

A opravdová přednáška může začít!

Děkuji za pozornost

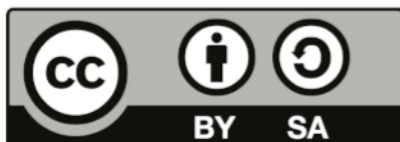
Autorská práva/copyright

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.



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



Dílo podléhá licenci Creative Commons 4.0 Česko
Uveďte původ - Zachovejte licenci

Pohodlně se usadte,
přednáška co nevidět začne!

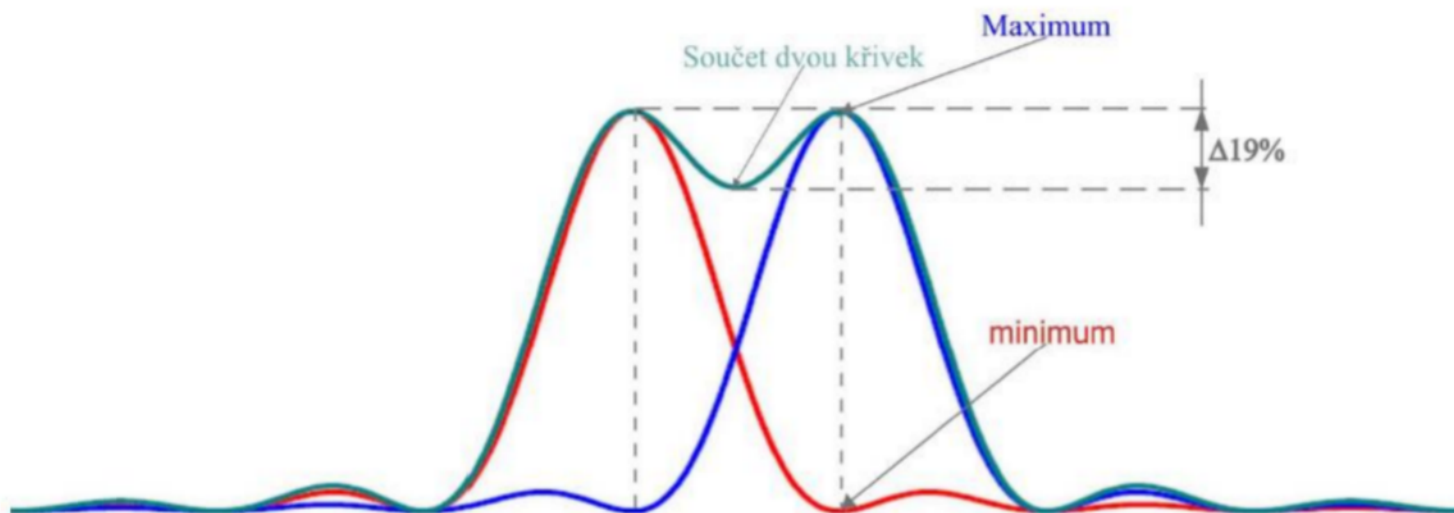
Elektronová mikroskopie

Fyzika III

- Klasický **optický mikroskop** využívá viditelné světlo a soustavu optických čoček
 - Zvětšení je limitováno vlnovou délkou světla 390-760 nm
- **Elektronový mikroskop** využívá svazek urychlených elektronů a soustavu elektromagnetických čoček
 - Vlnová délka urychlených el. až 7 pm → výrazně větší zvětšení
 - Obraz není pozorován přímo, ale pomocí detektoru a monitoru
 - Výsledkem interakce el. se vzorkem je široké spektrum signálů, které přinášejí informace o povaze vzorku



Rozlišovací schopnost světelného mikroskopu



Nejmenší úhlová vzdálenost rozlišených bodů $\vartheta = 1,22 \frac{\lambda}{D}$

- **Transmisní elektronový mikroskop (TEM)**
 - Obraz je tvořen elektrony pronikajícími preparátem
 - Vysoké urychlovací napětí 100-400 kV
 - Pozorování tenkých preparátů do cca 100 nm tloušťky
 - Výsledným obrazem je průmět vnitřní struktury do plochy
- **Skenovací elektronový mikroskop (SEM)**
 - Obraz je tvořen pomocí sekundárního signálu – odražených nebo sekundárních elektronů
 - Urychlovací napětí 0,1-30 kV
 - Elektronový svazek se pohybuje po vzorku řádek po řádku
 - Obraz vypovídá především o topografii povrchu
- **Elektronová mikroanalýza (EDS, WDS spektroskopie)**
 - Využívá rtg záření vznikající při interakci elektronů s povrchem vzorku

- de Broglieho vlnová délka

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

- pro $E_k \ll m_0 c^2$

$$\lambda \approx \frac{h}{\sqrt{2m_0 E_k}} = \frac{h}{\sqrt{2m_0 eU}}$$

- pro $E_k \geq m_0 c^2$ (relativisticky)

$$\lambda = \frac{hc}{\sqrt{E_k^2 + 2m_0 c^2 E_k}}$$

Vlnové délky při urychlovacích napětích používaných v SEM

U [kV]	0,15	0,25	0,50	1	5	10	15	25	30
λ [pm]	100,15	77,58	54,86	38,79	17,35	12,27	10,02	7,76	7,08
λ_{rel} [pm]	100,15	77,57	54,84	38,77	17,31	12,21	9,94	7,66	6,98
$v \times 10^8$ [ms ⁻¹]	0,07	0,09	0,13	0,19	0,42	0,59	0,73	0,94	1,03
$v_{\text{rel}} \times 10^8$ [ms ⁻¹]	0,07	0,09	0,13	0,19	0,42	0,58	0,71	0,91	0,98

Vlnové délky při urychlovacích napětích používaných v TEM

U [kV]	80	90	100	110	120	200	500	1000	3000
λ [pm]	4,34	4,09	3,88	3,70	3,54	2,74	1,73	1,23	0,71
λ_{rel} [pm]	4,18	3,92	3,70	3,51	3,35	2,51	1,42	0,87	0,36
$v \times 10^8$ [ms ⁻¹]	1,68	1,78	1,88	1,97	2,05	2,65	-	-	-
$v_{\text{rel}} \times 10^8$ [ms ⁻¹]	1,51	1,58	1,64	1,70	1,76	2,09	2,59	2,82	2,97

Teoretická rozlišovací schopnost při napětích používaných v SEM

U [kV]	0,15	0,25	0,50	1	5	10	15	25	30
λ [pm]	100,15	77,58	54,86	38,79	17,35	12,27	10,02	7,76	7,08
$\alpha_{opt} \times 10^{-2}$ [rad]	1,42	1,33	1,22	1,12	0,92	0,84	0,80	0,75	0,73
δ_{teor} [nm]	4,46	3,68	2,84	2,19	1,20	0,92	0,79	0,65	0,61

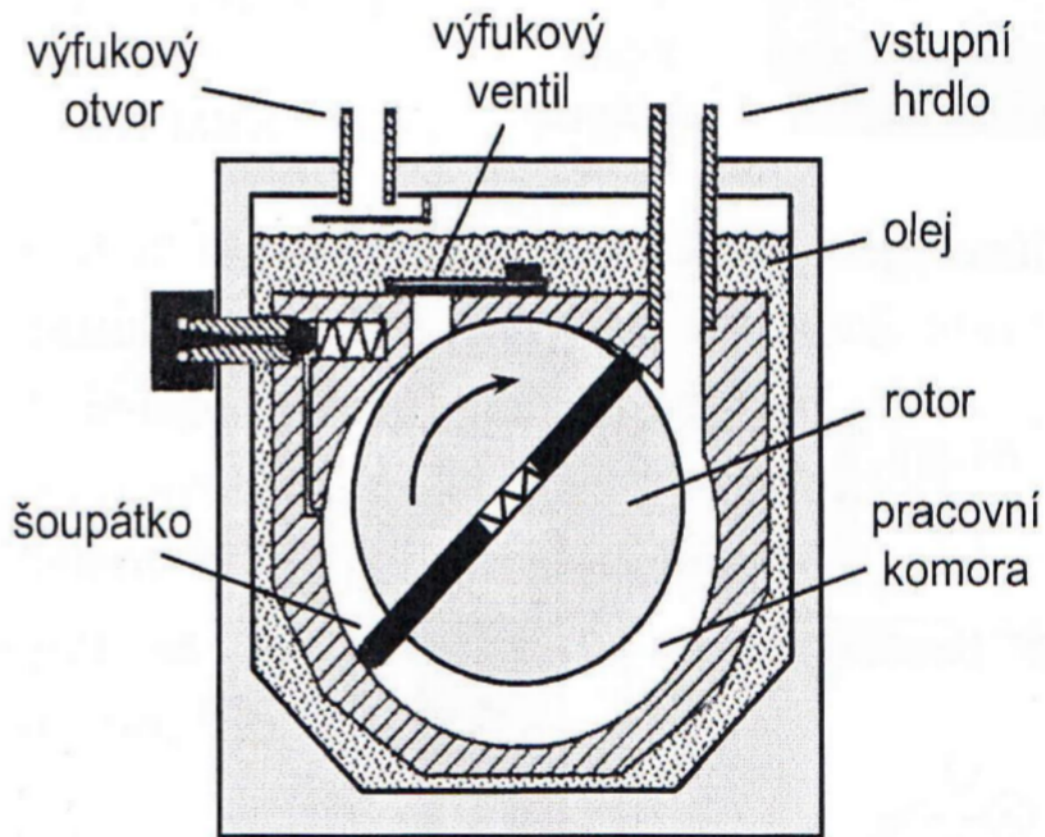
Teoretická rozlišovací schopnost při napětích používaných v TEM

