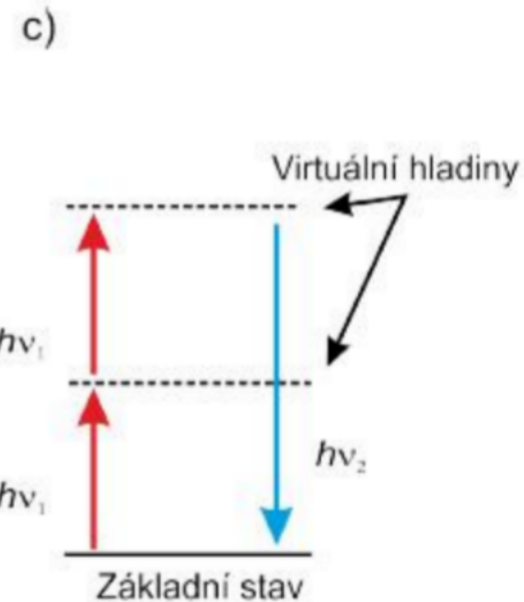
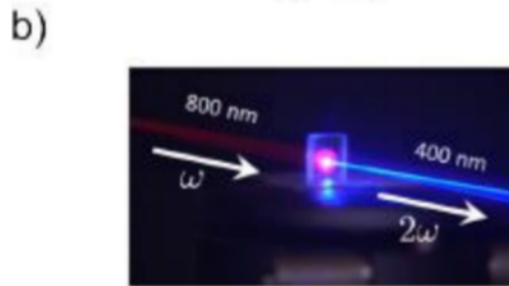
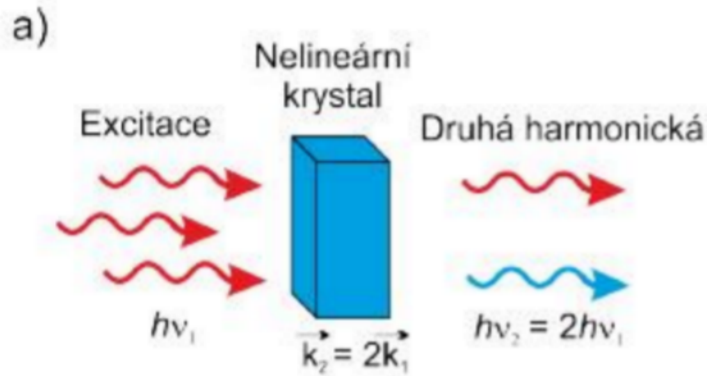
- Fluorescenční mikroskopie (jedno i dvoufotonová)
- Laserová spektroskopie: a) Raman (i stimulovaný – nelineární efekt)
b) Časové rozlišená spektroskopie (500 000 000 rychlejší než slow-motion kamery)



A opravdová přednáška může začít!

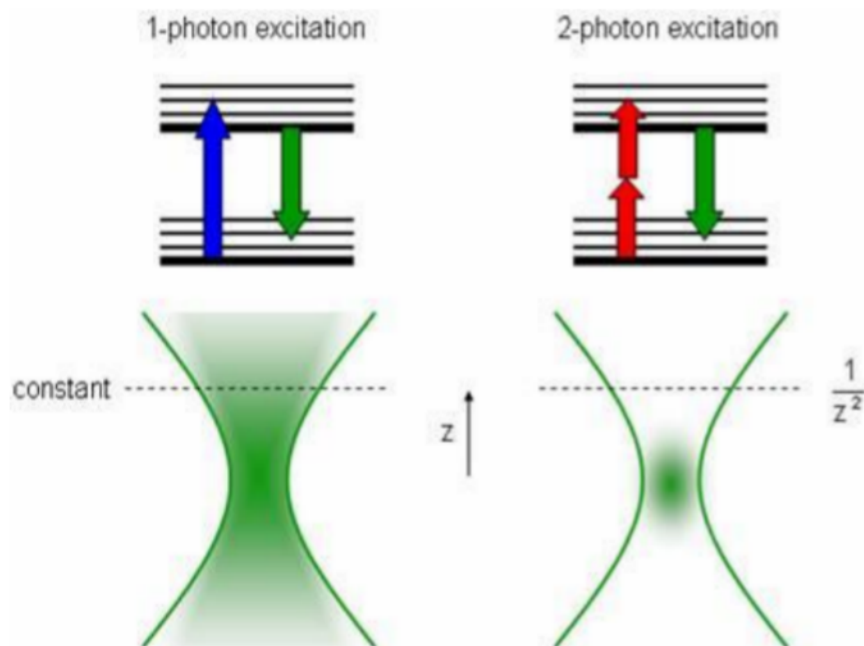
Děkuji za pozornost

- Efekty spojené s $\chi^{(2)}$: a) generace 2. harmonické frekvence ($\lambda/2$)

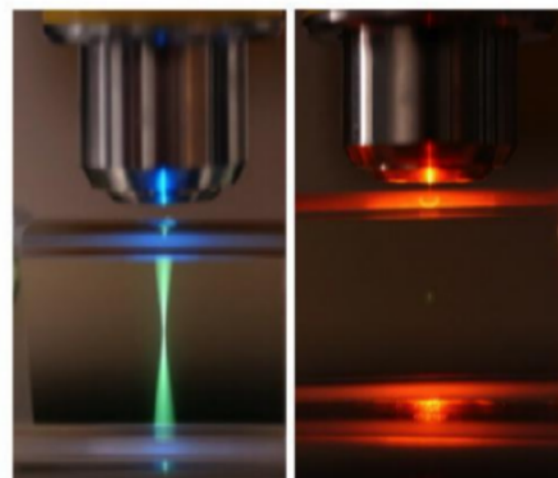




➤ Dvoufotonová mikroskopie



1-photon vs. 2-photon

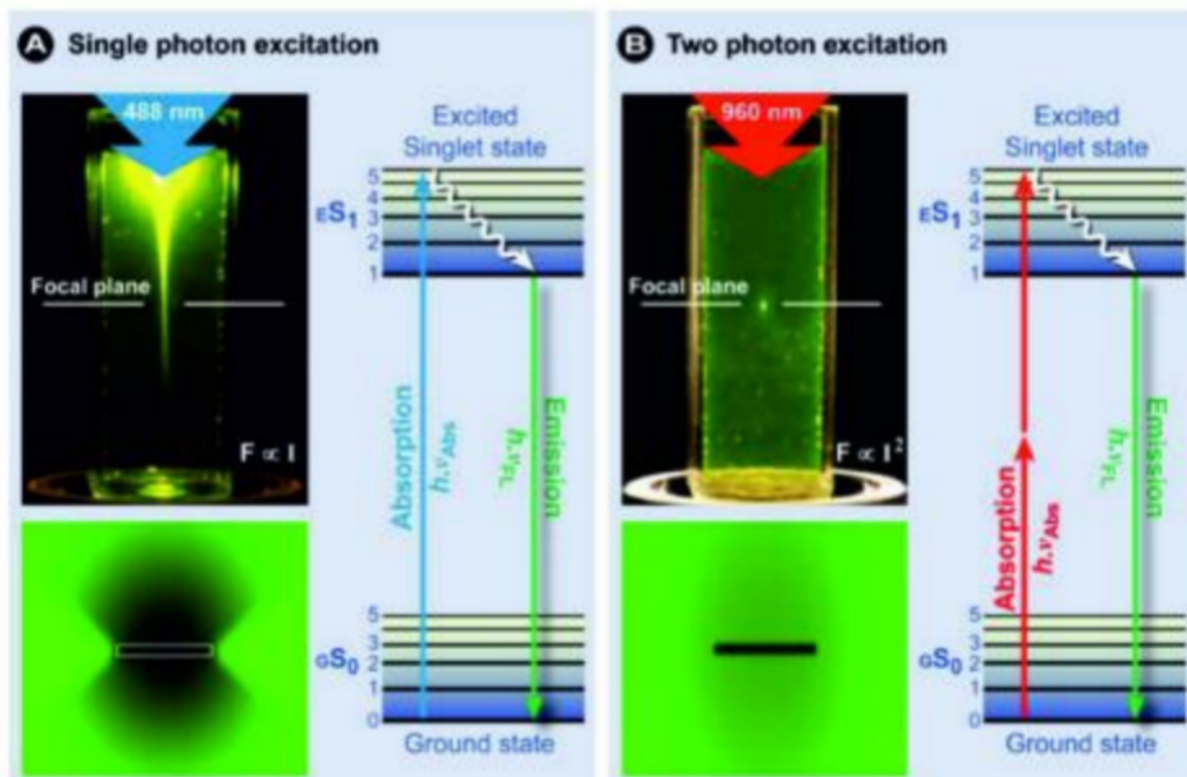


Photos by Steve Ruzin

Fluorescence from
out of focus planes

Fluorescence from
focal spot only

- Dvoufotonová mikroskopie



Autorská práva/copyright

Uveřejněné materiály jsou určeny studentům Vysoké školy chemicko-technologické v Praze jako studijní materiál. Některá textová i obrazová data v nich obsažená jsou převzata z veřejných zdrojů. V případě nedostatečných citací nebylo cílem autora/ů záměrně poškodit event. autora/y původního díla. S eventuálními výhradami se prosím obračejte na autora/y konkrétního výukového materiálu, aby bylo možné zjednat nápravu.

The published materials are intended for students of the University of Chemistry and Technology, Prague as a study material. Some text and image data contained therein are taken from public sources. In the case of insufficient quotations, the author's intention was not to intentionally infringe the possible author(s) rights to the original work. If you have any reservations, please contact the author(s) of the specific teaching material in order to remedy the situation.



Fyzika III

Pohodlně se usadte

Přednáška co nevidět začne!

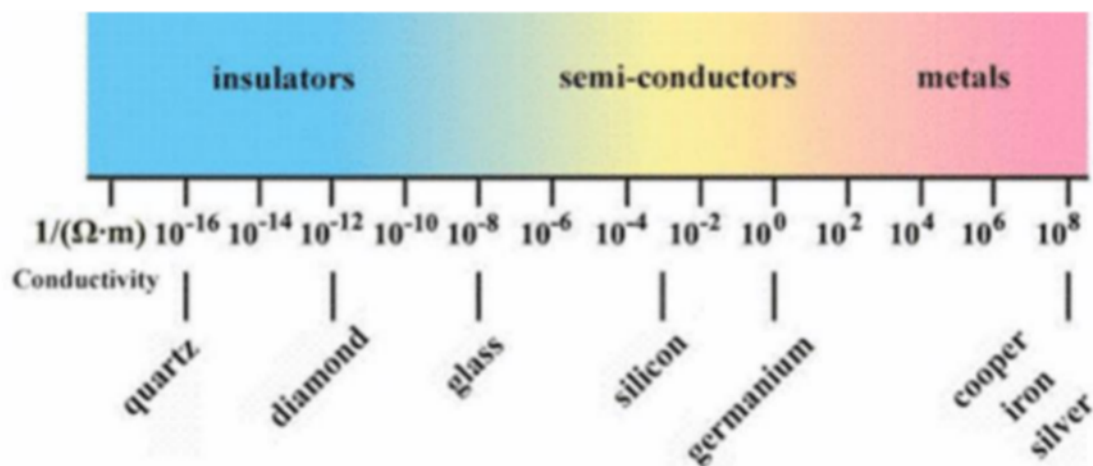
Vedení elektrického proudu v látkách



Elektrické vlastnosti látek:

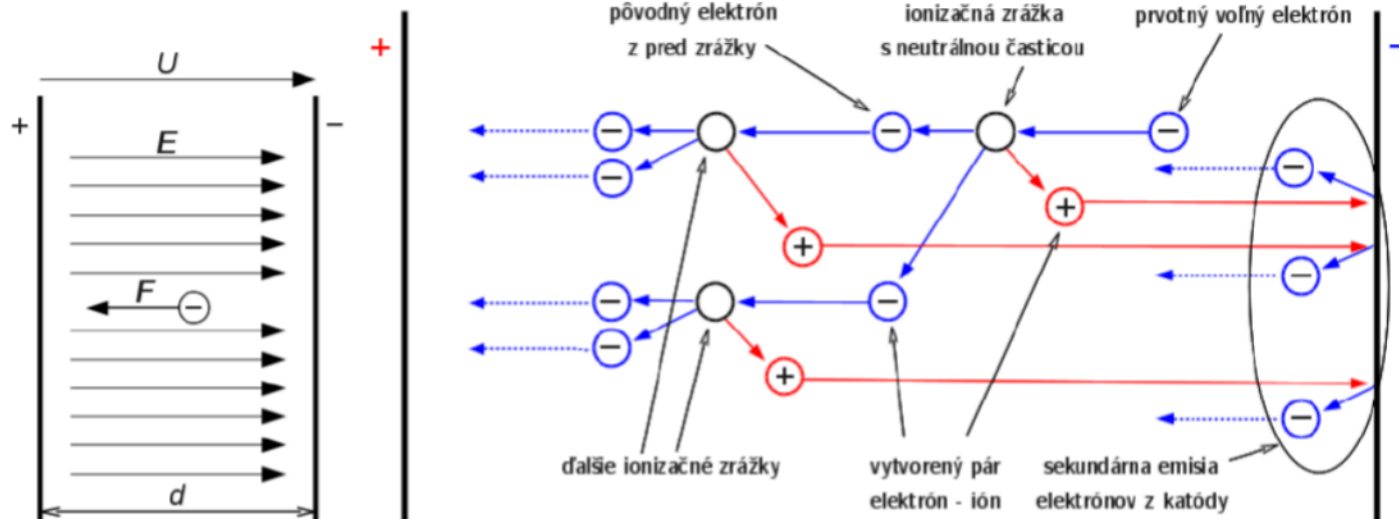
- Dielektrická permitivita ε , susceptibility χ a elektrická (měrná/specifická) vodivost G (σ)

Izolátory $< 10^{-8} \text{ S/m}$ < Polovodiče $> 10^6 \text{ S/m}$ > Vodiče



- Elektrické vlastnosti plynů – nezajímavé. Jen nepatrně se liší od vakua ($\epsilon_r = 1,006$)
- Zajímavé – otázka vedení proudu v plynech (elektrony a ionty)
- **Typy elektrické vodivosti v plynech:**
 - a) nesamostatná elektrická vodivost (nutný externí ionizační zdroj)
 - b) samostatná elektrická vodivost (bez nutnosti externí ionizace)
- Základní samoudržovací ionizační mechanismus (teorie lavin): **Townsendova teorie**

Townsendova teorie:



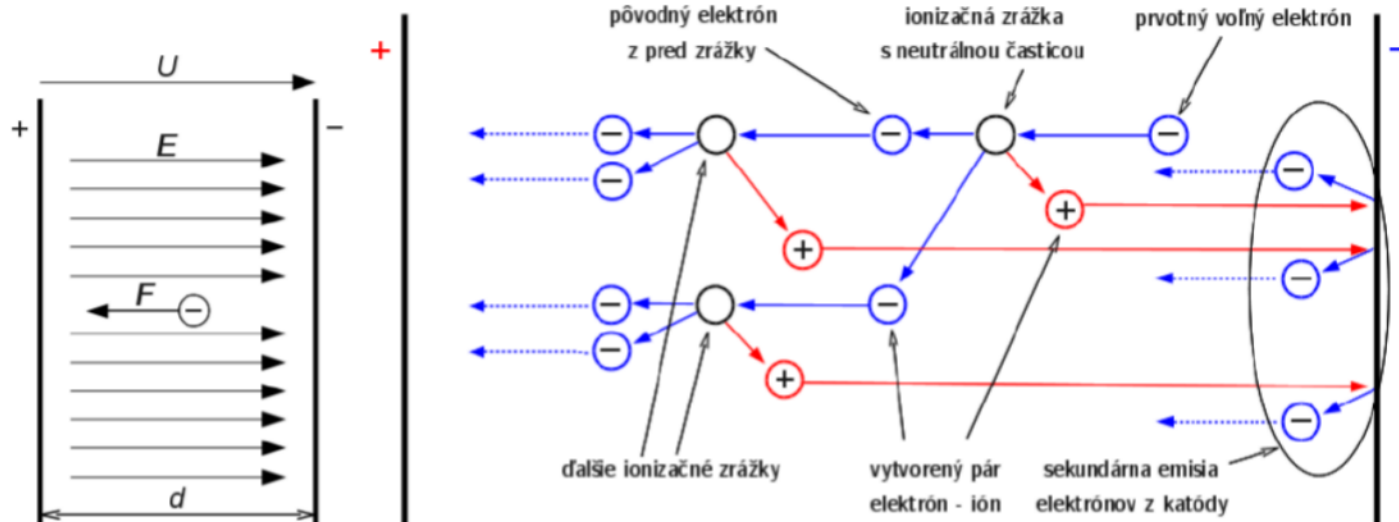
- 1. Fáze: a) Urychlení elektronu el. polem + srážka s neutrální částicí
b) Pokud nepružná srážka ➡ nový elektron + kladný iont
- Kinetické rovnice pro přírůstek elektronů:

$$dN = N \alpha dx,$$

$$N(x) = N(0) \exp(\alpha x)$$

α je Townsendův koeficient a N počet elektronů. Pokud $\alpha > 1$ ➡ vznik laviny

Townsendova teorie:



- 2. Fáze: Dopad kladných iontů na katodu může způsobit sekundární emisi elektronů

Popis:

$$N_n = \gamma [N(0) \exp(\alpha d) - N(0)]$$

γ je Townsendův koeficient sekundární emise. N_n je počet vyražených elektronů na katodě

- Výsledek: $\gamma (\exp(\alpha d) - 1) > 1$ ➡ zapálení samostatného výboje
- $\gamma (\exp(\alpha d) - 1) < 1$ ➡ nedojde k zapálení

- Typy kapalin dle el. vodivosti:
 - a) téměř nevodivé (např. oleje)
 - b) slabě vodivé (voda, etanol)
 - c) dobře vodivé (elektrolyty – roztok, kyselin, zásad, solí)
- Elektrolyt: látka, která v roztocích nebo tavenině vede dobře el. proud (disociace)
- Princip vodivosti v roztocích:

a) Disociace elektrolytu (úplné/částečné)

b) Pohyb iontů k elektrodám (el. síla + odpor obtékání)