U [kV]	80	90	100	110	120	200	500	1000	3000
λ_{rel} [pm]	4,18	3,92	3,70	3,51	3,35	2,51	1,42	0,87	0,36
$\alpha_{opt} \times 10^{-3}$ [rad]	6,42	6,32	6,23	6,15	6,08	5,65	4,91	4,34	3,47
δ_{teor} [nm]	0,41	0,39	0,38	0,36	0,35	0,28	0,18	0,13	0,07

- Vakuový systém
- Elektronové trysky
- Elektromagnetické čočky
- Komora pro vzorky
- Detektory
 - Prošlých elektronů (TE)
 - Zpětně odražených elektronů (BSE)
 - Sekundárních elektronů (SE)
 - Rtg záření
 - ...

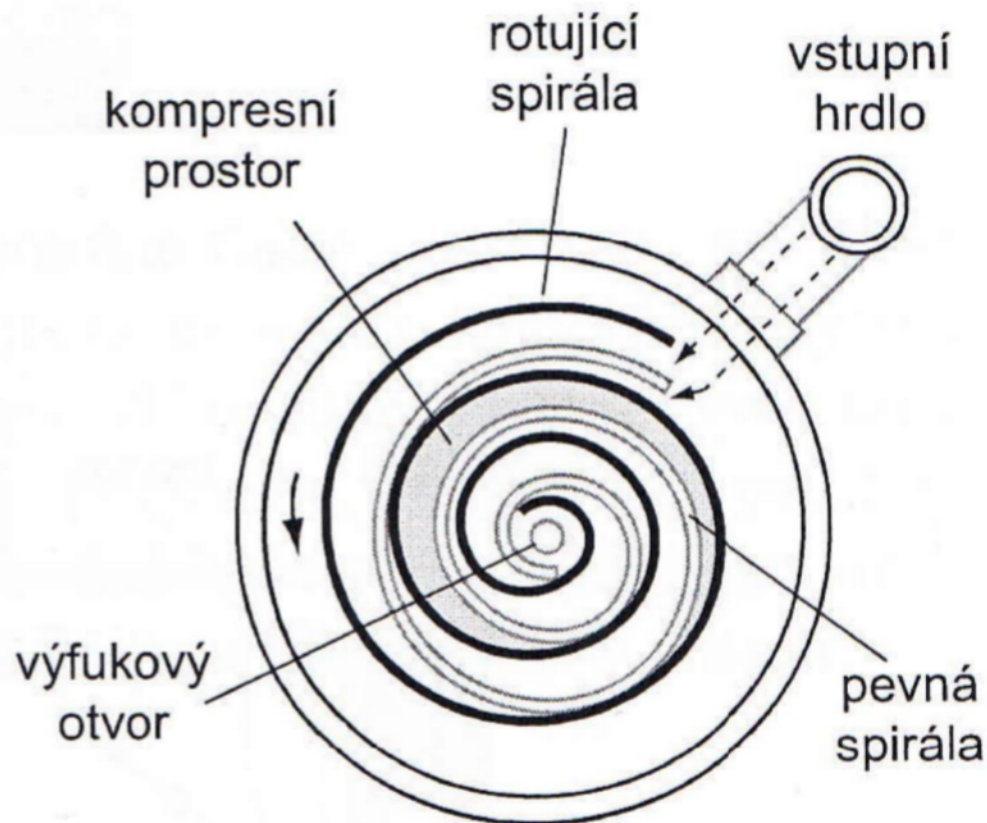
- Vnitřek tubusu 10^{-3} - 10^{-5} Pa
- Vyšší vakuum je nutné v oblasti elektronové trysky a kolem vzorku
 - Rotační vývěvy
 - Difúzní vývěvy
 - Iontové vývěvy
 - Turbomolekulární vývěvy

- Rotační vývěva
 - Excentricky rotující válec s pohyblivými lamelami
 - 10^{-1} Pa

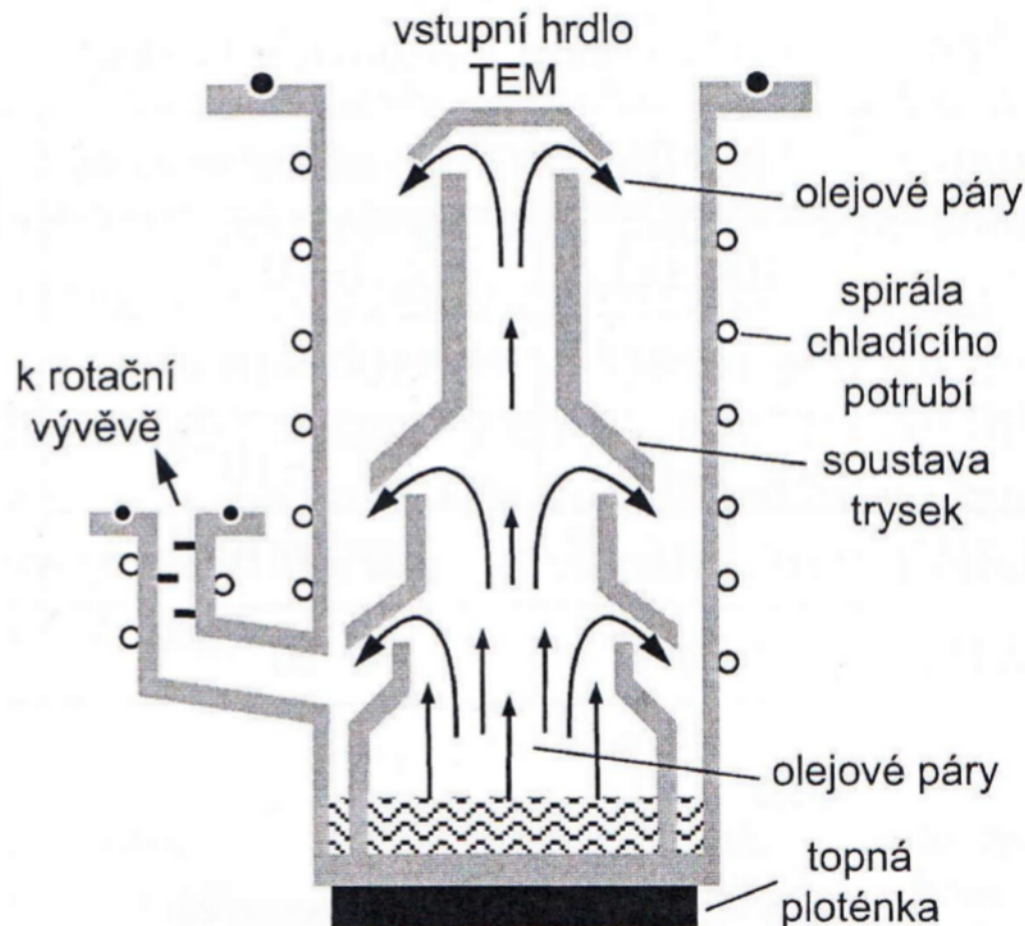




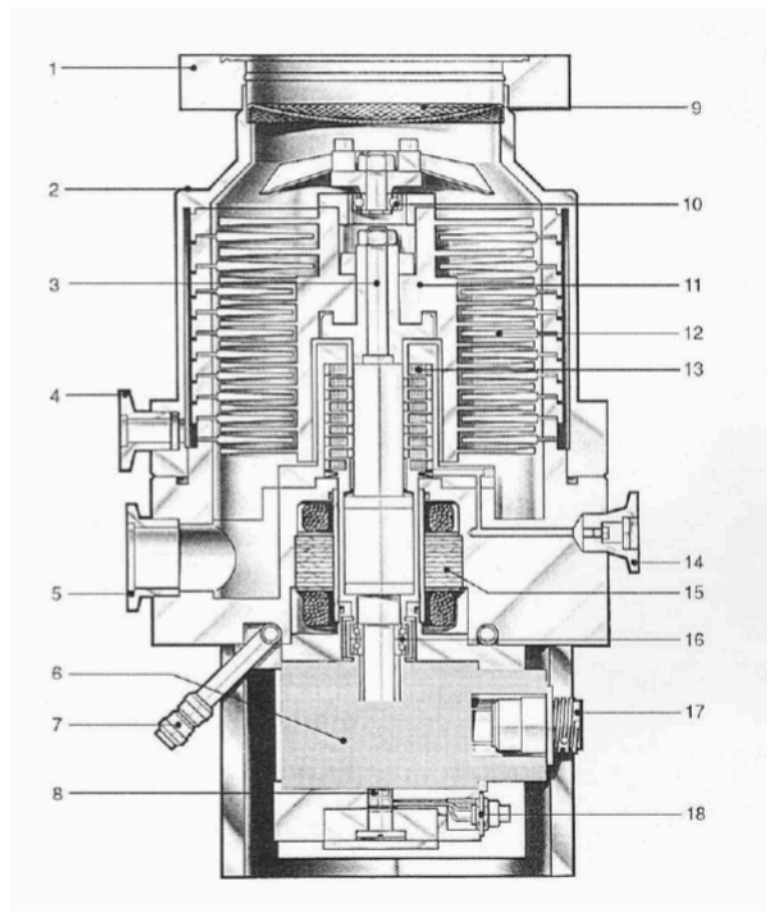
- Spirálová vývěva
 - Spirály se po sobě odvalují
 - Není nutné mazat olejem