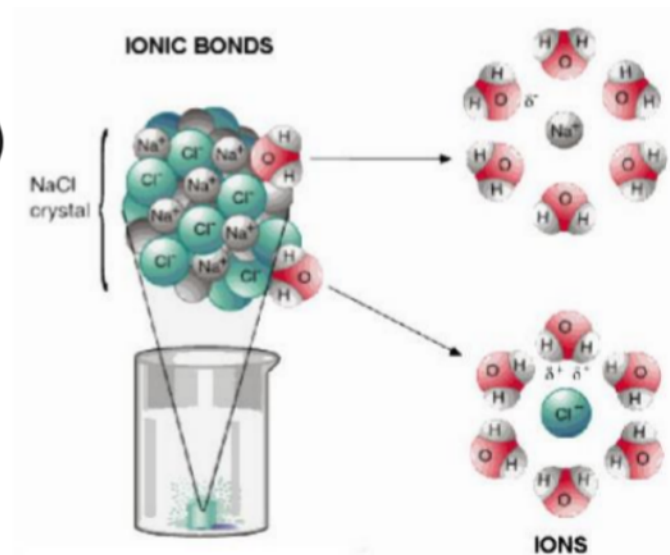
$$F = qE - \beta v \quad \longrightarrow \quad v = \frac{q}{\beta} E = \mu E$$

c) Výsledný proud:

$$i = qv = E (\rho_+ \mu_+ + \rho_- \mu_-)$$

$$\sigma = \frac{i}{E} = n_+ v_+ e (\mu_+ + \mu_-)$$

ρ_+ je hustota kladného náboje, n_+ je počet kladných iontů, v_+ je jejich mocnost a μ_+ je pohyblivost nosičů



Elektrolyty:

- Dělení elektrolytů: a) Pravé (jsou složeny z iontů i v pevné fázi, např. anorganické soli)
b) Potenciální (vznik iontů až působením rozpouštědla, např. HCl)
- Charakterizace disociace:

$$K_D = \frac{[A^+][B^-]}{[AB]} \quad \text{a} \quad \alpha = \frac{n_{dis}}{n_{AB}} = \frac{[A^+]}{C_{AB}} = \frac{[B^-]}{C_{AB}}$$

K_D značí rovnovážnou konstantu, α je stupeň disociace, n značí celkový počet původních a disociovaných částic a C_{AB} je počáteční koncentrace elektrolytu.

$$\Rightarrow K_D = \frac{C_{AB}\alpha^2}{1 - \alpha}$$

$\alpha \rightarrow 1$ silné elektrolyty

$\alpha \ll 1$ slabé elektrolyty

- Mechanismy vodivosti v pevných látkách jsou mnohem bohatší než u plynů a kapalin.
Vysvětlení pomocí pásové teorie (kvantová teorie)

Klasický pohled:

- Model volných elektronů (viz. Fyzika I)
- Pohyb elektronů: a) difuzní pohyb (tepelný). Není usměrněný
b) driftový pohyb (proti směru vnějšího el. pole)
- Charakterizace el. proudu:

$$v_d = \frac{eE}{m_e} \tau, \quad \frac{eE}{m_e} = \mu$$

v_d je driftová rychlost, E je intenzita el. pole, τ je střední doba mezi srážkami a μ je pohyblivost elektronů.

- Ohmův zákon v diferenciálním tvaru:

$$J = env_d = \frac{e^2 n E}{m_e} \tau = \sigma E, \quad \frac{e^2 n \tau}{m_e} = \sigma$$

J je hustota el. proudu a σ je měrná vodivost

- Schrödingerova rovnice pro systém elektronů v ideálním krystalu (adiabatická aproximace):

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \sum_j \Delta_j \psi + \sum_j U_j(r) \psi + \frac{1}{2} \sum_{j,k} \frac{e}{4\pi\epsilon_0 |r_j - r_k|} = W\psi, \quad j \neq k$$

První člen - kin. energii elektronů.

Druhý člen - potenciální energie elektronů v poli jader

Třetí člen - Celková vzájemná potenciální energie elektronů

➡ Zanedbali jsme pohyb jader a jejich potenciální energii. I tak **analyticky neřešitelné**.

- První zjednodušení: Předpoklad průměrného pole (U_0)

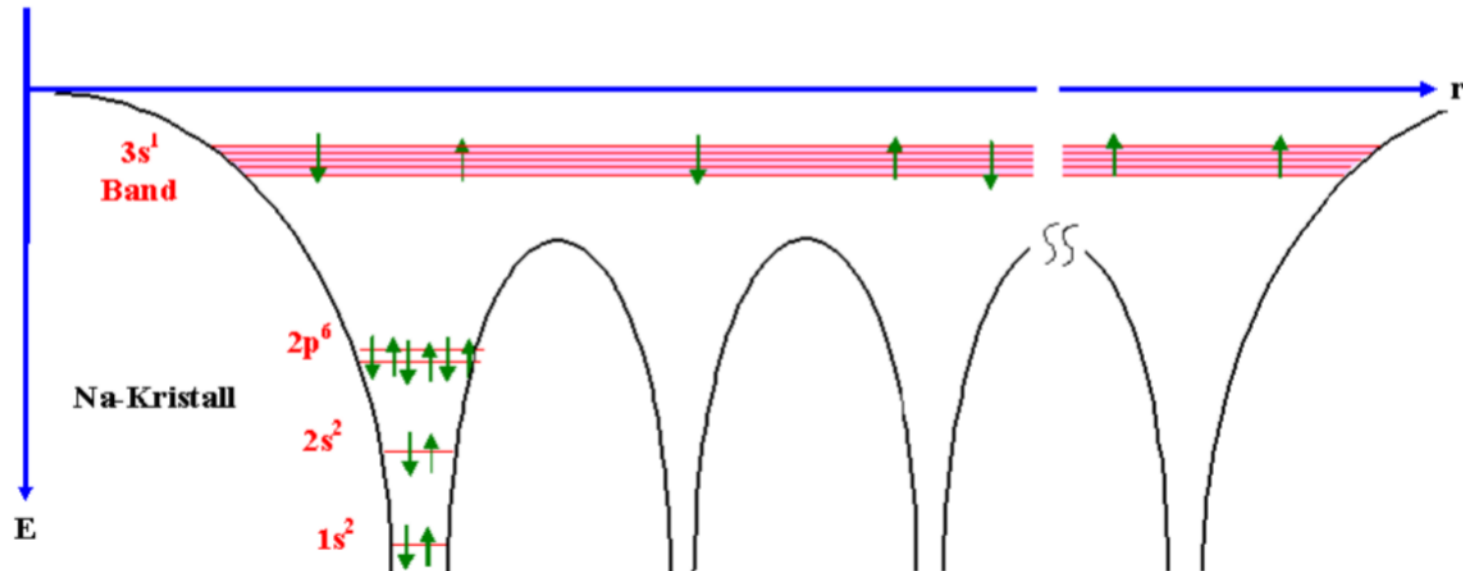
➡ Rozpad na N stejných rovnic (jednoelektronová aproximace):

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \psi + U(r) \psi + U_0 \psi = E \psi,$$

➡ **Stále analyticky neřešitelné**. Nutnost znalosti $U(r)$.

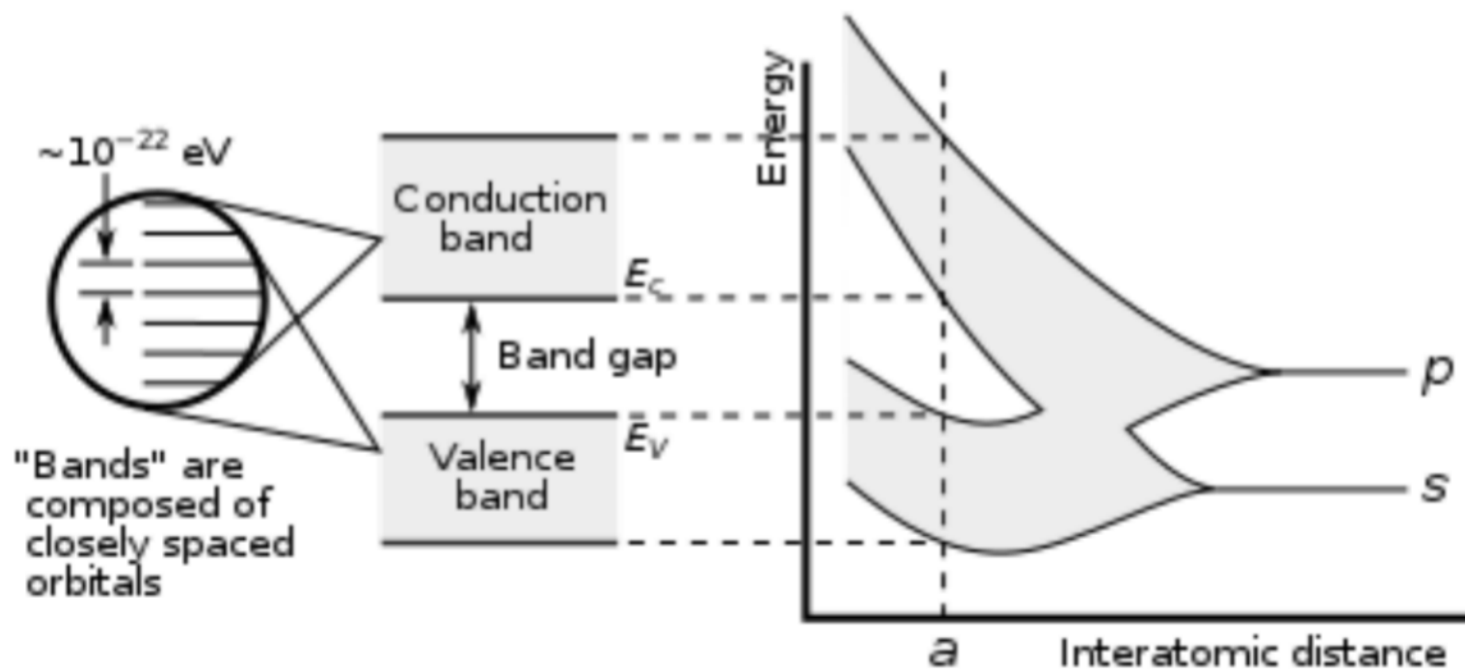
- Druhé zjednodušení: a) Sommerfeldova metoda – $U(r) = \text{konst.}$ (pontenciálová jáma)
b) Blochova metoda – $U(r)$ periodická s periodou mřížky 
- Výsledek: Jednotlivé vlnové funkce elektronů se překrývají

➔ vznik pásů!



- Druhé zjednodušení: a) Sommerfeldova metoda – $U(r) = \text{konst.}$ (pontenciálová jáma)
b) Blochova metoda – $U(r)$ periodická s periodou mřížky 
- Výsledek: Jednotlivé vlnové funkce elektronů se překrývají

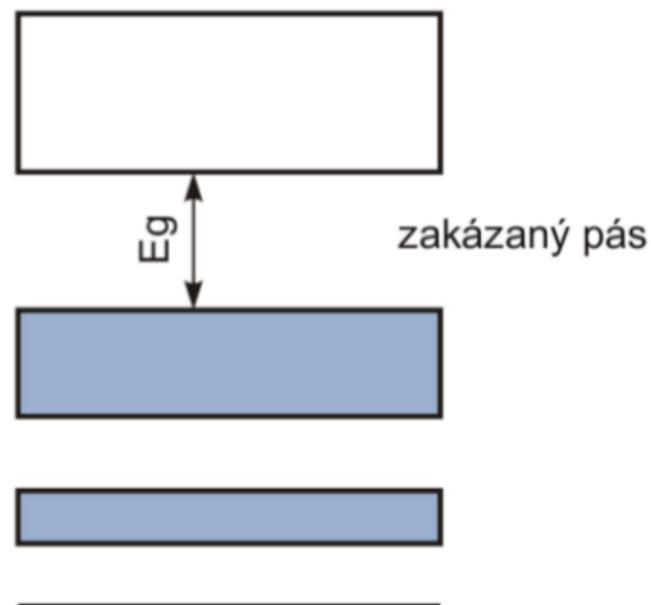
➔ vznik pásů!



- Látky, které nevedou elektrický proud po přiložení napětí ($\sigma < 10^{-6} \text{ S/m}$)
- Poslední energetický pás je kompletně zaplněn nosiči náboje
- Látka navíc vykazuje široký zakázaný pás (E_g)

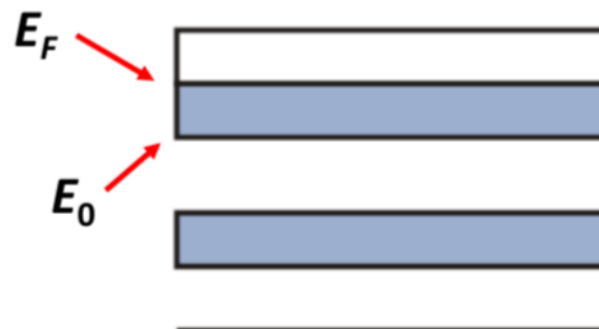
např.: Diamant $E_g = 5,5 \text{ eV}$

$\text{SiO}_2 = 9 \text{ eV}$



- Látky, které po přiložení napětí vedou elektrický proud ($\sigma > 10^6 \text{ S/m}$)
- Nejvyšší obsazená hladina energie se nachází v blízkosti středu pásu
- Důležité pojmy a charakterizace stavů:

a) Fermiho energie (hladina) – E_F (poslední el. při $T = 0\text{K}$)



- Látky, které po přiložení napětí vedou elektrický proud ($\sigma > 10^6 \text{ S/m}$)
- Nejvyšší obsazená hladina energie se nachází v blízkosti středu pásu
- Důležité pojmy a charakterizace stavů:

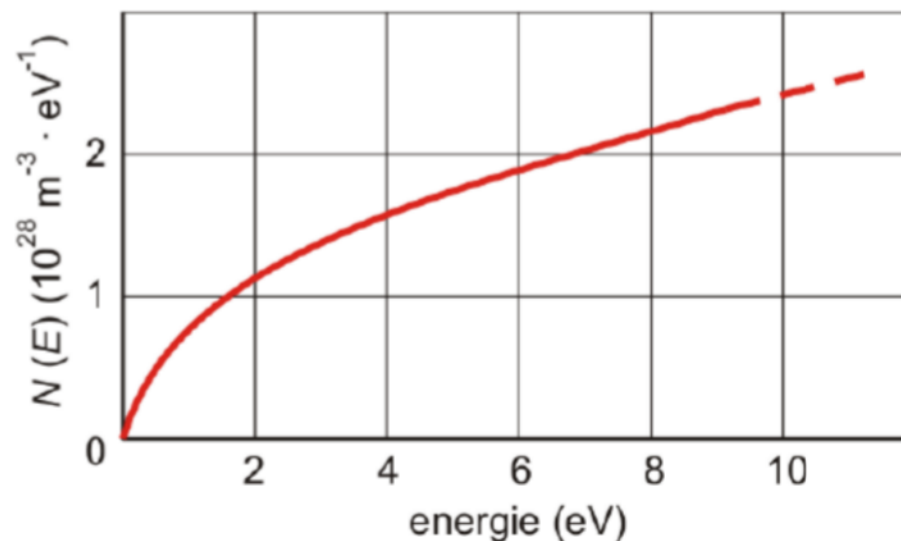
a) Fermiho energie (hladina) – E_F (poslední el. při $T = 0\text{K}$)

b) Hustota stavů v kovu $N(E)$:

$$N(E) = \frac{8\sqrt{2m^*} \pi}{h^3} E^{\frac{1}{2}}$$

m^* je efektivní hmotnost elektronu

$$m^* = 0,01 - 10 m_e$$

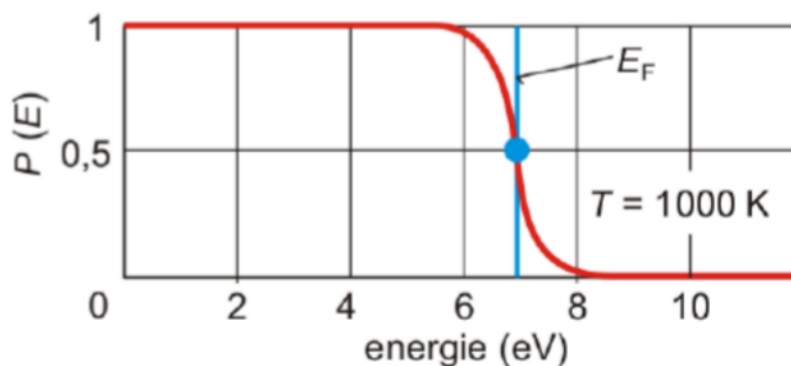
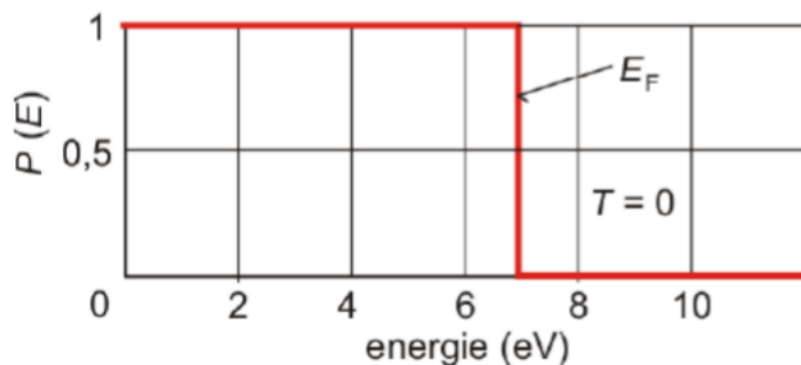


c) Pravděpodobnost obsazení hladin $P(E)$:

➤ Electron, jako fermion, podléhá Fermi-Diracově statistice:

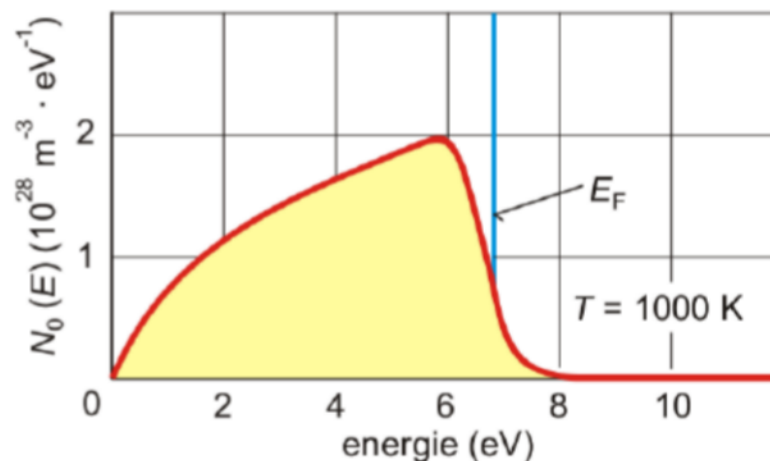
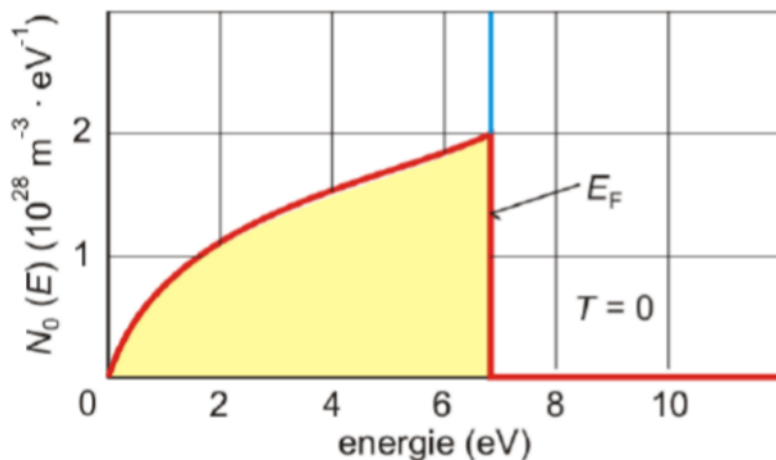
$$P(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_F}{k_b T}\right) + 1}$$

k_b je Boltzmannova konstanta ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K)



d) Hustota obsazený stavů $N_0(E)$:

$$N_0(E) = N(E)P(E)$$



➡ Zásadní význam pro vedení elektrického proudu látkou

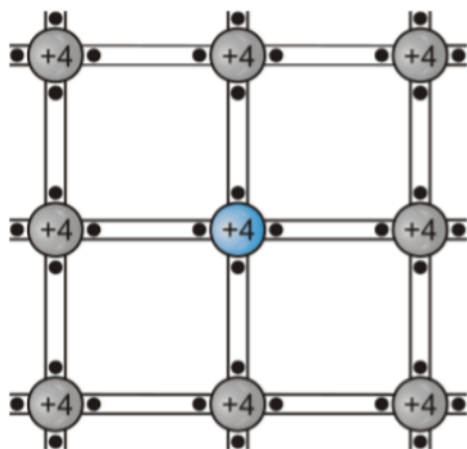
- Pásová struktura je u polovodičů obdobná jako u izolantů. Zakázaný pás je však užší
- Poslední zaplněný pás (valenční) a první neobsazený (vodivostní)
- Vodivost díky elektronům a kvazičásticím dírám. Jejich excitace:
 - a) tepelná přes zakázaný pás (~ 25 meV, málo efektivní)
 - b) dotováním

Koncentrace elektronů je v polovodičích mnohem nižší než u kovů.

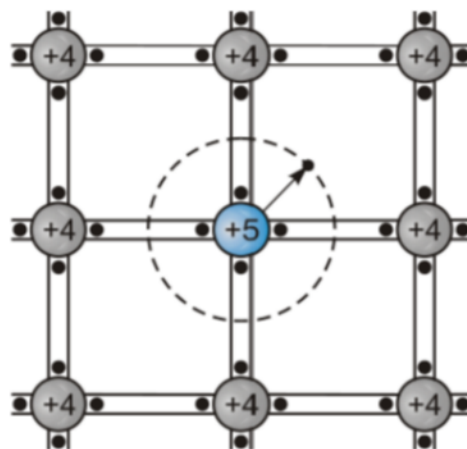
- Teplotní součinitel α :
 - a) u kovů kladný (el. odpor roste s teplotou)
 - b) u polovodičů záporný (el. odpor klesá s teplotou)

Dotování: Metoda zvyšování vodivosti polovodičů

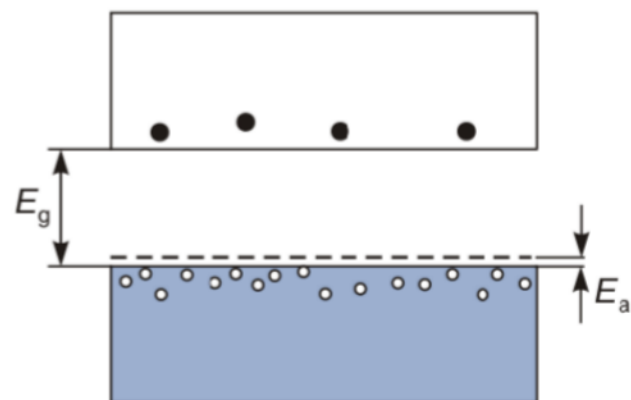
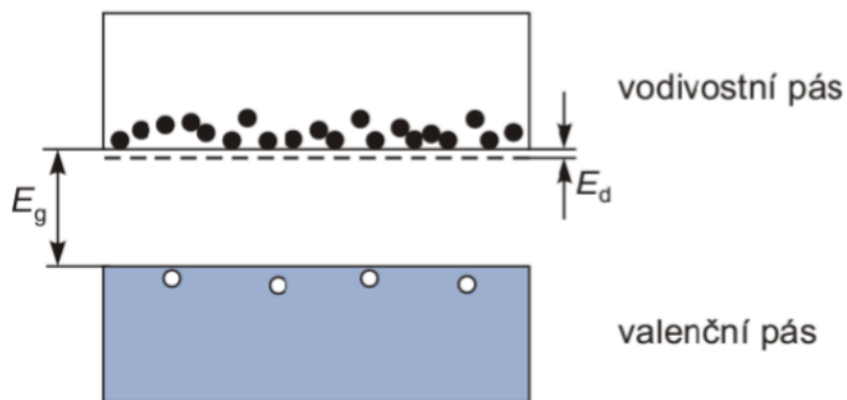
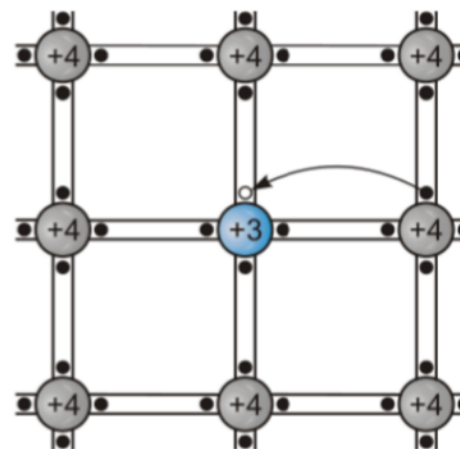
Neutrální polovodič



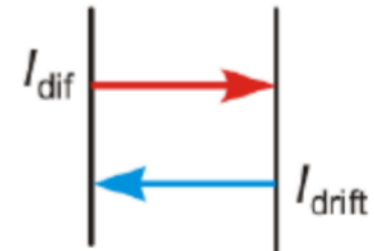
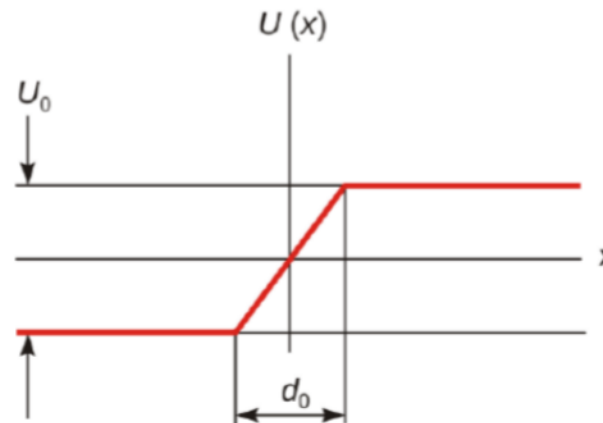
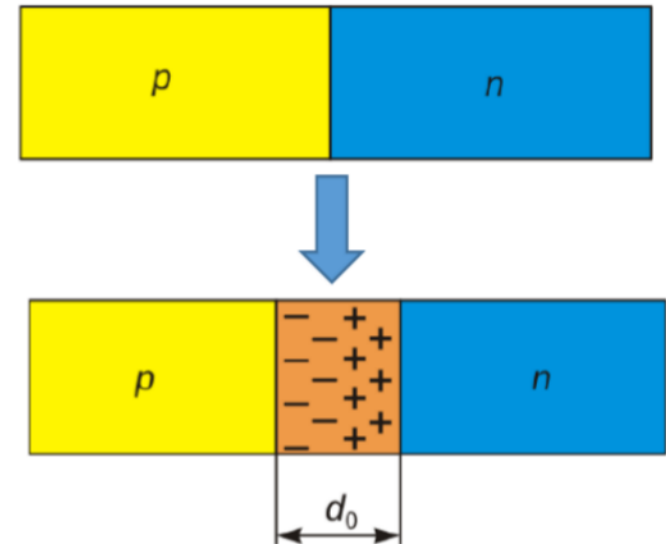
n typ – donor el.



p typ – akceptor el.



- Kontakt polovodiče n a p
 - ➡ Vznik difuzních proudů (majoritní nosič)
- Vznik ochuzené vrstvy (bez volného náboje)
- Vznik kontaktního napětí U_0 :
 - a) blokuje pohyb majoritních nosičů
 - b) umožňuje drift minoritních nosičů
- Bez vnějšího napětí: $I_{\text{drift}} = I_{\text{dif}}$

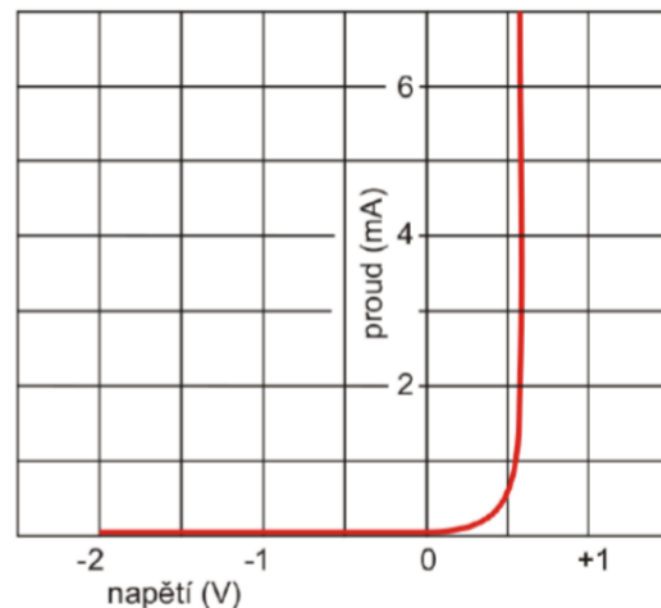
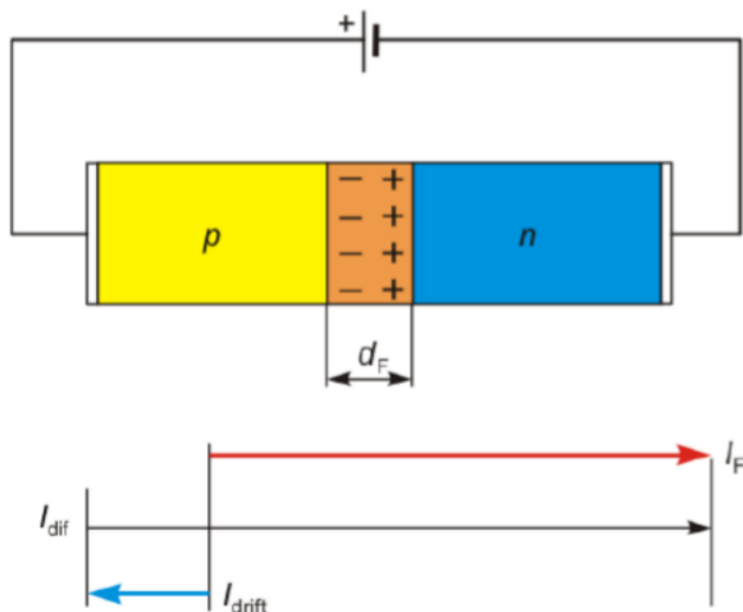


➤ Po přiložení vnějšího pole:

Propustný směr (+ na *p* typ)

(Stimuluje pohyb majoritních nosičů)

- Snížení tloušťky ochuzené vrstvy
- Převládne difuzní proud (vysoké hodnoty)



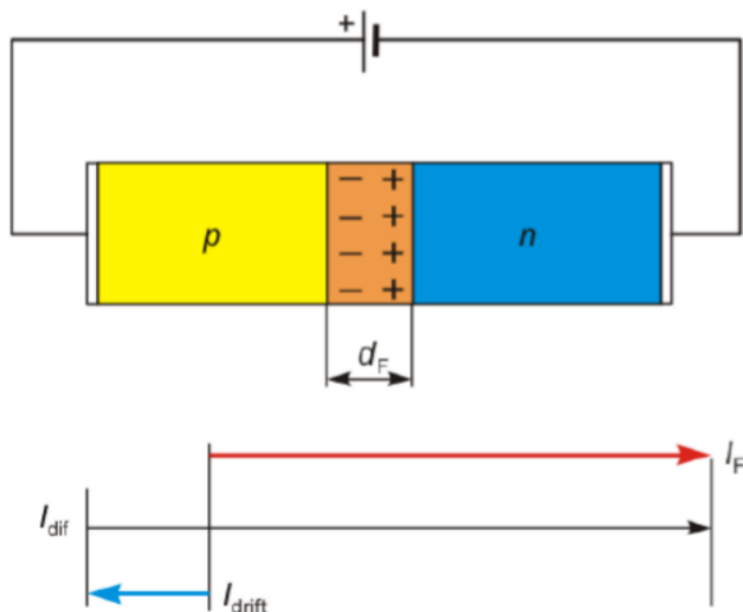
← závěrný směr | → propustný směr

➤ Po přiložení vnějšího pole:

Propustný směr (+ na p typ)

(Stimuluje pohyb majoritních nosičů)

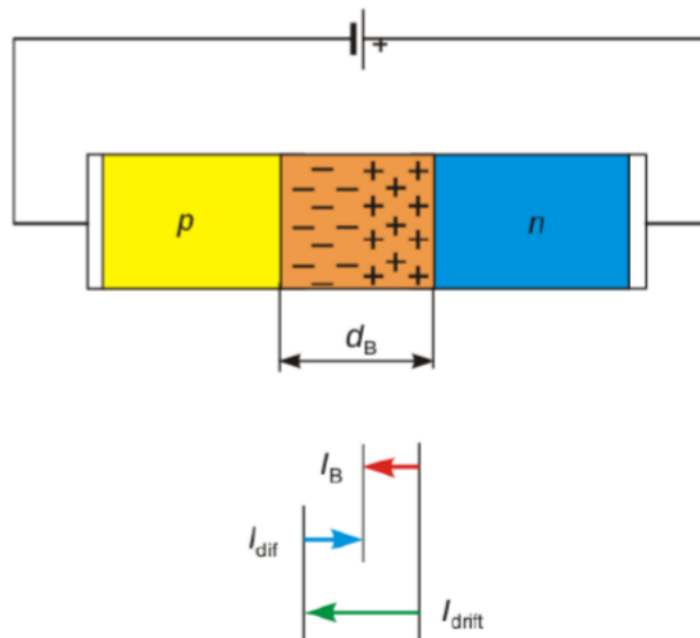
- Snížení tloušťky ochuzené vrstvy
- Převládne difuzní proud (vysoké hodnoty)



Závěrný směr (+ na n typ)

(Stimuluje pohyb minoritních nosičů)

- Rozšíření tloušťky ochuzené vrstvy
- Převládne driftový proud (mízné hodnoty)



- Kontakt kov je jeden ze základních stavebních kamenů elektroniky. Při kontaktu těchto materiálů mohou nastat následující situace:

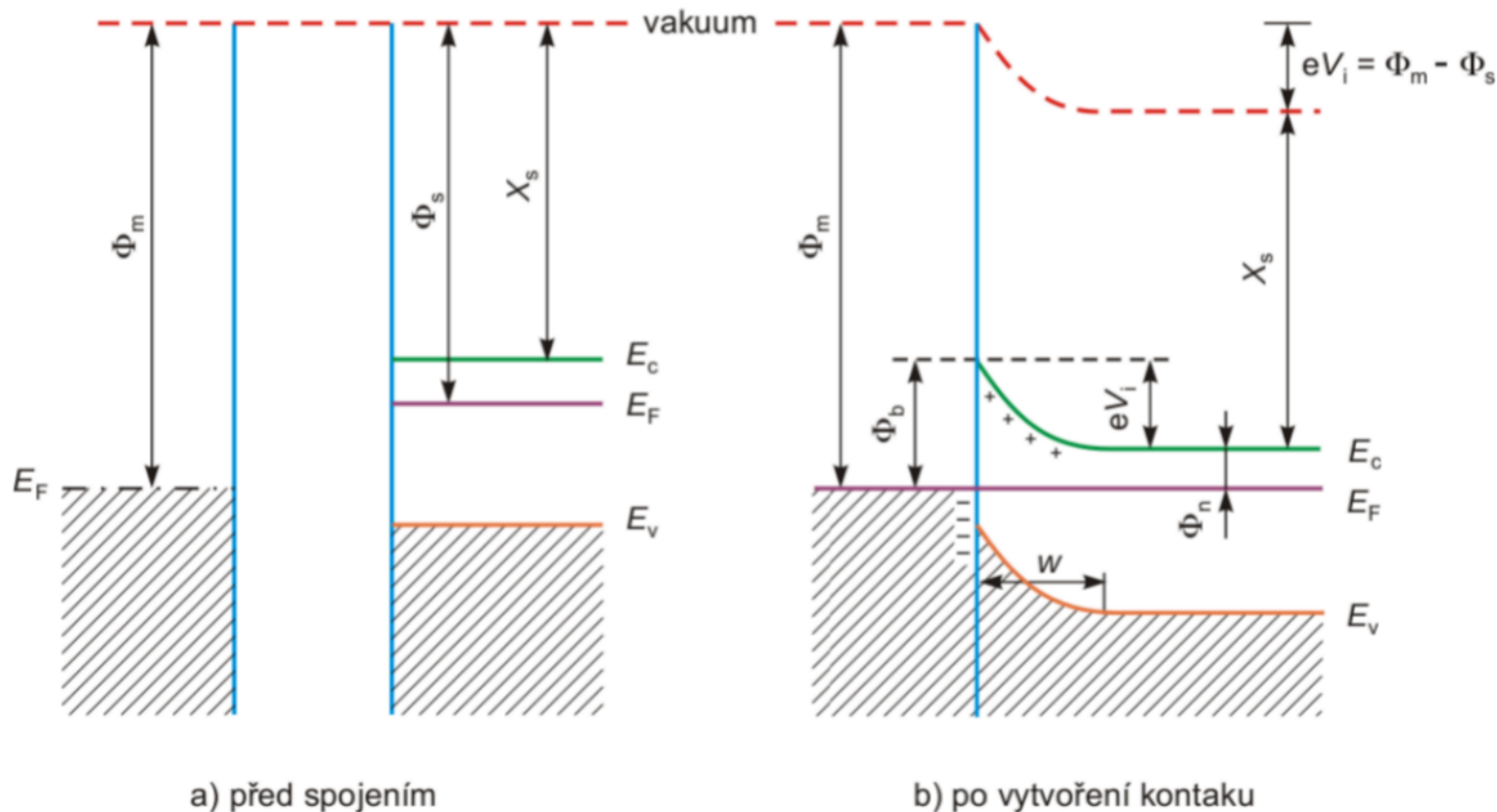
a) Vznik ohmického kontaktu: malý odpor a lineární V-A závislost

b) Vznik Schottkyho kontaktu: usměrňovací kontakt

➡ Která situace nastane je závislé na dotování polovodiče a poměru výstupních prací kovu ϕ_m a polovodiče ϕ_s

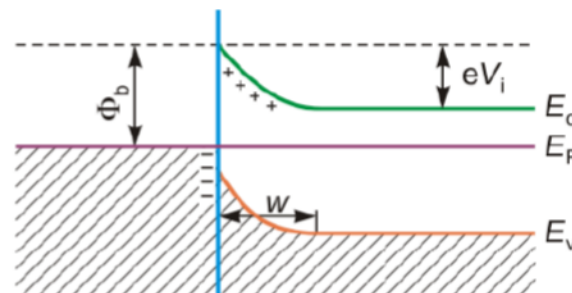
1. Kontakt kov a n -typový polovodič a $\phi_m > \phi_s$ (Schottkyho kontakt)

Bez přiloženého napětí



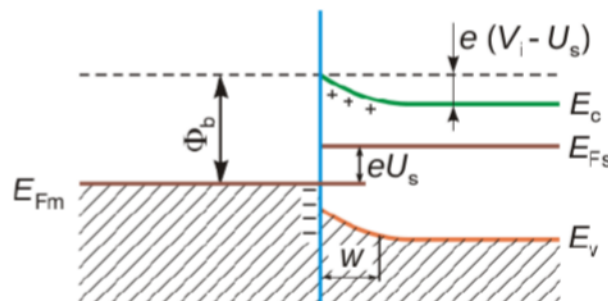
1. Kontakt kov a n -typový polovodič a $\phi_m > \phi_s$ (Schottkyho kontakt)

a) V termodynamické rovnováze



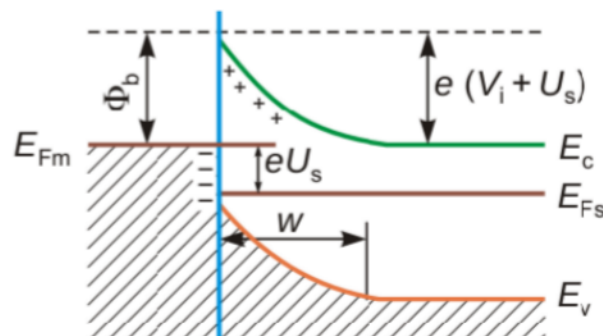
b) Vnější napětí v propustném směru

- + přiloženo na kov
- snížení bariéry na rozhraní
- teče proud z polovodiče do kovu



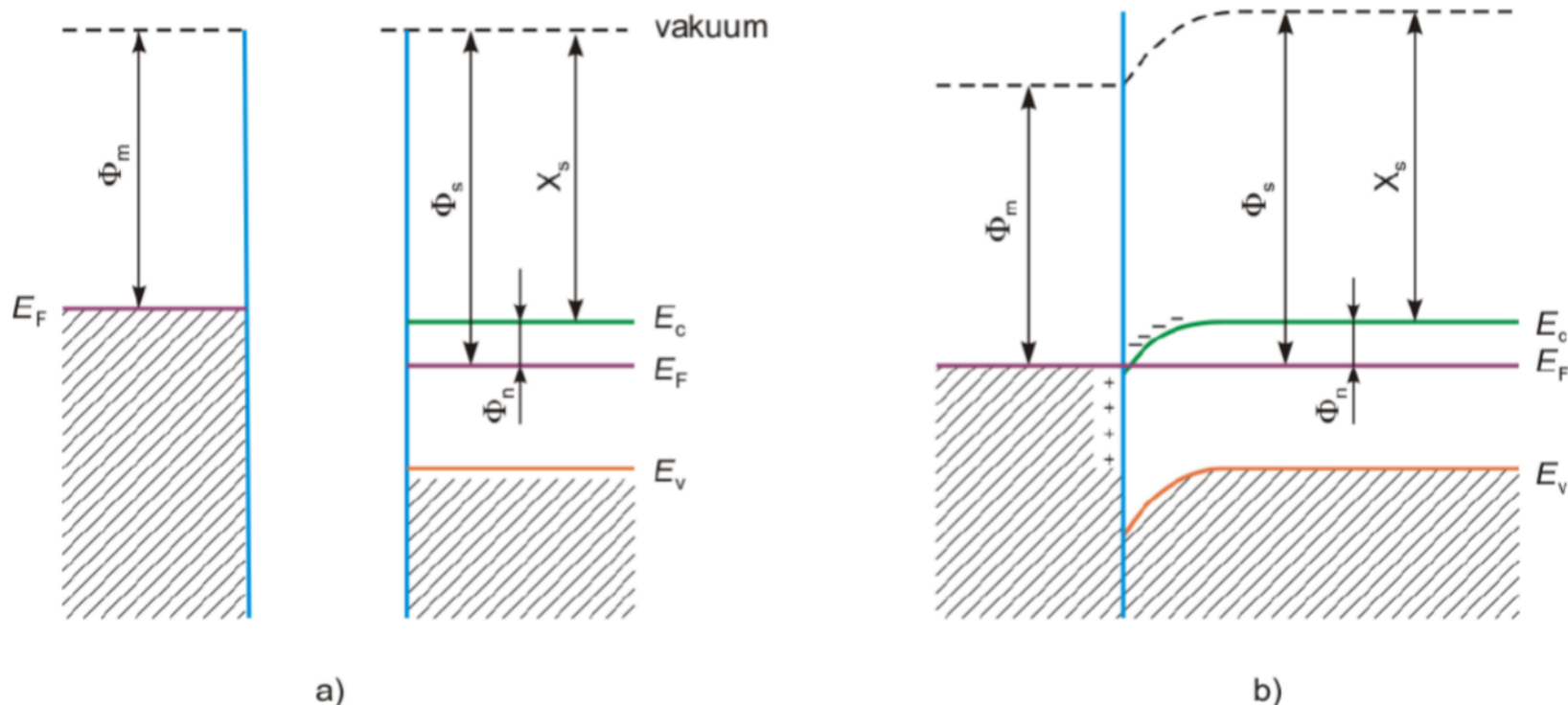
c) Vnější napětí v závěrném směru

- + přiloženo na polovodič
- rozšíření bariéry na rozhraní
- teče malý proud z kovu do polovodiče



2. Kontakt kov a n -typový polovodič a $\phi_m < \phi_s$ (Ohmický kontakt)

Bez přiloženého napětí



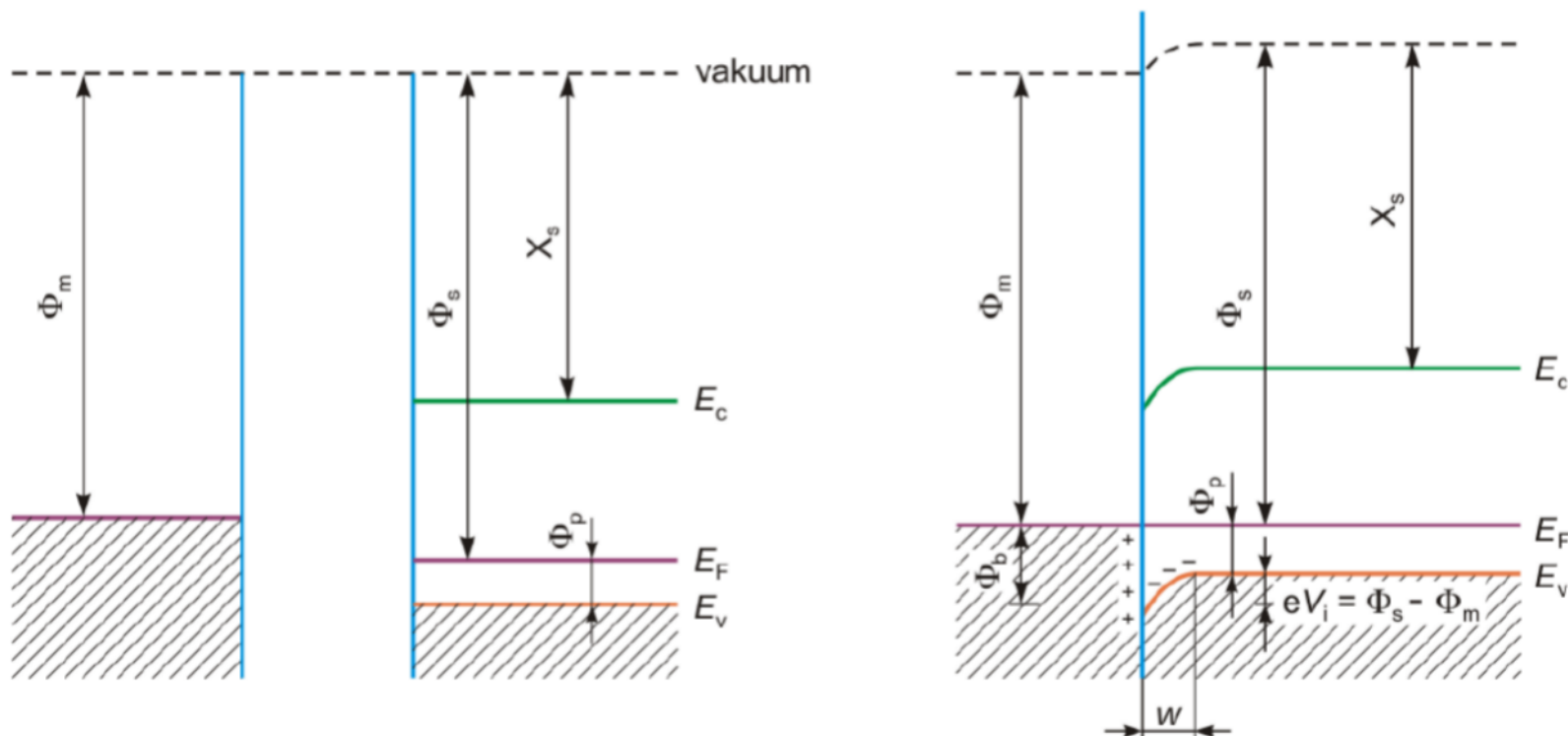
Neexistuje potenciálová bariéra ani v jednom směru



Vede proud bez ohledu
na polaritě zdroje

2. Kontakt kov a p -typový polovodič a $\phi_m < \phi_s$ (Schottkyho kontakt)

Bez přiloženého napětí



A opravdová přednáška může začít!

Děkuji za pozornost

Autorská práva/copyright

Uveřejněné materiály jsou určeny studentům Vysoké školy chemicko-technologické v Praze jako studijní materiál. Některá textová i obrazová data v nich obsažená jsou převzata z veřejných zdrojů. V případě nedostatečných citací nebylo cílem autora/ů záměrně poškodit event. autora/y původního díla. S eventuálními výhradami se prosím obračejte na autora/y konkrétního výukového materiálu, aby bylo možné zjednat nápravu.

The published materials are intended for students of the University of Chemistry and Technology, Prague as a study material. Some text and image data contained therein are taken from public sources. In the case of insufficient quotations, the author's intention was not to intentionally infringe the possible author(s) rights to the original work. If you have any reservations, please contact the author(s) of the specific teaching material in order to remedy the situation.



Fyzika III

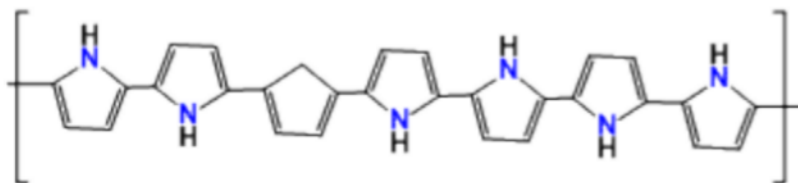
Pohodlně se usad'te

Přednáška co nevidět začne!

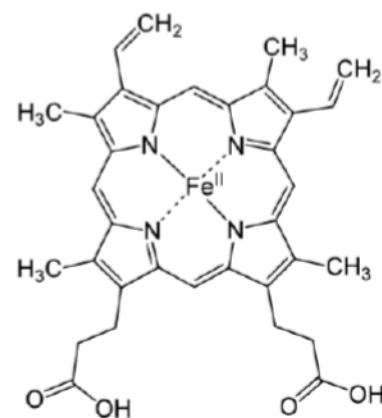
Mechanismus vodivosti organických látek



- Měrná vodivost organických látek je závislá na mnoha parametrech (stupeň protonace řetězce, úroveň dotace, morfologie atd.) – PANI $\sim \pm 8$ řádů
- Složité popsat obecně  Vymezíme se na:
 - a) Látky nacházející se v pevném skupenství
 - b) Jednosložkové systémy (chemicky čisté)
 - c) Objekty tvořené konjugovanými systémy dvojných vazeb (van der Waalsovy síly) (ftalocyaniny, porfyriny, vodivé polymery)
- Struktura:
 - a) Molekulární krystaly (10^6 nm)
 - b) Amorfní (uspořádání do 10 nm)



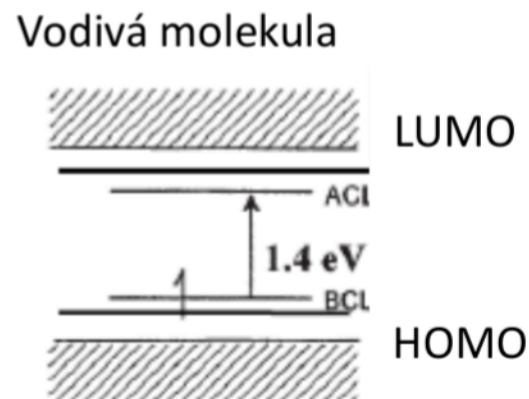
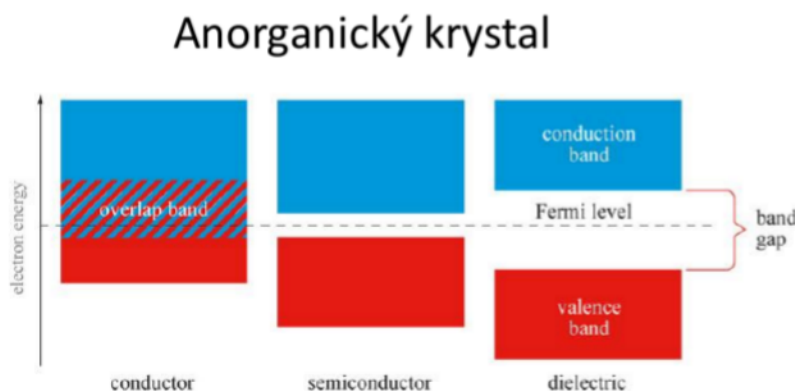
Polypyrrol



Porfyrin – hem B



- Obecný pohled – organické látky jsou izolanty
- První vodivý polymer 1840 (PANI). Vodivý 60. léta 20 století (Polyacetilen, 2000 NP)
- **Specifikace vodivých molekul:**
 - a) Konjugovaný systém (π vazby – snadná polarizace, migrace nosičů náboje)
 - b) Konjugace vede i k symetriím a planarnosti molekul.
 - c) Slabé van der Waalsovy síly (nemají směrový charakter) ➡ molekulární krystaly.
 - d) Nízký překryv atomárních orbitalů ➡ nízká pohyblivost, velké bariéry



- Kondukční proud – přítomnost volných nosičů náboje
- Posuvný proud – kmitání nosičů náboje kolem rovnovážných poloh