- Difúzní vývěva
 - Molekuly vzduchu jsou strhávány proudem olejových par, které kondenzují na stěnách
 - $10^{-1} - 10^{-7}$ Pa

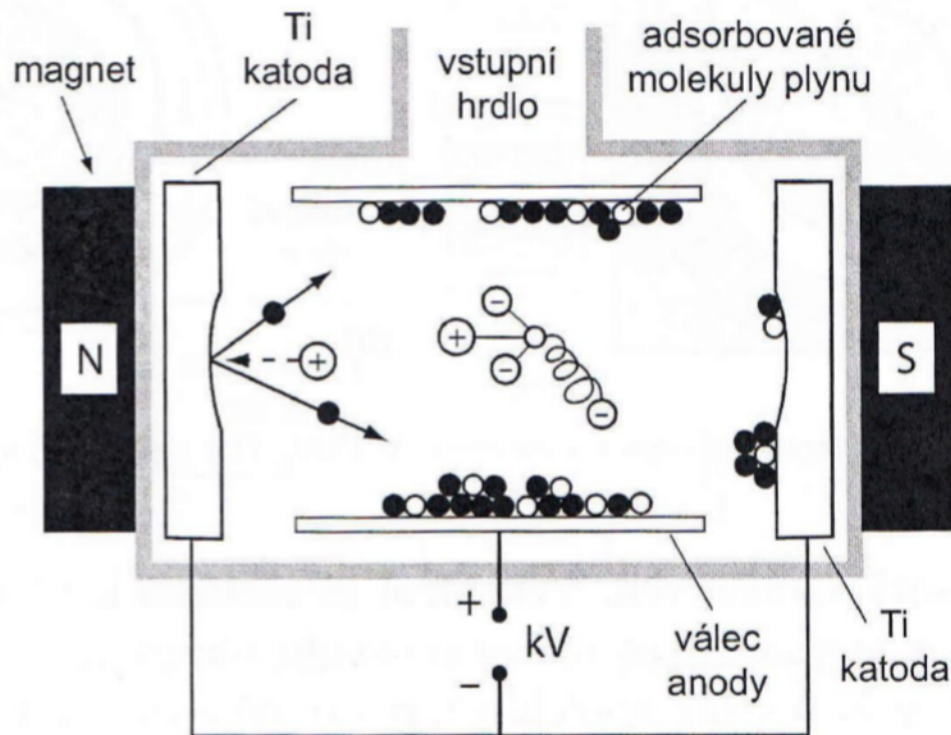


- Turbomolekulární vývěva
 - V podstatě ultrarychlý ventilátor (20000-50000 ot/min)
 - Tlačí molekuly plynu směrem k pumpě primárního vakua
 - $10^{-7} - 10^{-10}$ Pa



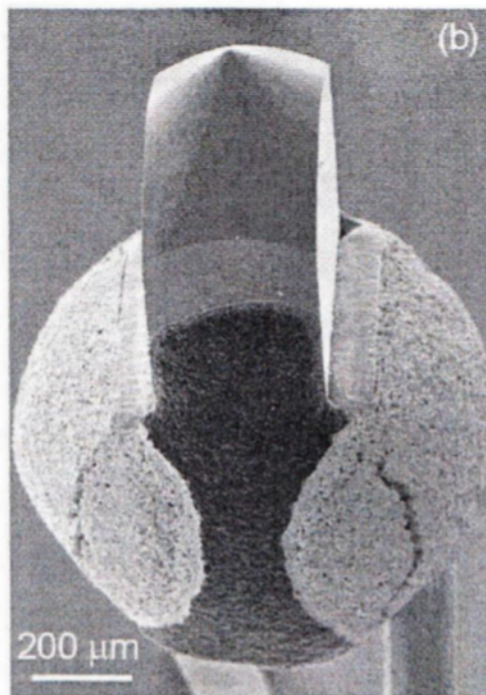
wikipedia.org

- Iontová vývěva
 - Neobsahuje žádné pohybující se části
 - Pracuje na principu ionizace a adsorpce
 - Čím menší proud iontů, tím lepší vakuum – slouží zároveň jako vakuometr
 - 10^{-8} Pa