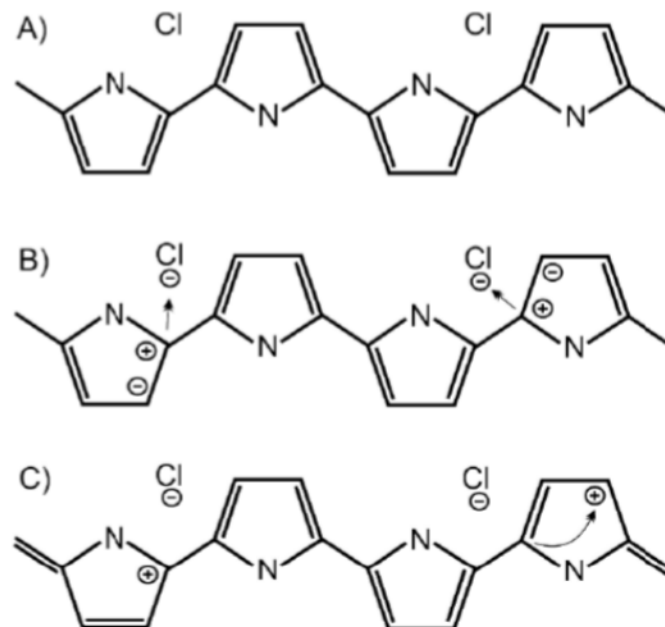
1. Ionty

- Vznik: disociací neutrálních molekul.
- Velikostně se jedná od malých atomů až po aniony organických kyselin
- Zásadní význam u vodivých polymerů



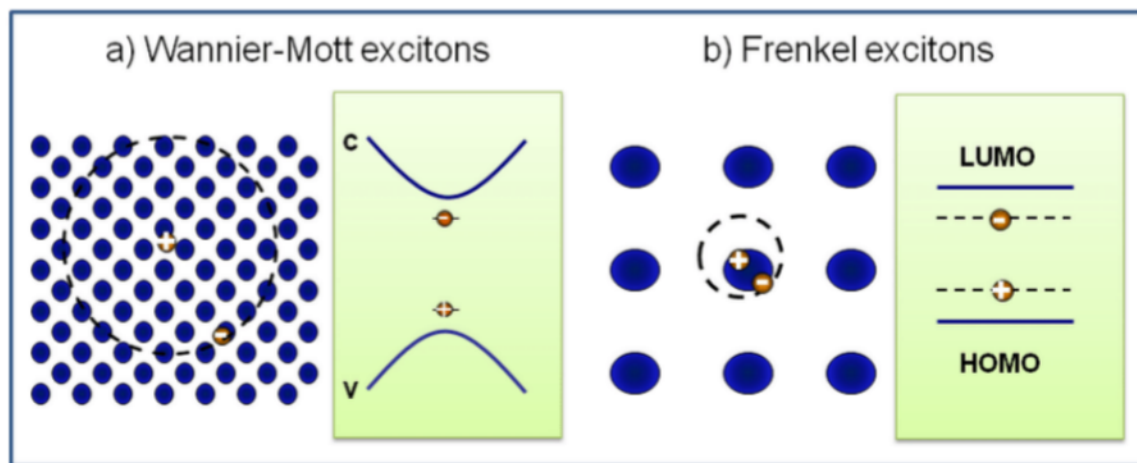
Vede k děrové vodivosti (polarony)

- Význam pro zvyšování krystalinity



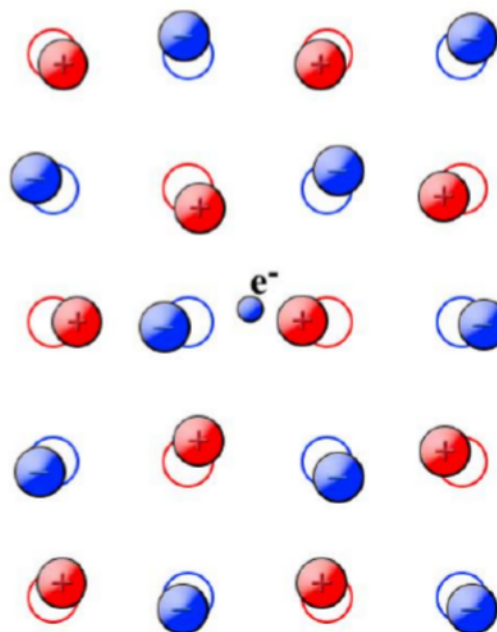
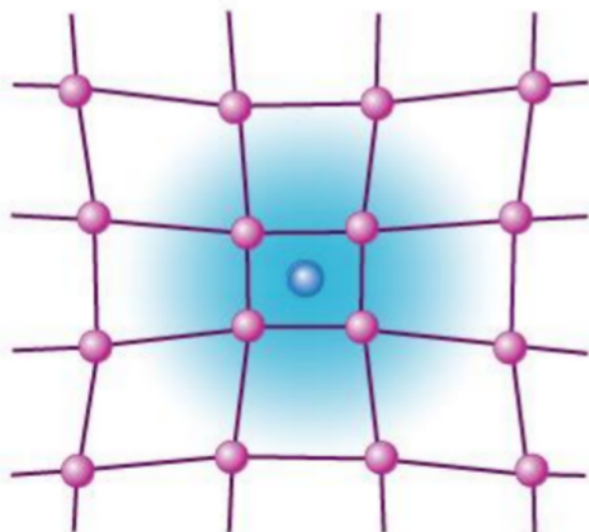
2. Intra- a inter-molekulární excitony

- Elektroneutrální kvazičástice vzniklé coulombickou interakcí záporné a kladné složky
 - a) intramolekulární – v rámci jedné molekuly (např. Fulleren)
 - b) intermolekulární – přes dvě molekuly (např. lineární řetězce vod. Polymerů (VD))
- Dva typy excitonů:
 - a) Frenkelův exciton (ϵ_r malé, $E_b = 0,1 - 1$ eV, silná vazba, malá vzdálenost)
 - b) Wannier-Mott exciton (ϵ_r velké, $E_b = 0,01 - 0,1$ eV, slabá vazba, velké vzdálenost)



3. Polarony

- Kvazičástice vzniklá jako vázaný stav nosiče náboje a interakce mřížky (fononu)
- Pohybem elektronu/díry mřížkou dochází k vychylování těžiště náboje v okolí (jakoby jej doprovázel nosič opačného náboje (především v uspořádaných organických látkách))
- Předpovězeny teoreticky z pásové teorie – stabilní stav v zakázaném pásu



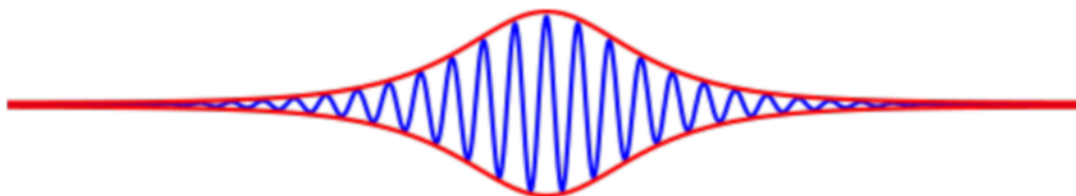
4. Migrující lokalizované iontové stavy

- Mají charakter iontů, ale slouží k přenosu náboje elektronickým mechanismem
- Molekuly vykazující vysokou afinitu (přeskoky elektronů mezi centry)
- Aktivováno většinou absorpcí fononu
- Tento mechanismus označován: přeskoky na proměnnou vzdálenost
- Na rozdíl od polaronů není nutná krystalická struktura. Jen blízké vzdálenosti center



5. Solitony

- Kvazičástice jejíž existence doposud není obecně přijímaná
- Vlna, která má větší amplitudu než okolí.
- Nedochází k deformaci jejího tvaru a ani se nesnižuje její amplituda (samozesilování)
- Tyto vlny mohou vést náboj (vodivost).
- Především 1D vodivé polymery (polyacetylen)



<https://www.youtube.com/watch?v=w-oDnvvV8mY>

6. Elektrony a díry

- Nízká uspořádanost a překryv atomárních orbitalů ➡ rozostření pásů a nízká pohyblivost

Obecně:

- Měrná vodivost je dána součtem přes všechny nosiče náboje

$$\sigma = \sum_i \mu_i q_i n_i$$

- Všechny parametry v rovnici mohou být závislé na uspořádání látky.

1. Iontová vodivost:

- Přenos volných iontů v materiálu ($q \pm 3e$ na nosič)
- Zdroje iontů: a) Ionizace polárních skupin
b) Nečistoty (např. rezidua polymerizačních katalyzátorů)
c) Vlhkost (autoprotolýza/disociace iontové funkční skupiny)
- Spojeno s přesunem velké hmoty. Zesiluje s teplotou a klesá s tlakem

$$\sigma_{ion} = \sum_{i \text{ druhy iontů}} (K_i n_i)^{1/2} q_i \mu_i \exp\left(-\frac{\Delta\omega_i}{2\varepsilon_r k_b T}\right)$$

- Relativní permitivita vody 81. Má tedy dominantní vliv na vodivost. $\Delta\omega_i$ Je bariera pro přeskok iontu

2. Pásová vodivost:

- Vysoce organizované krystalické látky s kovovou/kovalentní vazbou mezi atomy
- Střední volná dráha elektronů je větší než vzdálenost atomů (delokalizace elektronů)
- Vodivost závisí na (i) hustotě obsazení stavů a (ii) vzdálenosti pásů
- Koncentrace volných nosičů:

$$n = p = 2 \left(\frac{2\pi m^* k_b T}{h^2} \right)^{3/2} \exp \left(-\frac{\Delta E_g}{2k_b T} \right)$$

- Růst tlaku i teploty vede ke zvýšení vodivosti
- Teorii lze efektivně použít jen v případě dostatečného překryvu atomárních orbitalů v látce. Tzn. do $\mu > 1 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ (střední volná dráha na úrovni 1 nm)

3. Přeskoky mezi lokalizovanými stavy (hopping transport)

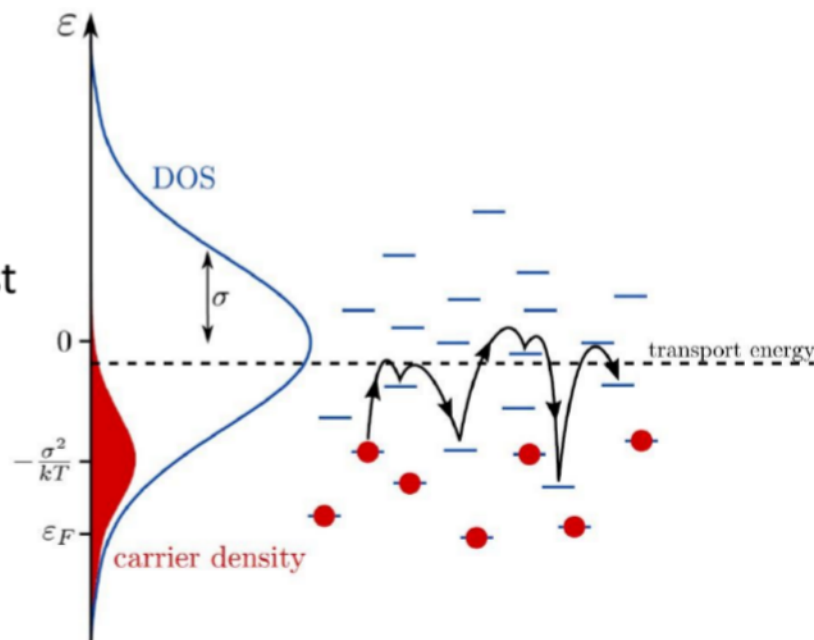
- Snížením překryvu atomárních orbitalů: lokalizace stavů, rozmývání hranic pásů a vznik nových stavů v zakázaném pásu.
- Pohyb nosičů jen jako přeskoky tepelně aktivovaných nosičů mezi lok. stavy:

$$\mu = \frac{eD}{k_b T}, \quad D = \frac{1}{2} v L^2$$

Kde D je efektivní difuzní koeficient, v je frekvence přeskoků a L je střední vzdálenost přeskoku

- L konst. = Arrheniovská závislost

$$\mu = \mu_0 \exp\left(-\frac{\Delta E_a^{\text{hopp}}}{k_b T}\right)$$



3. Přeskoky mezi lokalizovanými stavy (hopping transport)

- Snížením překryvu atomárních orbitalů: lokalizace stavů, rozmývání hranic pásů a vznik nových stavů v zakázaném pásu.
- Pohyb nosičů jen jako přeskoky tepelně aktivovaných nosičů mezi lok. stavy:

$$\mu = \frac{eD}{k_b T}, \quad D = \frac{1}{2} v L^2$$

Kde D je efektivní difuzní koeficient, v je frekvence přeskoků a L je střední vzdálenost přeskoku

- L konst. = Arrheniovska závislost

$$\mu = \mu_0 \exp\left(-\frac{\Delta E_a^{\text{hopp}}}{k_b T}\right)$$

- L proměnná = variable range hopping (VRH)

$$\mu = \mu_0 \exp\left(-\left(\frac{T_0}{T}\right)^{1/4}\right)$$

4. Excitonová vodivost

- Dominantní efekt při určení vodivosti u řady organických látek je disociace excitonů.
- Nejčastěji realizovaná přiložením silného elektrického pole.
- V podstatě se také jedné o přeskokový mechanismus.

$$\sigma = \sigma_0 \left[\frac{2 + \cosh\left(\beta_F \frac{E^{\frac{1}{2}}}{k_b T}\right)}{3} \right] \left[\frac{2k_b T}{\varepsilon_r \Delta E_a} \sinh\left(\frac{\varepsilon_r \Delta E_a}{k_b T}\right) \right]$$

Kde β_F je ionizační konstanta.

- Excitony mohou být ionizovány i opticky.

5. Kvantově-mechanické tunelování mezi vysoce uspořádanými doménami

- Především se uplatňuje v polykrystalických látkách (krystalické domény oddělené amorfni)

$$\sigma = \sigma_0 \exp \left[- \left(\frac{T_0}{T} \right)^{1/2} \right]$$

- V reálných organických látkách může probíhat všech 5 mechanismů.

Postup určování zainteresovaných mechanismů:

a) Teplotní závislost vodivosti

$$\log(\sigma) = f(T)$$

- $\sim 1/T$  pásová vodivost kovového typu
- $\sim -1/T$  pásová vodivost polovodičového typu (někdy i hopping)

b) Hodnota frakčního teplotního exponentu (mocnina u exponentu)

 Tunelování $\frac{1}{2}$, VRH $\frac{1}{4}$

Nejsložitější popsat jde excitonová vodivost, protože je závislá na přiloženém el. poli.
Měření je nutno provádět v širokém rozsahu teplot a bez vlivu okolí (tma, vakuum)

c) Důležité informace lze získat i pomocí impedanční spektroskopie (1. přednáška).

Efektivní odlišení iontové a elektronové vodivosti

- V reálných organických látkách může probíhat všech 5 mechanismů.

Postup určování zainteresovaných mechanismů:

a) Teplotní závislost vodivosti

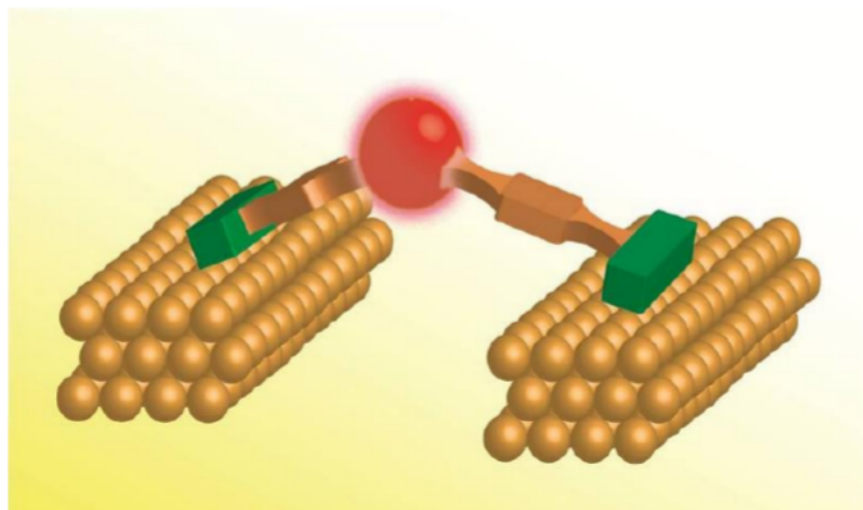
$$\log(\sigma) = f(T)$$

- $\sim 1/T$ ➡ pásová vodivost kovového typu
- $\sim -1/T$ ➡ pásová vodivost polovodičového typu (někdy i hopping)

Physical Property Measurement System (PPMS)



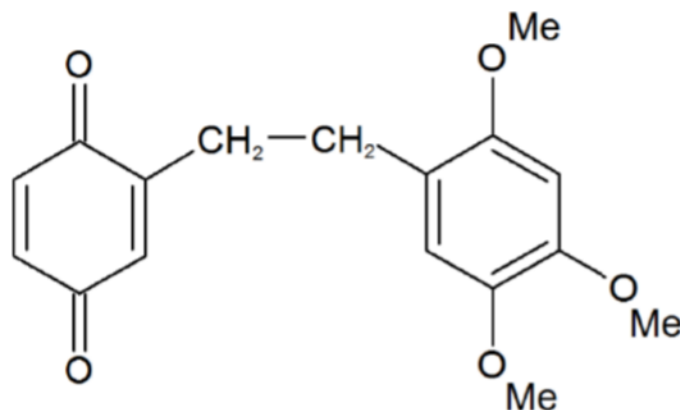
- Jedná se o elektronické součástky připravené na jedné organické molekule (bottom-up)
- Možnost přípravy součástek o velikosti 1 – 3 nm (teoretický limit).
- **Perspektiva:** Připravit zařízení přesně definované pro daný účel (např. rezistor, kapacitor, dioda) o rozměrech mnohem menší než křemíkovou technologií (vzdálenost 30-50 nm).
- **Nevýhody:** Silná disipace elektrické energie (buď tepelnou cestou nebo elektroluminiscence)



- První práce ukazující potenciál unimolekulární elektroniky - diody (70. léta) – Hemichinon

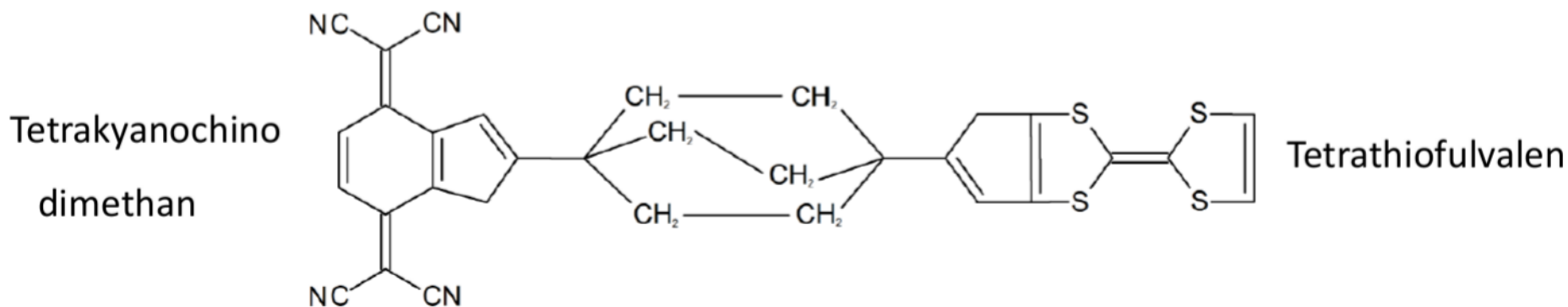
Akceptorový cyklus

Donorový cyklus



(A-σ-D) struktura Hemichinonu

Nevodivý kontakt



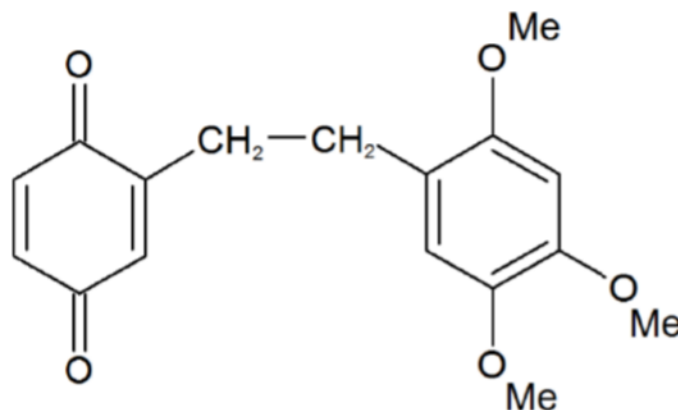
Tetrakyanochino
dimethan

Tetrathiofulvalen

- První práce ukazující potenciál unimolekulární elektroniky - diody (70. léta) – Hemichinon

Akceptorový cyklus

Donorový cyklus



(A-σ-D) struktura Hemichinonu

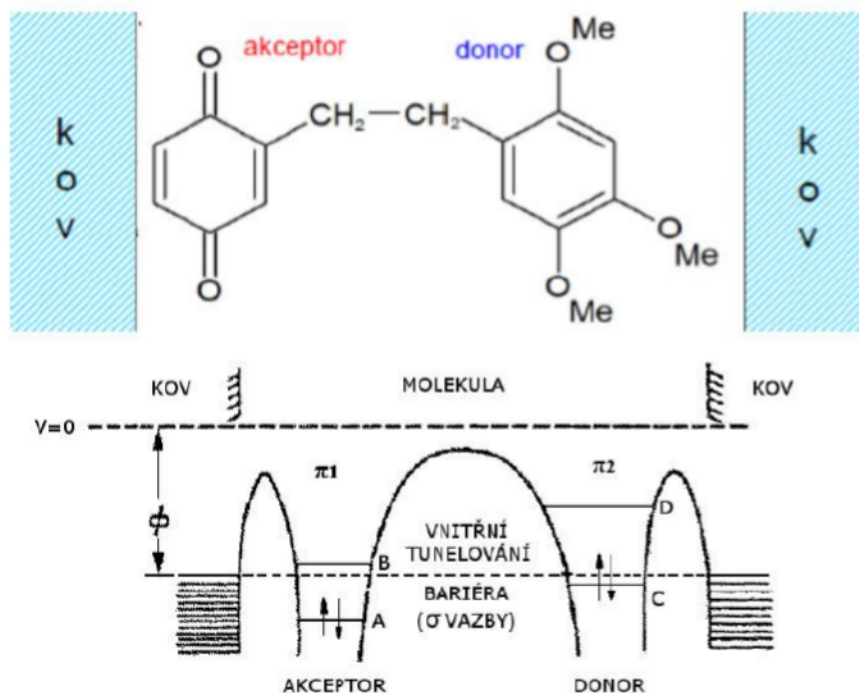
Nevodivý kontakt

- Míra komponent vystupovat jako akceptor/donor: el. afinita A_A /ionizační potenciál I_D
- Výhodou vysoká el. afinita a nízký ionizační potenciál.
- Z praktického hlediska složité určit A_A a I_D . Koopmansův teorém: $I_D = \text{HOMO}$, $A_A = -\text{LUMO}$
- V praxi: Nejvhodnější je specifický interval A_A a I_D (nutnost stability fragmentu molekul)

Princip fungování molekulárních diod

➤ Pro náš příklad předpokládejme kovové kontakty diody.

Bez napětí



Podmínky vedení proudu strukturou

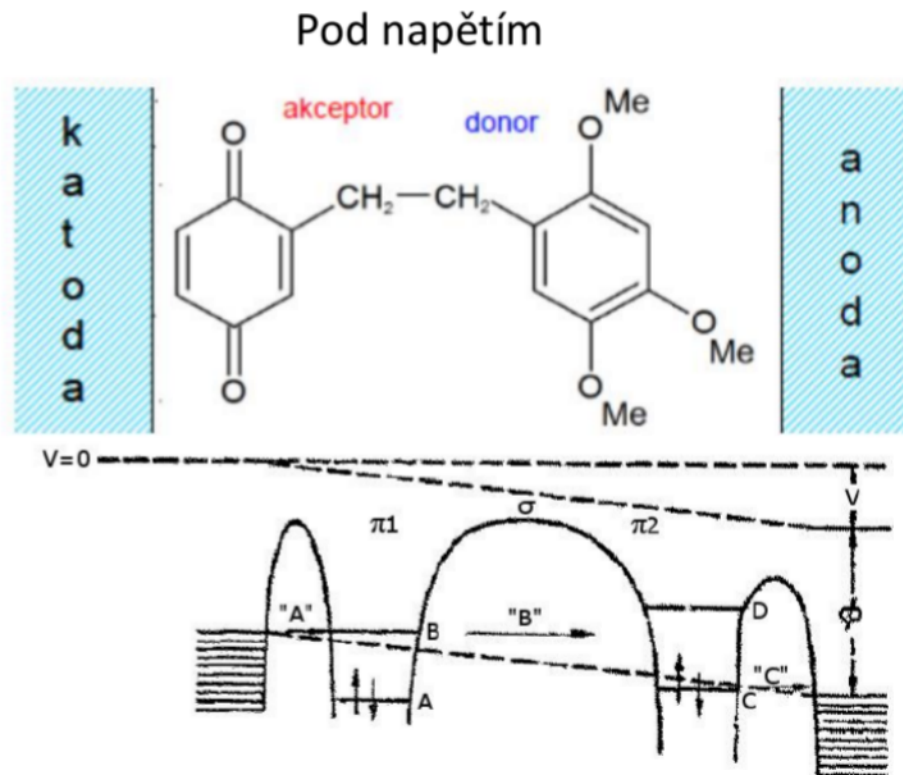
1. Alespoň částečně prázdná hladina E_B
2. Alespoň částečně zaplnění hladina E_C
3. $E_B > E_C$

Princip fungování molekulárních diod

➤ Pro náš příklad předpokládejme kovové kontakty diody.

Po přiložení napětí (propustný směr):

1. Hladina E_B přijme elektron z katody
2. Hladina E_C odevzdá elektron anodě
3. Vzniká silně polární excitovaný stav
 $A^- - \sigma - D^+$
4. Tunelování elektronu z E_B do E_C

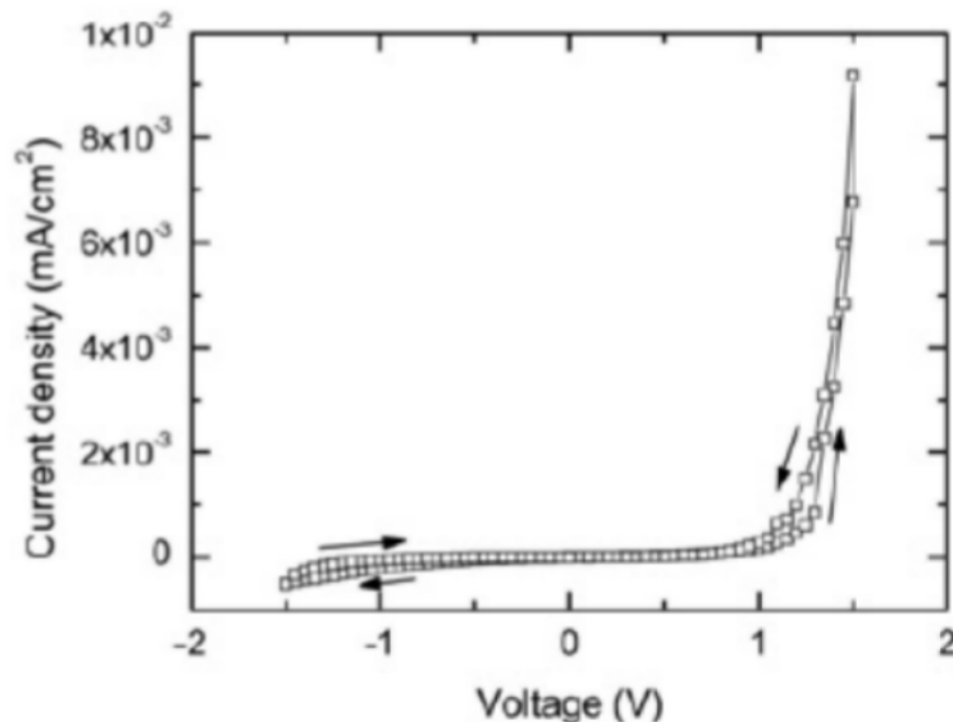


Princip fungování molekulárních diod

➤ Pro náš příklad předpokládejme kovové kontakty diody.

Po přiložení napětí (propustný směr):

1. Hladina E_B přijme elektron z katody
2. Hladina E_C odevzdá elektron anodě
3. Vzniká silně polární excitovaný stav
 $A^- - \sigma - D^+$
4. Tunelování elektronu z E_B do E_C



Usměrňovací účinky

➤ Výhody organických materiálů v elektronice:

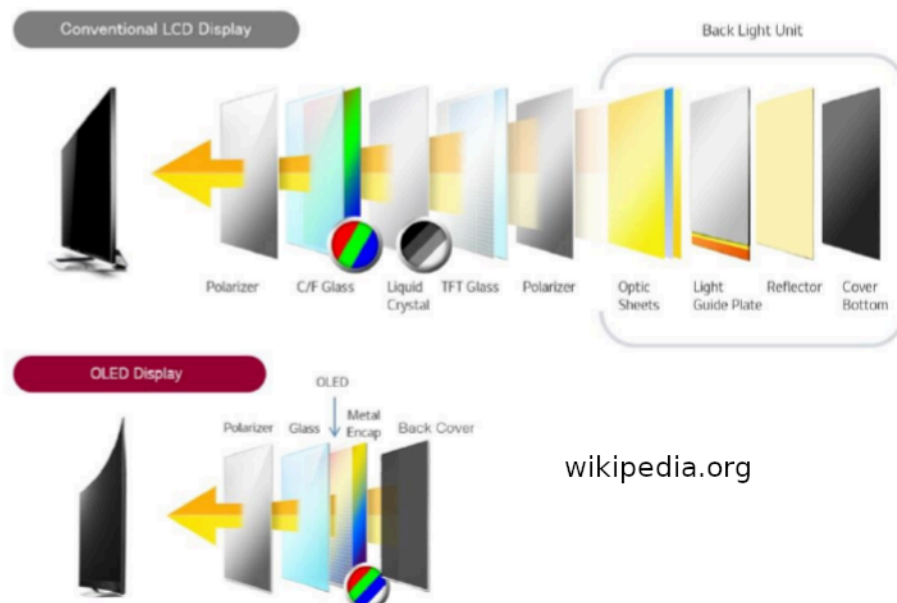
- a) Snadná depozice
- b) Variabilita v chemickém složení
- c) Možnost nanášet na flexibilní substráty
- d) Miniaturizace a cena

➤ Aktuálně nejvíce využívané v OLED a OPV

➤ Vlastnosti a omezení pro PV aplikace:

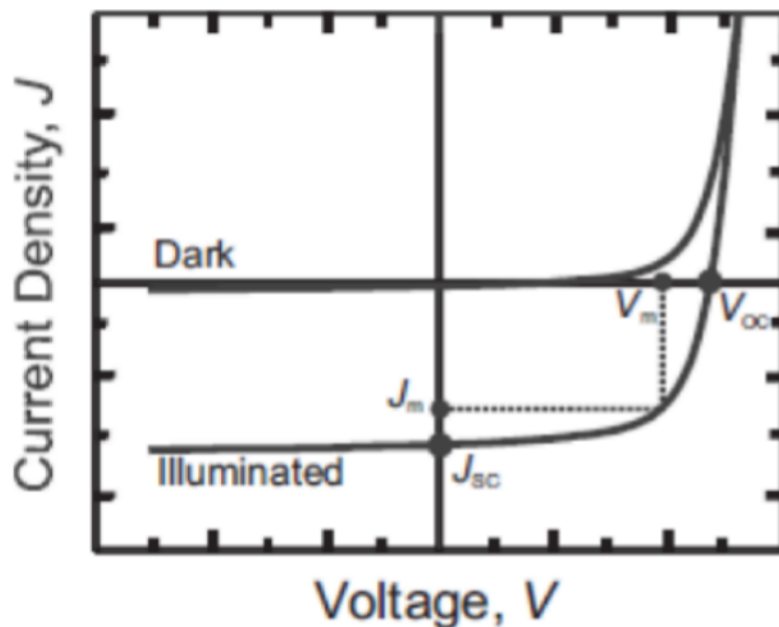
- a) Nutnost disociace excitonů
- b) Nízká difuzní délka ($< 40 \text{ nm}$)

➡ Heteropřechody



wikipedia.org

- Voltamperová závislost OPV (I-V)



$J_m V_m$ hodnoty odpovídající max. výkonu

V_{oc} napětí bez zátěže

J_{sc} proud ve zkratu

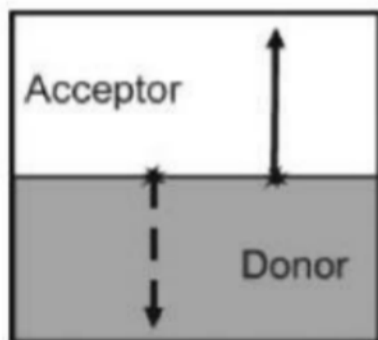
- Důležitý parametr PV: Filling faktor FF a účinnost článku:

$$FF = \frac{J_m V_m}{J_{sc} V_{oc}}$$

$$\eta_p = \frac{J_m V_m}{P_0} = \frac{J_{sc} V_{oc}}{P_0} FF$$

➤ Účinnosti PV dle konstrukce:

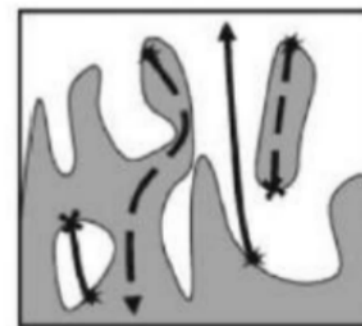
- a) 70. léta – 1 organická vrstva a elektrody $\sim 0,01 \%$ (disociace díky Schottkyho přechodu)
- b) 1986 – Po zavedení organické dvojvrstvy (akceptor/donor) $\sim 0,95 \%$
- c) Současnost – Sendvičové schéma (strukturní modifikace heteropřechodu) $\sim 12 \%$



(a)



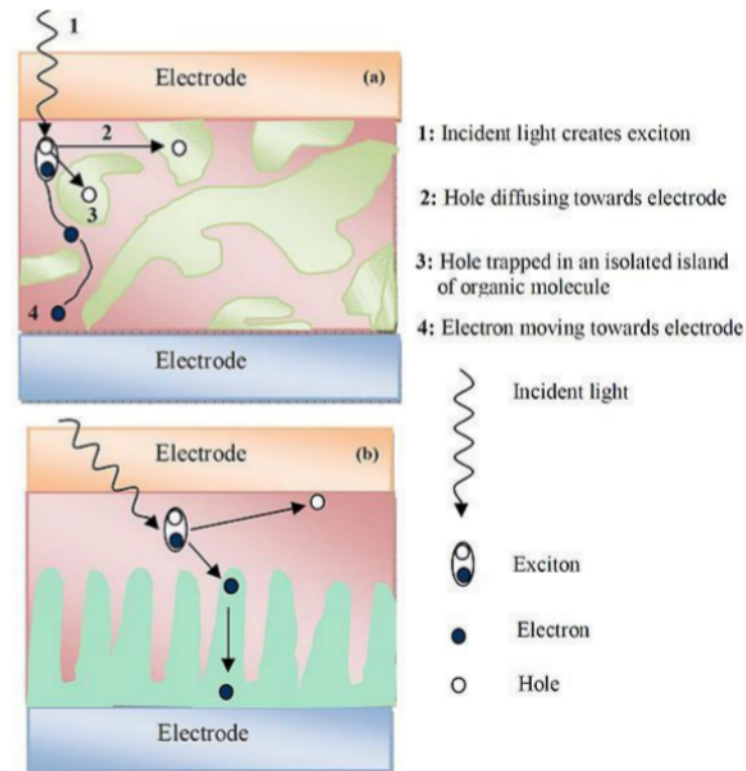
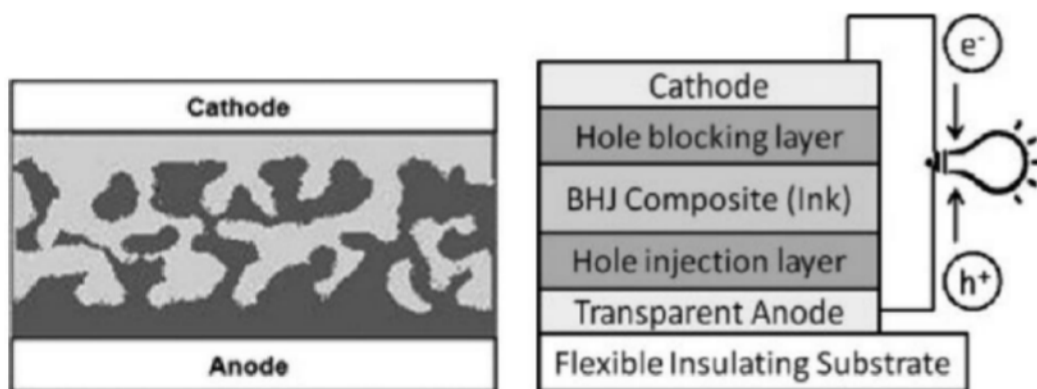
(b)



(c)

➤ Běžná konstrukce OPV

- a) Elektrody (jedna propustná – ITO – Indium Tin Oxide)
- b) Polovodičové vrstvy
- c) Bulkový heteropřechod



A opravdová přednáška může začít!