Wolframové vlákno
 $W = 4,5 \text{ eV}$

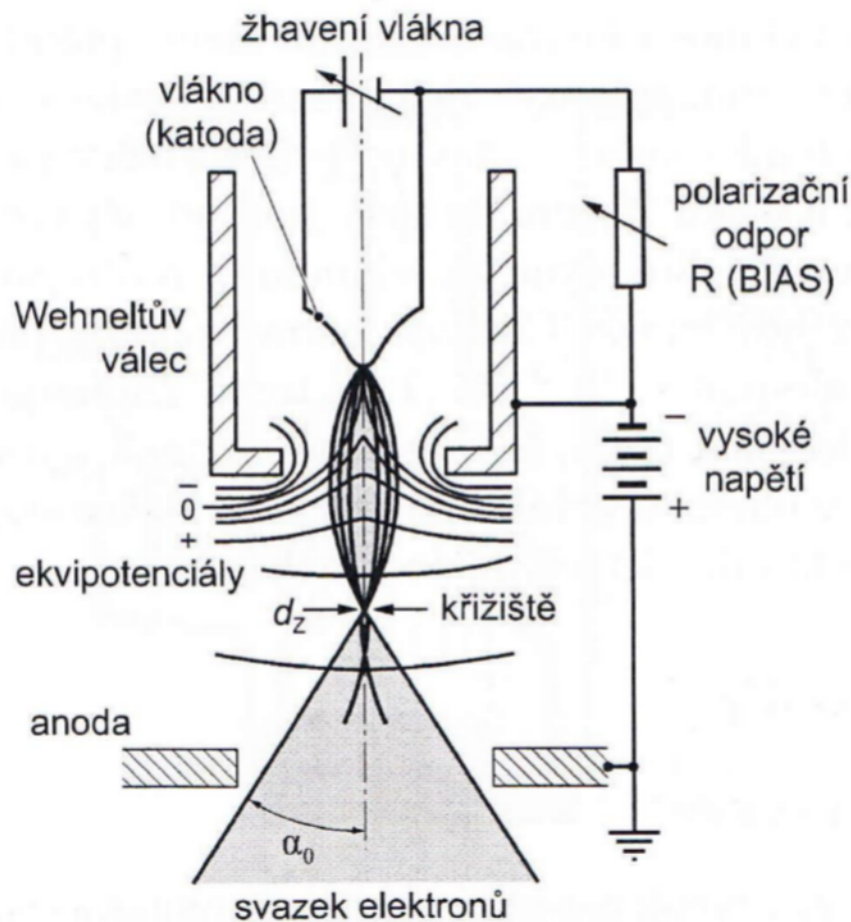


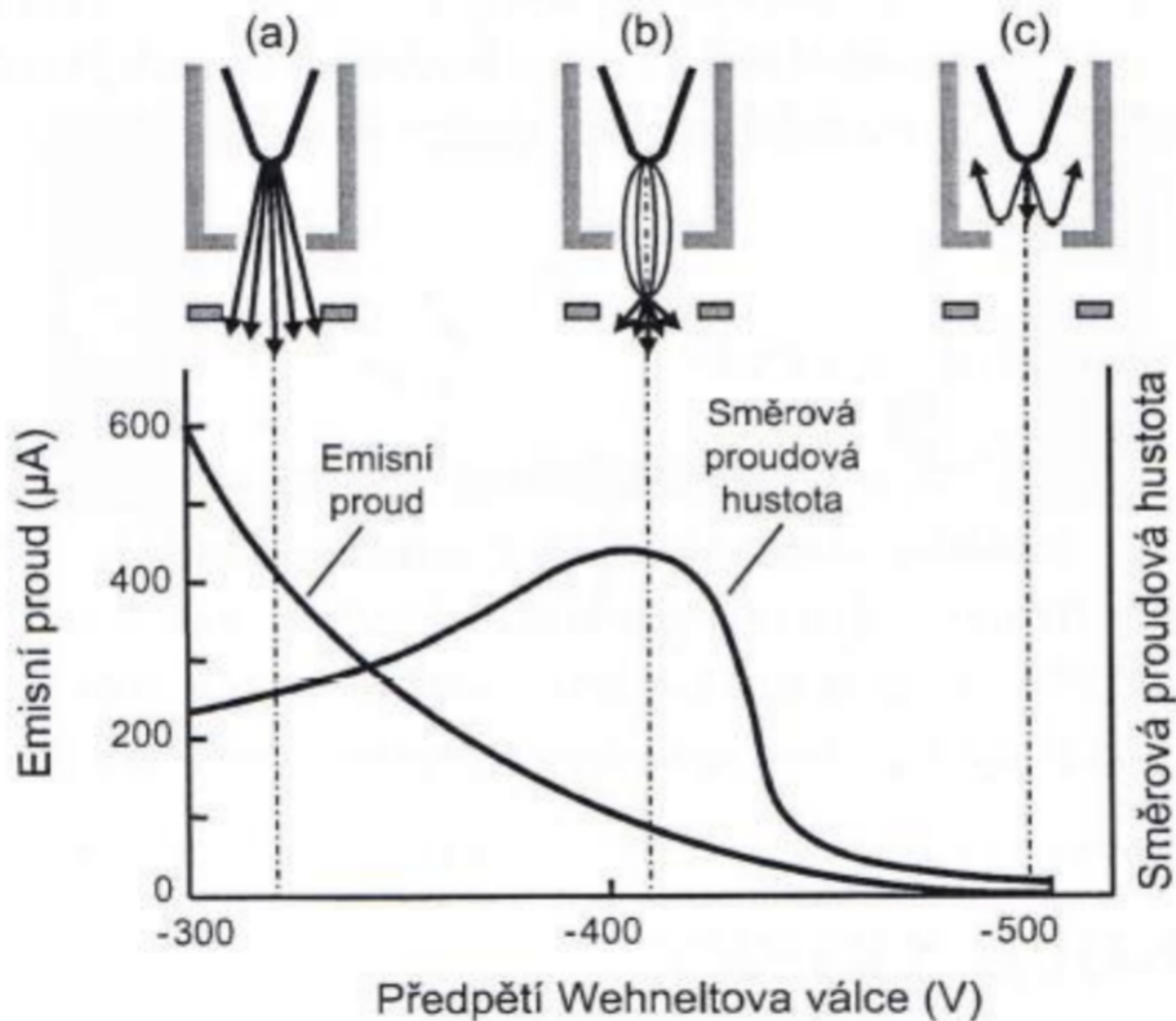
Krystal LaB_6
 $W = 2,4 \text{ eV}$



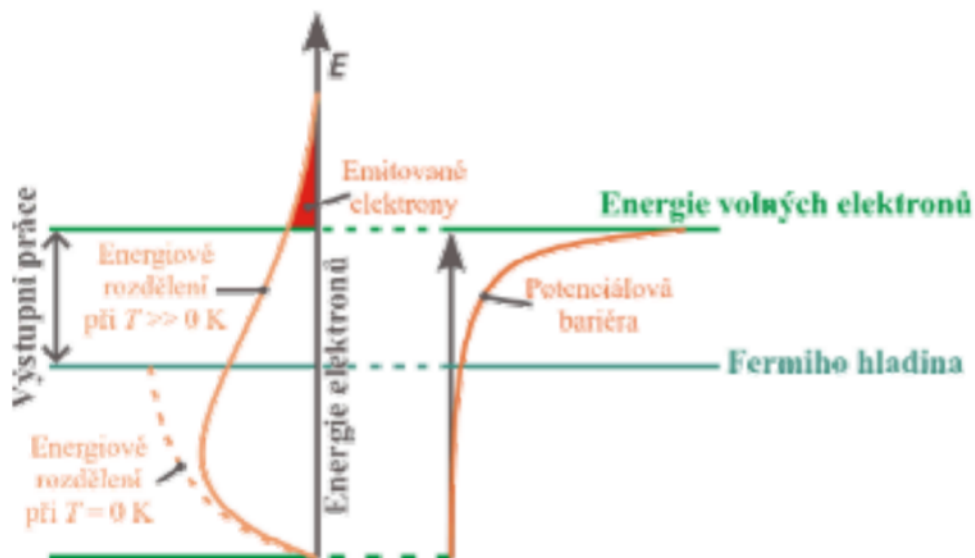
Wolframový hrot
autoemisní trysky

- Termoemisní elektronové trysky
- 2700 K





- Termoemisní elektronové trysky

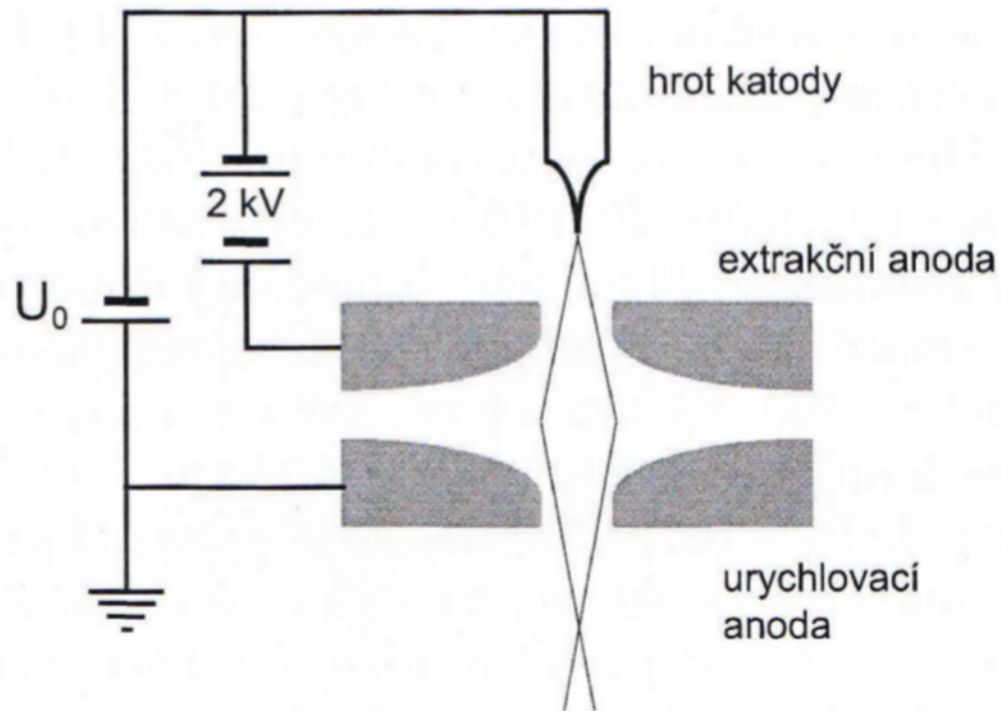


Energetické schéma termoemise

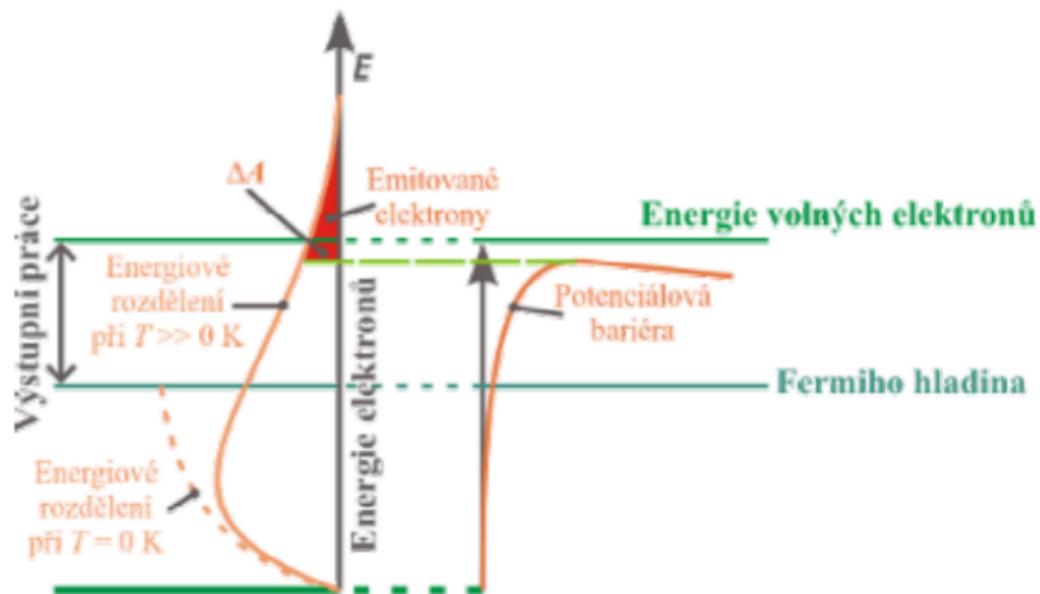
Elektronové trysky



- Autoemisní elektronové trysky
- Poloměr křivosti 50 – 100 nm
- V blízkosti hrotu $E \sim 10^9$ V/m
- 300 K