Děkuji za pozornost

Autorská práva/copyright

Uveřejněné materiály jsou určeny studentům Vysoké školy chemicko-technologické v Praze jako studijní materiál. Některá textová i obrazová data v nich obsažená jsou převzata z veřejných zdrojů. V případě nedostatečných citací nebylo cílem autora/ů záměrně poškodit event. autora/y původního díla. S eventuálními výhradami se prosím obračejte na autora/y konkrétního výukového materiálu, aby bylo možné zjednat nápravu.

The published materials are intended for students of the University of Chemistry and Technology, Prague as a study material. Some text and image data contained therein are taken from public sources. In the case of insufficient quotations, the author's intention was not to intentionally infringe the possible author(s) rights to the original work. If you have any reservations, please contact the author(s) of the specific teaching material in order to remedy the situation.



Fyzika III

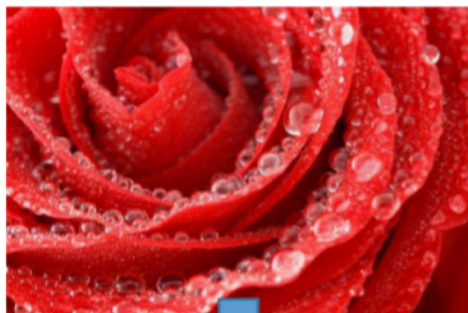
Pohodlně se usad'te

Přednáška co nevidět začne!

Princip vodivosti v nízkodimenzionálních strukturách



- Fyzikální vlastnosti makroskopických látek jsou jednoznačně určeny jejich chemickým složením a strukturou.
- Vliv struktury:



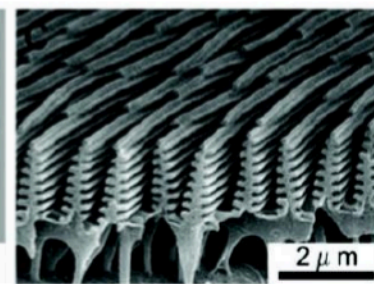
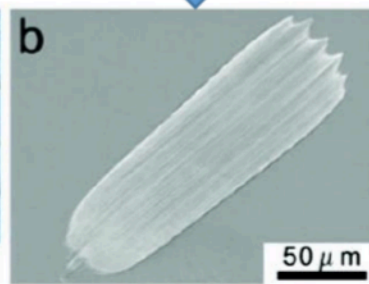
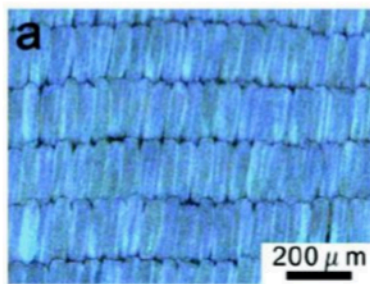
Květ růže

~10s μm



Křídlo
motýla

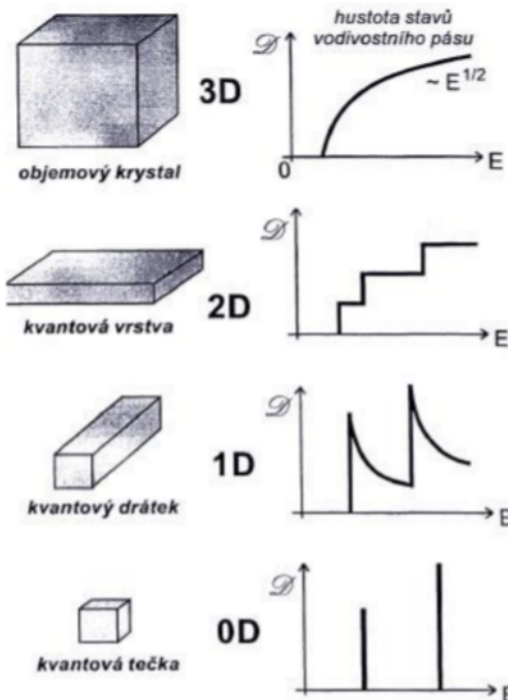
~ 100s nm



- Fyzikální vlastnosti makroskopických látek jsou jednoznačně určeny jejich chemickým složením a strukturou.

- $\sim 50 - 100 \text{ nm}$ (kritická velikost)  Zásadní modifikací vlastností + vznik nových:
 - a) **Efekt prostorového kvantování** (kvantování energií a dalších vlastností)
 - b) **Vysoký vliv povrchu** (povrchové atomy až 10tky procent)

- Dělení nízkodimenzionálních struktur:
 - a) **3D** (struktura není v žádném směru omezena pod kritickou velikost – objemová)
 - b) **2D** (omezena v jedno směru – kvantové vrstvy)
 - c) **1D** (omezena ve dvou směrech – kvantové dráty)
 - d) **0D** (omezena ve všech směrech – kvantové tečky)



Vliv kvantování na
hustoty stavů
elektronů

➤ Dělení nízkodimenzionálních struktur:

- a) **3D** (struktura není v žádném směru omezena pod kritickou velikost – objemová)
- b) **2D** (omezena v jedno směru – kvantové vrstvy)
- c) **1D** (omezena ve dvou směrech – kvantové dráty)
- d) **0D** (omezena ve všech směrech – kvantové tečky)

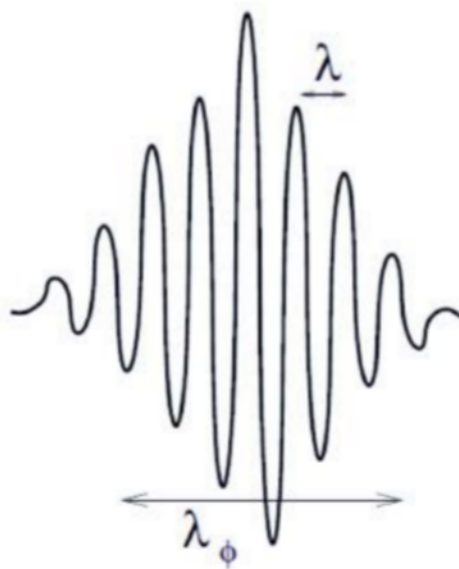
- Elektron někdy vykazuje vlnové a někdy částicové vlastnosti (vlnově-částicový charakter)



Kvantová popis: elektron charakterizován pomocí **vlnového balíku**

- Hlavní parametry vlnového balíku: a) vlnová délka majoritní vlny λ
b) koherenční délka λ_0

Chování elektronu je dáno srovnáním těchto parametrů s rozměry okolí



- Elektron někdy vykazuje vlnové a někdy částicové vlastnosti (vlnově-částicový charakter)



Kvantová popis: elektron charakterizován pomocí **vlnového balíku**

- Vlnová délka majoritní vlny λ : určuje, zda bude docházet ke kvantování energie

a) $\lambda = \frac{h}{p}$, de Broglieho vlnová délka

b) $\lambda >$ než rozměry látky  kvantování energií

c) ΔE roste s klesajícími rozměry

d) **Kvantování vodivosti, pokud $\Delta E > k_b T$**

- Koherenční délka λ_0 : určuje, zda se částice chová jako vlna nebo částice

a) $\lambda_0 \sim \sqrt{\frac{\hbar D}{k_b T}}$, kde D je difuzní koeficient

b) střední vzdálenost mezi neelastickými srážkami

c) Růst λ_0 (delokalizace – vlna), pokles (lokalizace – částice)

Elektronový transport ideálním vodičem se vzorkem

- Podmínky: a) Pro chemické potenciály rezervoárů (přívody k baterii) platí $\mu_1 > \mu_2$
b) Hustota stavů v rezervoárech výrazně vyšší než ve vodiči

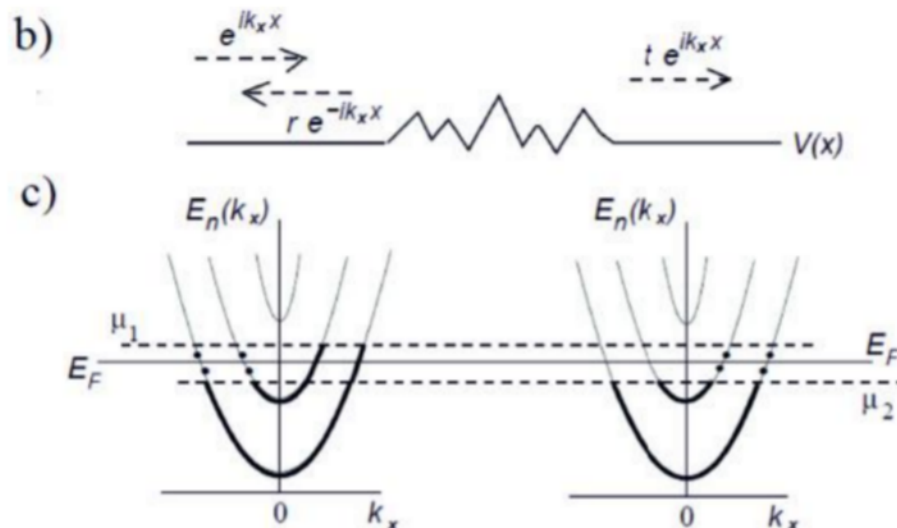


$$U = \frac{\Delta\mu}{e}$$

- Za těchto podmínek je elektron vlna šířící se z rezervoáru 1 do 2

$$E_n(k_x) = \frac{\hbar^2 k_x^2}{2m^*} + E_n$$

Elektronový transport ideálním vodičem se vzorkem



- Výpočet přesné hustoty pravděpodobnosti průchodu/odrazu není obecně možné
- Pokud $\Delta\mu$ i $k_b T$ malé (průchody v blízkosti E_F) pak hustota pravděpodobnosti průchodu:

$$T(E_F) = \sum_n T_n(E_F) \quad I = \frac{e^2}{h} T(E_F) \frac{\Delta\mu}{e} \quad G = \frac{I}{U} = \frac{eI}{\Delta\mu} = \frac{e^2}{h} T(E_F)$$

- Balistický kanál: vzorek, který neobsahuje žádná rozptylová centra. Transport nosičů probíhá se 100% pravděpodobností.

$$T(E_F) = i, \text{ kde } i \in n$$

- i odpovídá počtu větví energetického spektra protínajících Fermiho mez.

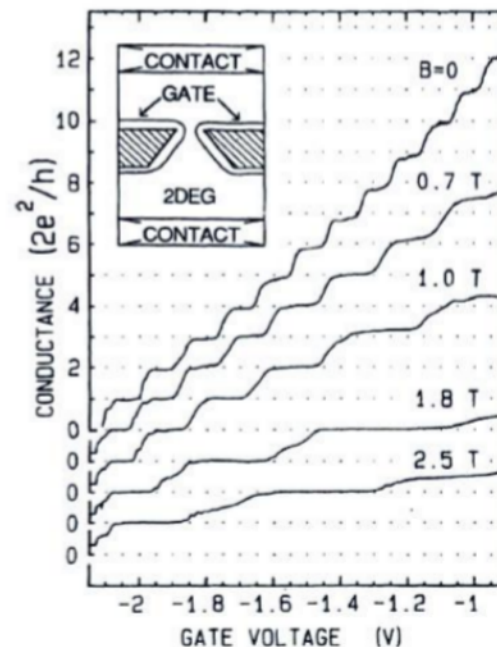
$$G = \frac{(2)ie^2}{h}$$

Vodivost tedy není závislá na délce vodiče.

- Měreno na vzorku GaAs/AlGaAs
- Klitzingova konstanta:

$$h/e^2 = 25\,812,807\, (59) \, \Omega$$

Metrologický standard pro určování odporu



- Reálný vodič: vykazuje nenulovou pravděpodobnost zpětného rozptylu nosičů náboje.

$$i = T + R$$



$$\frac{1}{G} = \frac{h}{e^2} \frac{1}{T} = \frac{h}{e^2} \frac{1}{i} + \frac{h}{e^2} \frac{R}{iT}$$

Balistický kanál
(kontaktní odpor)

Vnitřní odpor

- Na základě uvedené teorie lze odvodit odpor sériově spojených vzorků:
- a) $\lambda_0 < \text{velikost vzorku}$ Výsledný odpor je roven jejich součtu
- b) $\lambda_0 > \text{velikost vzorku}$ Výsledný odpor bude větší než klasický (interference)

Odpor struktury složené ze dvou rozptylových center

- Podmínky: a) Fermiho mez protnuta jen jednou větví energetickou hladinou
b) vzdálenost center je d
c) efektivita rozptylu je u obou center jiná

- Amplituda prošlé vlny oběma centry:

$$t_{1,2} = \frac{t_1 t_2}{1 - r_1' r_2 \exp(2ik_x d)}$$

- Pravděpodobnost průchodu:

$$T_{1,2} = |t_{1,2}|^2 = \frac{T_1 T_2}{1 - 2\sqrt{R_1 R_2} \cos(2k_x d + \theta) + R_1 R_2}$$

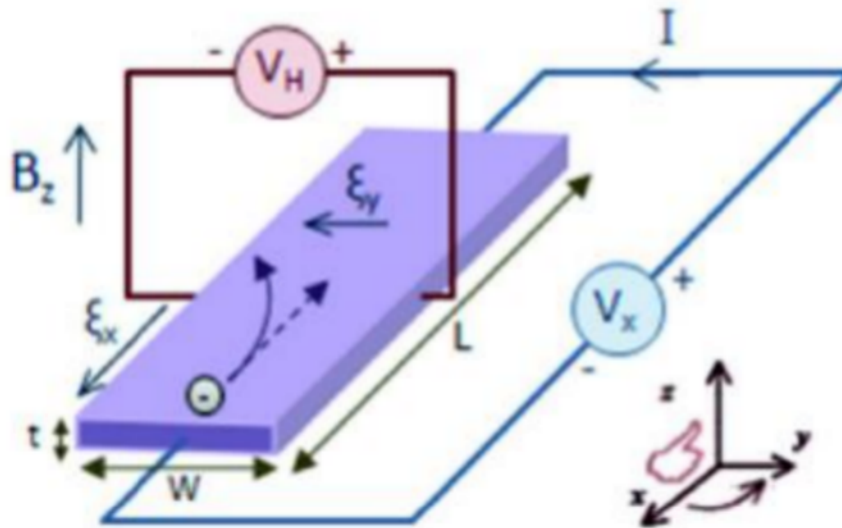
- Střední hodnota vodivosti:

$$\left\langle \frac{1}{G} \right\rangle = \frac{h}{e^2} \left[1 + \frac{R_1}{T_1} + \frac{R_2}{T_2} + 2 \frac{R_1 R_2}{T_1 T_2} \right]$$

Klasický Hallův jev (1879)

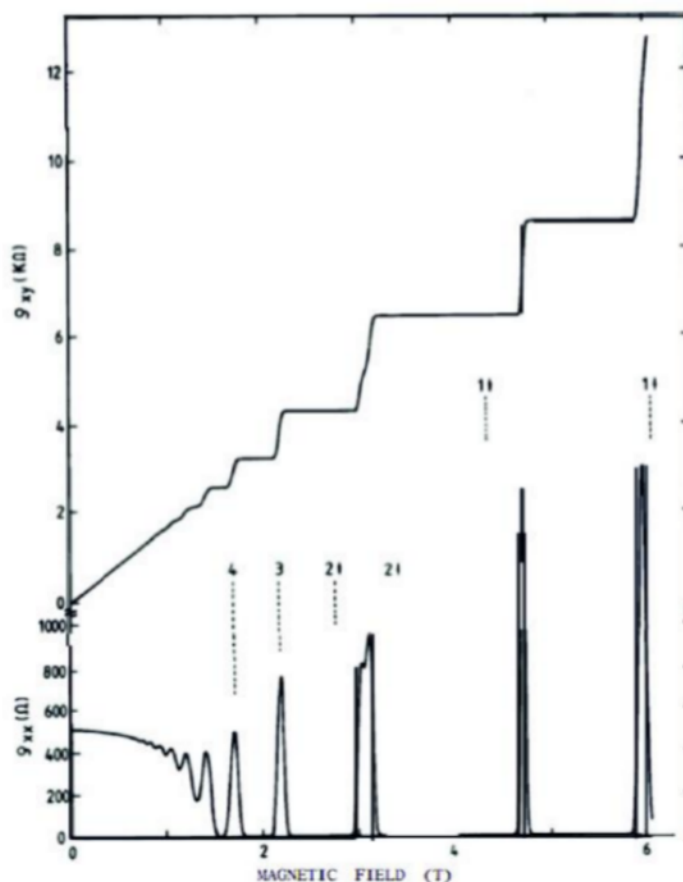
- Vznik elektrického napětí orientovaného kolmo k procházejícímu proudu i vnějšímu mag. poli.

$$R_H = \frac{U_H}{I} \quad R_H = -\frac{B}{en_e}$$



Kvantový Hallův jev (1980) – Klaus von Klitzing (1985 NP)

- Skoková změna R_H při změně B vnějšího pole (h/e^2i). Navíc po překročení určitého hodnoty B vymizí podélný odpor. Materiál se chová jako supravodivý.