- Termoautoemisní elektronové trysky
(Schottkyho trysky)
- Wolfram + oxid zirkoničitý
- 1800 K



Energetické schéma termoautoemisní elektronové trysky

Provozní hodnoty vakua

Autoemise za pokojové teploty	10^{-8} Pa
Termoautoemise	10^{-6} Pa
LaB ₆	10^{-4} Pa
Termoemise	10^{-2} Pa

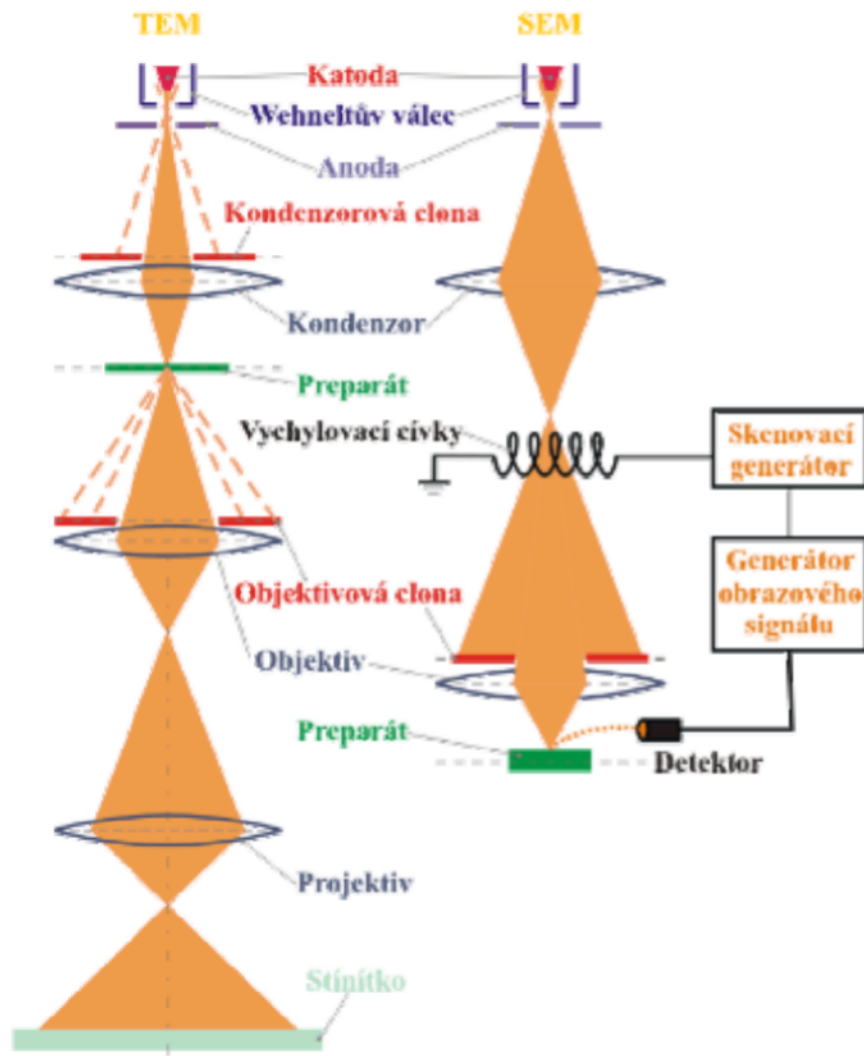
Doba životnosti wolframového vlákna

Teplota vlákna [K]	3140	2985	2840	2690
Doba života [h]	1	6	27	115

Doba životnosti katody LaB₆

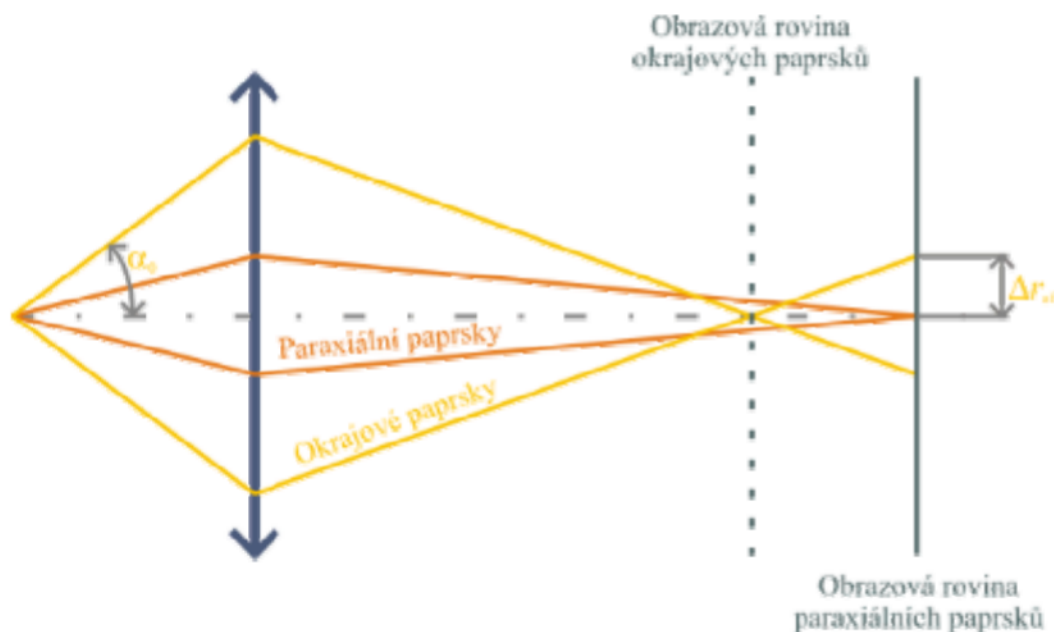
Teplota [K]	2093	1993	1893	1793
Doba života [h]	17	105	813	7900

- Princip elektromagnetické čočky – Lorentzova síla působící na elektron pohybující se v mg. poli,
- Mění směr, nikoliv velikost rychlosti
- Kondenzorová čočka – el. svazek je po průchodu anodou značně divergentní a je třeba jej zkolimovat
- Objektivová čočka – fokusuje elektronový svazek na vzorek
- Vychylovací cívky – provádí rastrování svazku elektronů po vzorku

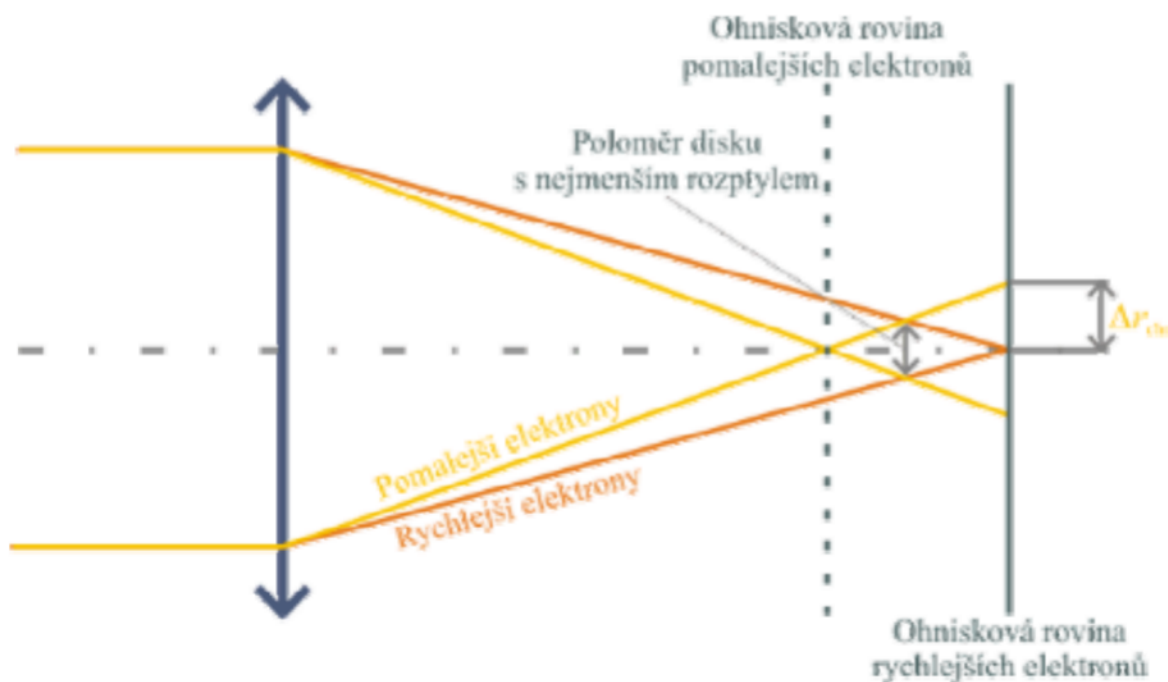


Zobrazovací vady (aberrace)

- Sférická (vliv vzdálenosti elektronů od osy)
 - Korekce: zmenšení průměru clony

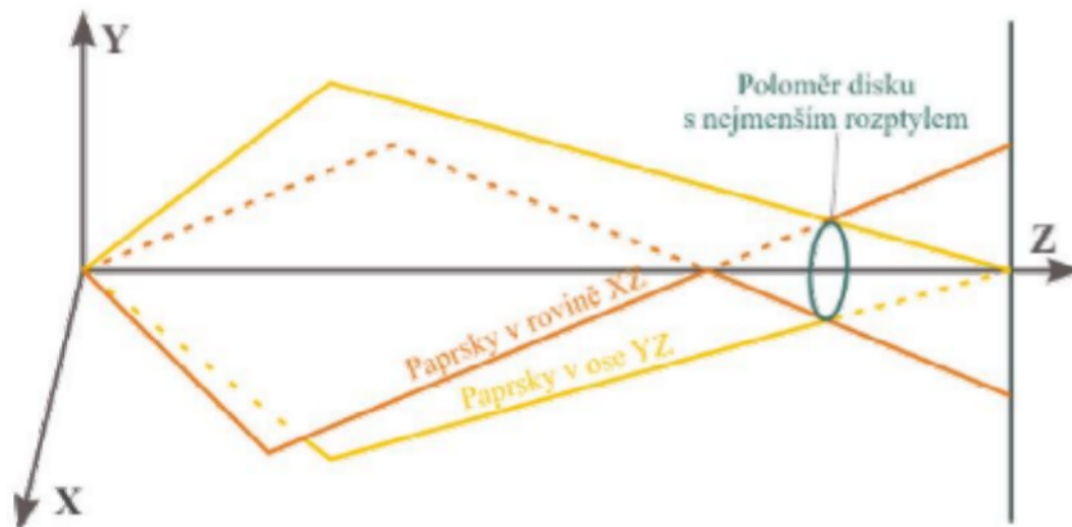


- Chromatická (vliv rozdílné rychlosti elektronů)
 - Korekce: stabilizace urychlovacího napětí





- Astigmatismus (vliv nesymetrie svazku)
 - Korekce: stigmátor



- Elastické srážky – elektrony mění směr, ale téměř nemění energii a rychlost
 - Zpětně odražené elektrony
 - Prošlé elektrony
- Neelastické srážky – elektron ztrácí energii při interakci s elektrony v el. obalech atomů vzorku
 - Sekundární elektrony
 - Fotony v oblasti viditelného světla – katodoluminiscence
 - Augerovy elektrony
 - Charakteristické rtg záření
 - Spojité rtg záření
 - teplo

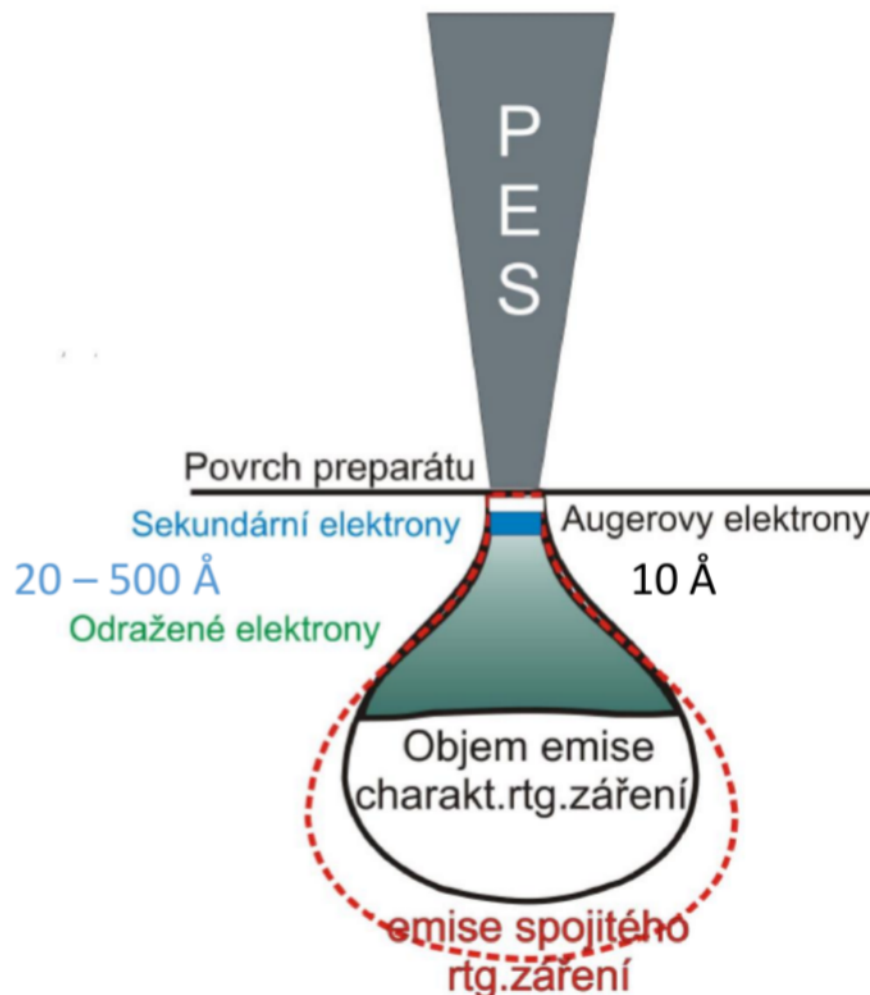
Excitační objem

- Oblast, ve které dochází k brzdění primárních elektronů a vzniku jednotlivých signálů
- Hloubka se zvětšuje s rostoucí energií elektronového svazku
- Hloubka se zmenšuje s rostoucím atomovým číslem vzorku

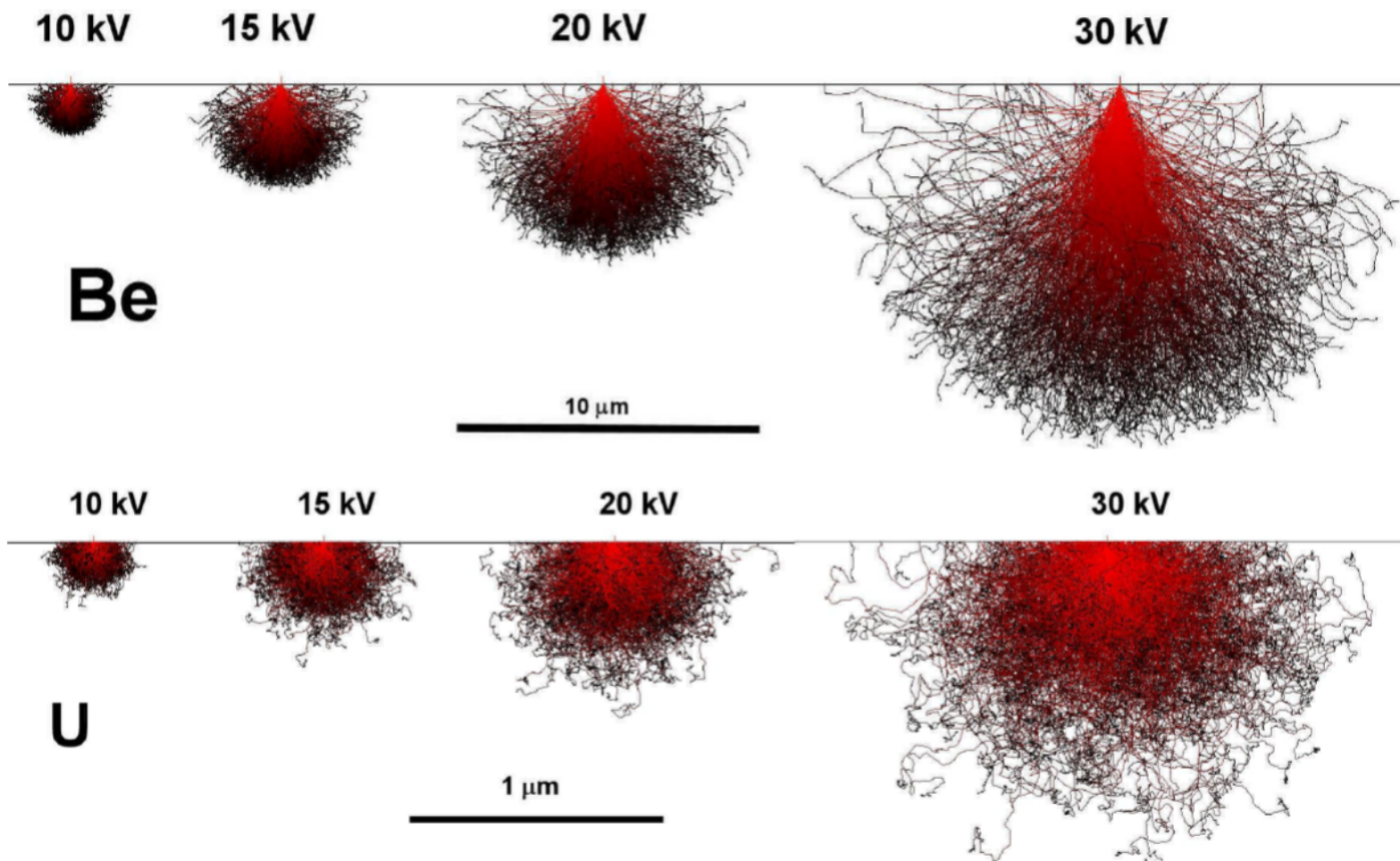
$$x(\mu\text{m}) = \frac{0,1E_0^{1,5}}{\rho}$$