AlGaAs/GaAs při teplotě
0,066 K

Interpretace

- Klasický Hallův vztah platí nejen ve 3D, ale i 2D strukturách.
- U 2D je vlastní funkce nosičů v x rovinná vlna, v y vázané stavy (mezení) – LHO.
- Vázané stavy – magnetická délka l_B (šířka vlnové funkce ve směru osy y):

$$l_B = \sqrt{\frac{\hbar}{eB}}$$

- Energetické spektrum LHO (Landauovy hladiny):

$$E_n = \omega_c \hbar \left(n + \frac{1}{2} \right) + K$$

kde K je dodatečný příspěvek daný interakcí spinu a magnetického pole

- Všechny hladiny mají stejnou hustotu stavů: eB/h
- Plošná hustota stavů elektronů n_e :

$$n_e = \gamma \frac{eB}{h}$$

Interpretace

➤ Pokud je i plných hladin  $\gamma = i$

➤ Hallův odpor je potom dán:

$$R_H = -\frac{B}{en_e} = -\frac{h}{e^2} \frac{1}{\gamma}$$

➤ Jelikož $\gamma \sim B$  Vztah nevysvětluje ani skokovou změnu R_H ani podélný odpor.

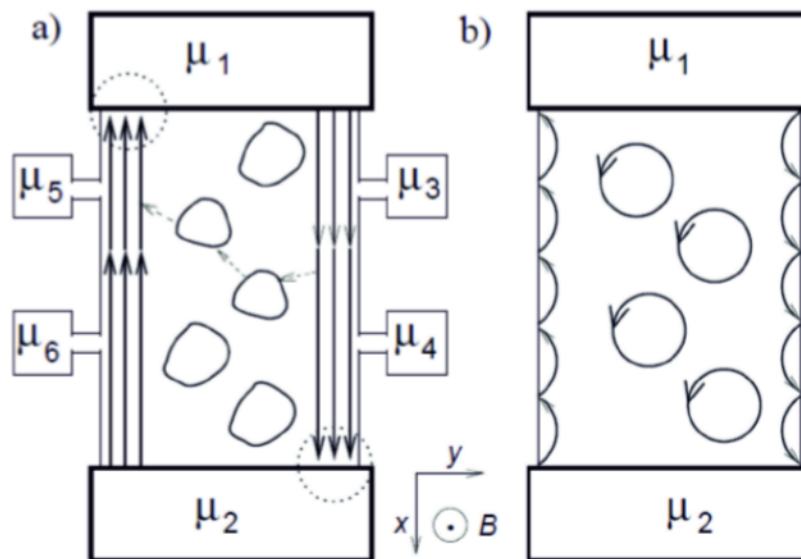
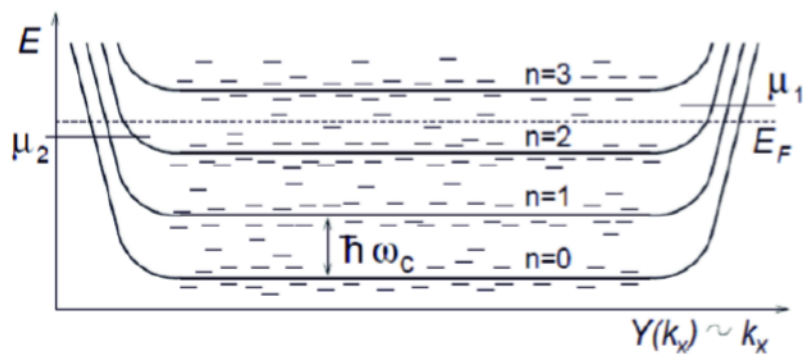
➤ Nutná hlubší studie Landauových hladin

Interpretace

- Landauovy hladiny: Omezující potenciál nulový napříč vzorkem ➡ E mimo bezprostřední okolí pásu je konstantní a mění se jen u okrajů
- V případě ideálního systému s konst. potenciálem – elektrony jen u hran vzorku.
- Vodič se chová jako Balistický vodič pokud :

a) Přechody u hran nemohou vyvolat zpětný rozptyl

b) $l_B \ll$ šířka vzorku



Interpretace

- R_H je potom dál odporem balistického kanálu:

$$R_H = \frac{h}{e^2 i}$$

kde i určuje počet větví protnutých E_F ➡ skokový charakter R_H na B

- Neexistence zpětného rozptylu ➡ $\mu_1 = \mu_3 = \mu_4$ ➡ Odpor je nulový

- Kritická hodnota hustoty el. proudu:

$$j_C = eun_e = iBu \frac{e^2}{h}$$

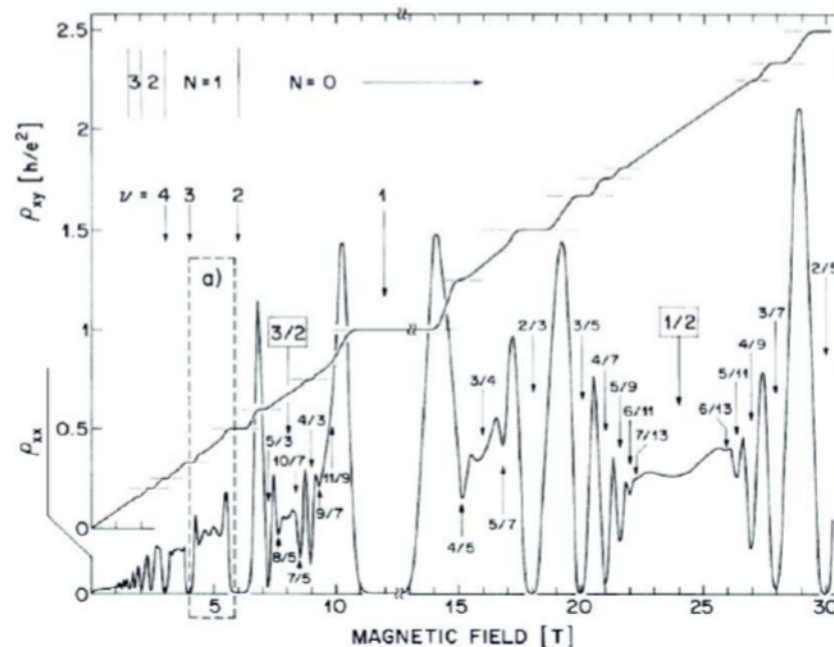
Kde u je rychlost šíření zvuku v daném materiálu

➤ Roku 1982 byl pozorován zlomkový Hallův jev. $i = 1/3, 2/5, 3/7, 4/9$ (NP 1998)

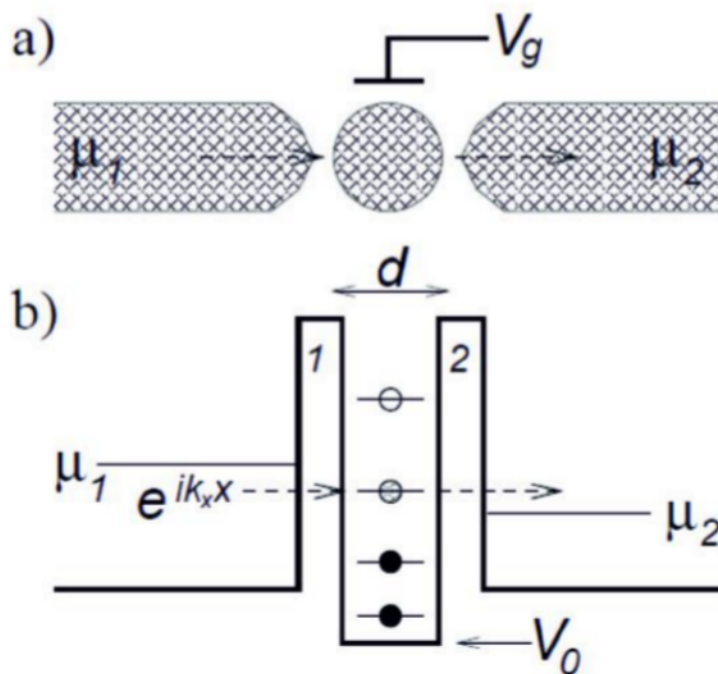
➤ Bylo ukázáno, že platí:

$$i = \frac{1}{2p+1} \text{ nebo } \frac{2p}{2p+1}, p \in \mathbb{N}$$

➤ Dáno coulombickou interakcí mezi elektrony. Pozorováno díky vylepšení kvality vzorků (nižší koncentraci defektů mezi Landauovými hladinami).



- Současná technologie: vytváření hlubokých potenciálových jam (nm rozměry, polovodiče)
- Obsazení hladin elektrony ➡ vznik umělých atomů
- Připojením vnějších kontaktů lze studovat hladiny v umělém atomu (kvantová tečka)
- Průchod elektronu bariérami – elektronové tunelování.
- Hloubka jámy a tím poloha k chem. potenciálu v přívodech ovlivněna – napětí na hradlu



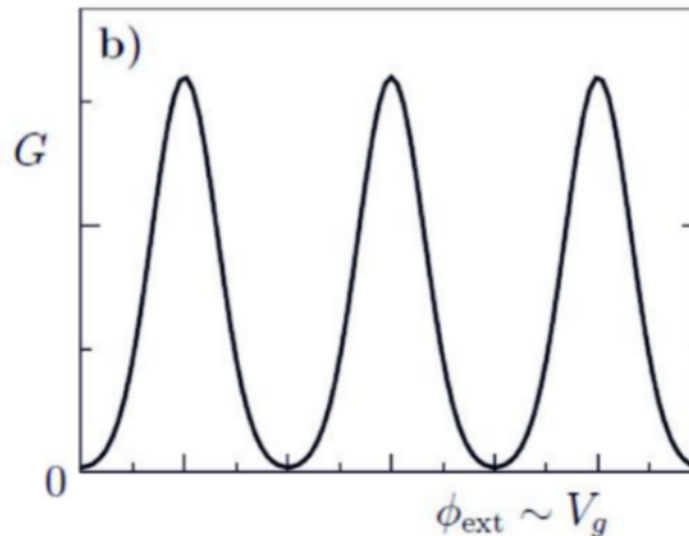
- Významná závislost průchodu bariérami na energii elektronu. Pro případ kdy je v intervalu $\Delta\mu$ jen jeden stav:

$$T(E) = |t_{1,2}|^2 = \frac{T_1 T_2}{1 - 2\sqrt{R_1 R_2} \cos(2k_x d + \theta) + R_1 R_2}$$

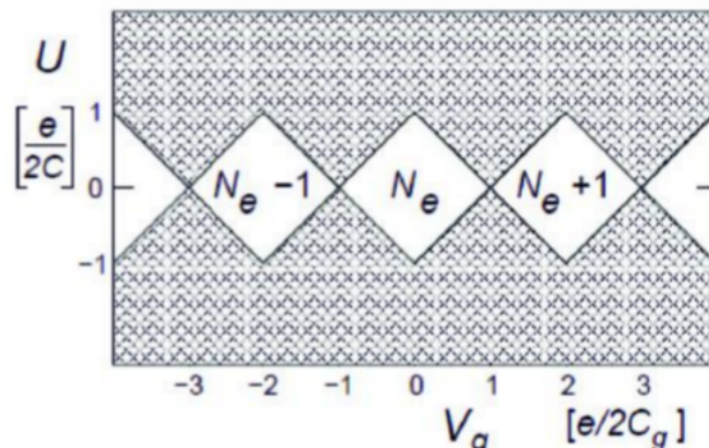
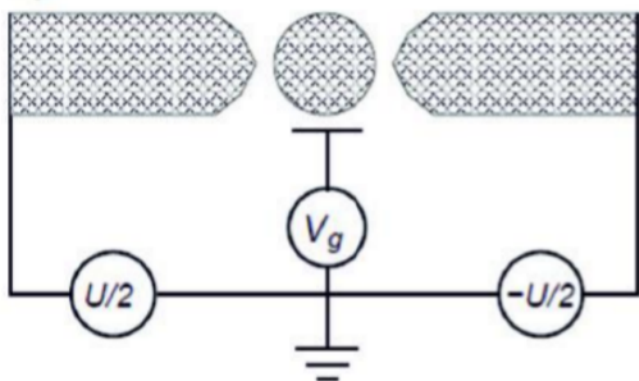
- Maximální hodnota pokud: $2k_x d + \theta = 2\pi$ (energie elektronu je přesně rovna hladině v jámě).
- Pokud je šířka hladin umělého atomu $L \gg \Delta\mu$ a $T = 0\text{K}$:

$$I = 2 \frac{e}{h} T(\mu) U$$

- Předěšlé odvození předpokládalo, že umělý atom neobsahuje větší množství elektronů a tedy nedochází k intenzivní coulombické interakci mezi elektrony.
- Pokud tomu tak není ➡ dodatečná složka energie (coulombického původu)
- Vhodnou změnou napětí na hradle můžeme systém nastavovat mezi stavy, kdy:
 - a) Je stejně výhodné elektron přijmout jako se ho zbavit
 - b) Pro umělý atom je výhodné elektron nepřijímat a ani ho nepřijímat (coulomb. blokáda)



- Aplikace: Součástky založené na postupném tunelování elektronů jedné po druhém.
- Změnou U a hradlového napětí V_g přechod mezi stavy blokády a nenulového tunelování



- Po přiložení střídavého napětí na hradlo a vhodném nastavení – transport 1 elektronu za periodu ➡ elektronový turniket (extrémně přesné dávkování elektronů)

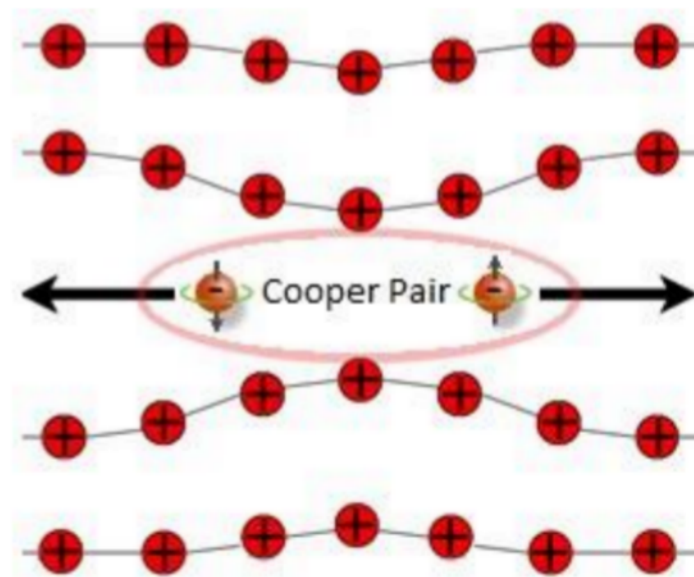
$$I = ef$$

Supravodiče typu I

- Supravodivost: Stav látky, kdy se jím elektrony šíří bez generace Joulova tepla (odporu)
- Objevena H. Kamerlingh Onnes (1911). Studium vlastností Hg při teplotě 4,2 K.
- Následně prokázáno u Pb, Sn, Nb (ne u dobrých vodičů). Ochlazení pod T_c
- Vysvětlení až 1957 (Bardeen, Cooper, Schrieffer – BCS teorie, 1972 NP):
 - a) Ochlazení snižuje kmity mřížce
 - b) Vznik kladně nabitých oblastí
 - c) Chycení elektronů a vznik **Cooper párů**

Vykazují: Nulový moment hybnost a spin

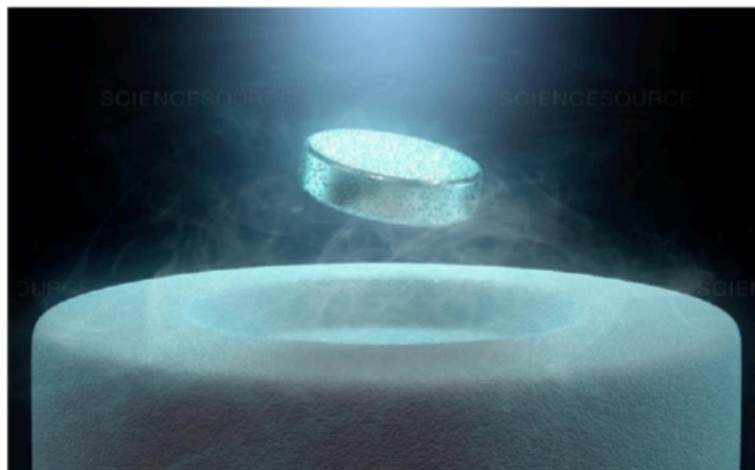
- ➡ Bosony! Mohou být všechny ve kvantovém stejném stavu
- ➡ Vznik kondenzátu, který se šíří jako celek látkou bez odporu



- Narušení kondenzátu: a) překročení T_c
b) Silným magnetickým polem

Supravodiče typu II

- Objev Muller a Bednorz 1986, NP 1987: Kritická teplota $> 10\text{ K}$ (teoreticky nevysvětleno)
- Složení: kovová slitina a sloučeného oxidu (první LaBaCuO, $T_c = 13\text{ K}$)
- Nejběžnější YBaCuO ($T_c = 90\text{ K}$)
- Nejlepší keramický supravodič $T_c = 160\text{ K}$. Rekord H_2S ($T_c = 203\text{ K}$)



wikipedia.org

Aplikace

- Magnetická levitace: MAGLEV (vlaky 500 km/h)
- Setrvačníky v družicích (určování polohy)
- Efektivní uschovávání elektrické energie
- SQUID: zařízení pro studium mozkové aktivity (citlivost supravodivosti na mag. poli)

Funkce SQUID: Využívá vlivu magnetického pole mozku na Josephsonovy jevy (NP 1973):

1. Jev. Obvod tvořený 2 polovodiči o rozdílu chemického potenciálu s bariérou teče nekonečně dlouho stejnosměrný proud

$$I = I_C \sin(\Delta\theta)$$

2. Jev. Při přiložení U na bariéru – vznik střídavých proudů

$$f_I = 2 \frac{eU}{h}$$