E_0 (eV), ρ (g/cm³)

0,5 – 5 μm

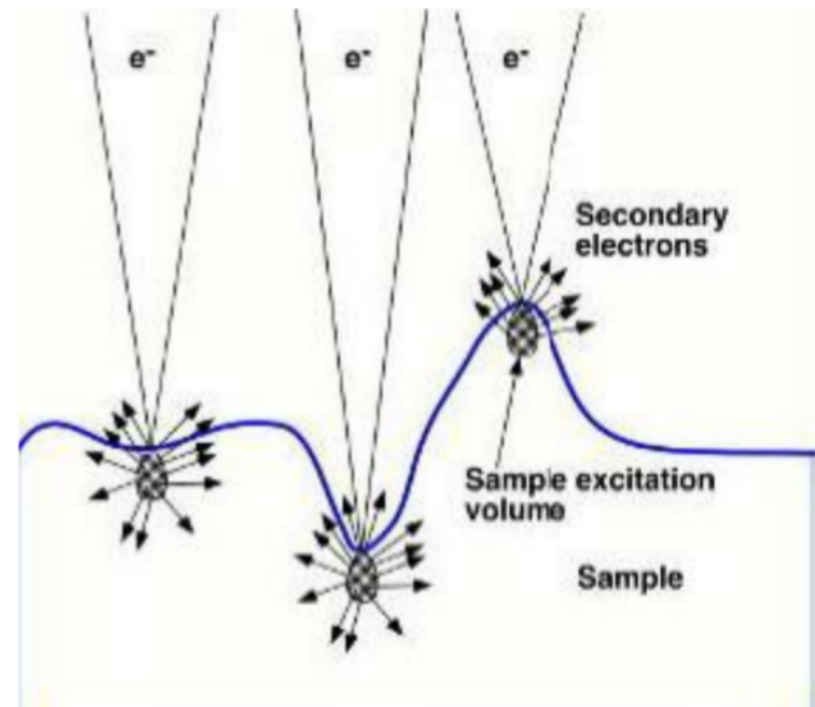


Excitační objem

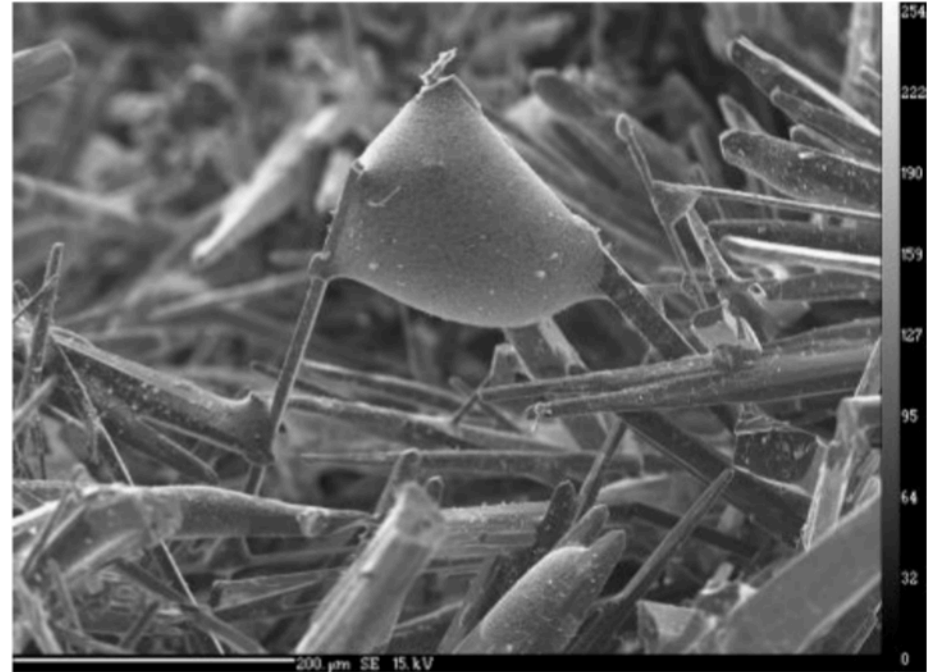
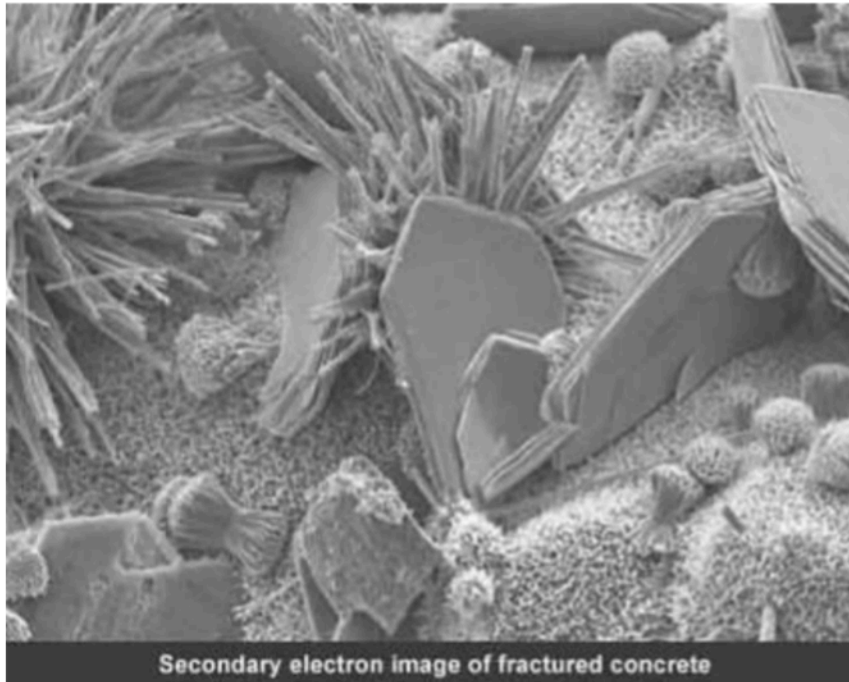


Sekundární elektrony

- Jsou emitovány z elektronových obalů atomů v důsledku interakce s primárními elektrony
- Energie < 50 eV
- Z malé hloubky pod povrchem ~ 5 nm
- Topografický kontrast



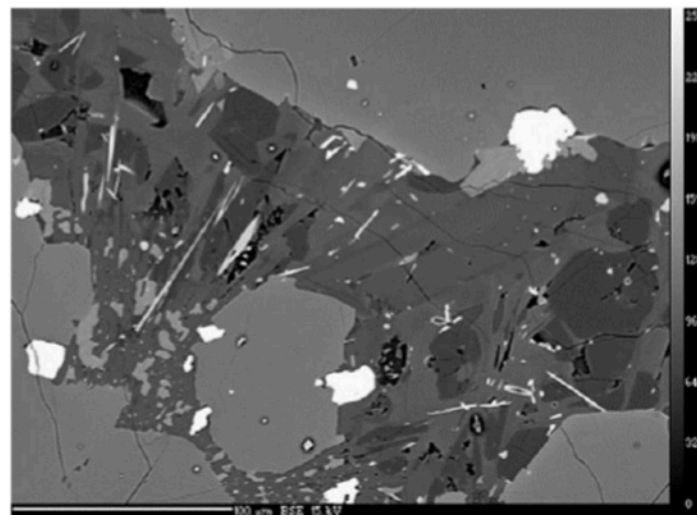
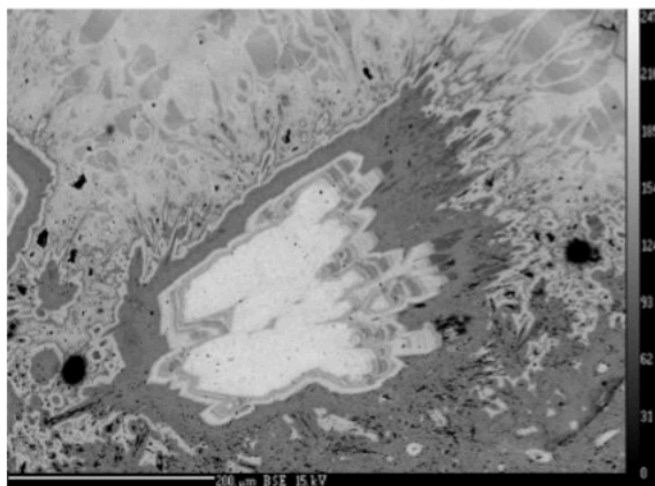
SE fotografie



wikipedia.org

- Množství je silně závislé na atomovém čísle vzorku
- Materiálový kontrast
 - Vyšší atomové číslo $\rightarrow$ světlá místa
 - Lehké prvky $\rightarrow$ tmavá místa

BSE fotografie

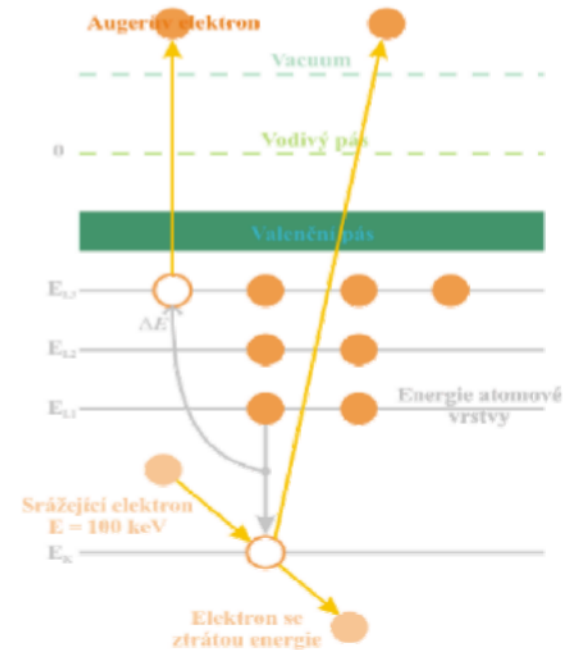


wikipedia.org



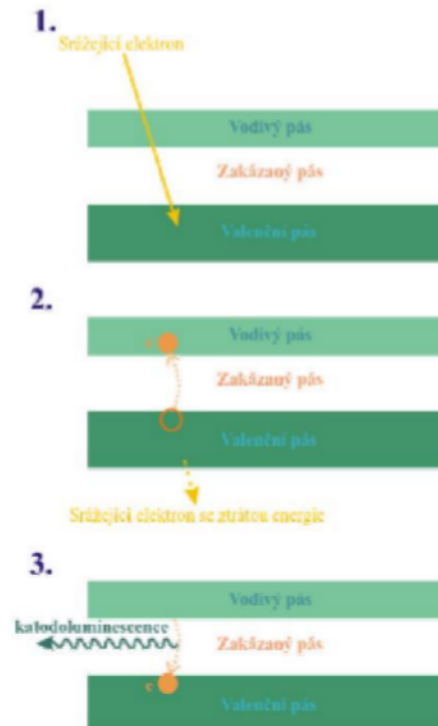
Augerovy elektrony

- primární elektron vyrazí el. z vnitřních vrstev el. obalu atomu, prázdné místo je zaplněno el. z vyšší slupky, uvolněná energie může být předána některému el. ve vnější slupce,
- velmi nízká energie,
- z nm (~ 3 nm) hloubek,
- ideální pro popis povrchových jevů



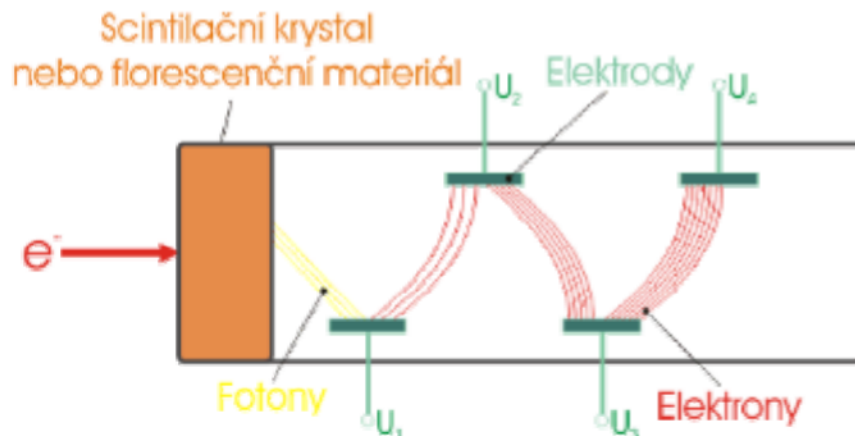
Katodoluminiscence

- el. z valenčního pásu přejde do vodivostního pásu, ve val. pásu vznikne vakance, rekombinací elektronu dojde k vyzáření fotonu ve viditelné oblasti



Everhart- Thornley detektor

- Scintilační krystal, který vytváří po dopadu elektronů fotony viditelného světla
- Světlovod ke katodě, na které se vnějším fotoelektrickým jevem uvolňují elektrony
- Ty jsou urychlovány k další elektrodě, atd...
- Z poslední elektrody (anody) je odebírán detekovaný proud





Detekce RTG záření

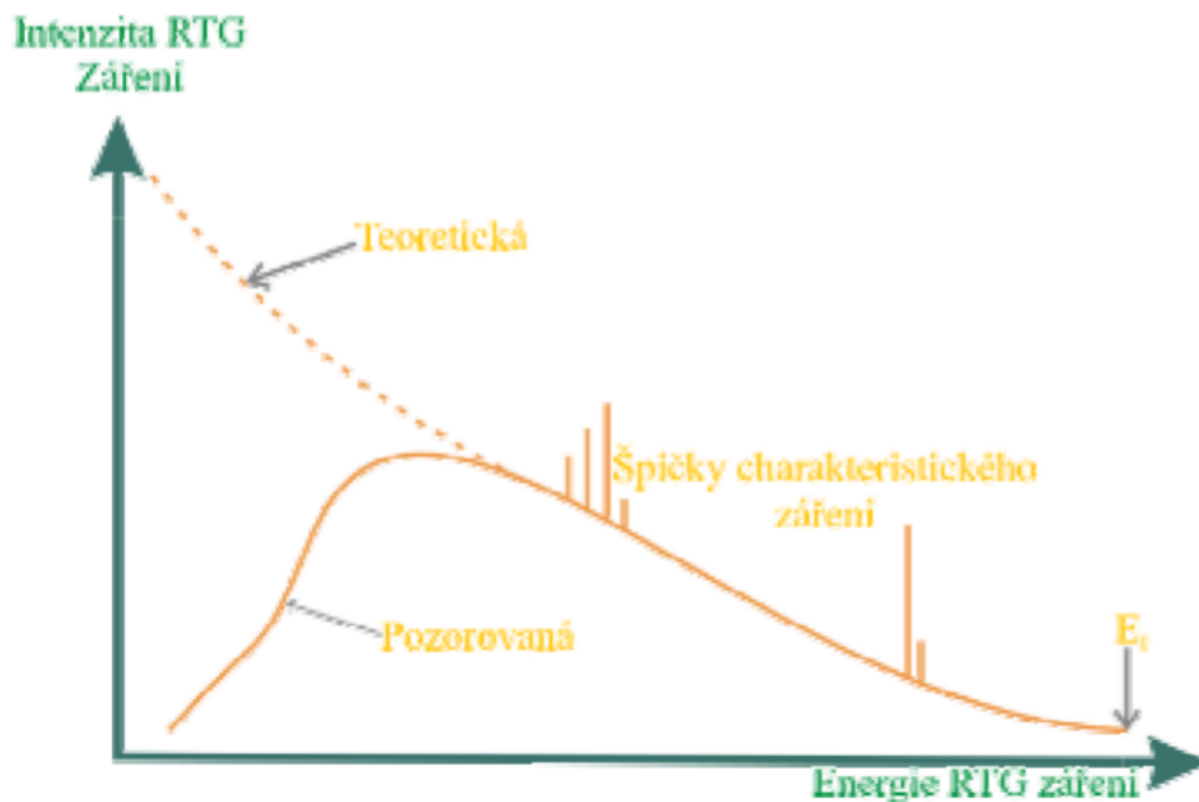
- Počítáče plněné plynem
 - dutý kovový válec, v ose je mezi izolátory natažen tenký drátek, na který je přivedeno kladné stejnosměrné napětí (1000 – 2000 V), záporný pól je spojen s pláštěm válce
 - Vniknutím záření vznikají elektrony a kladné ionty, které jsou přitahovány k příslušným elektrodám



Detekce RTG záření

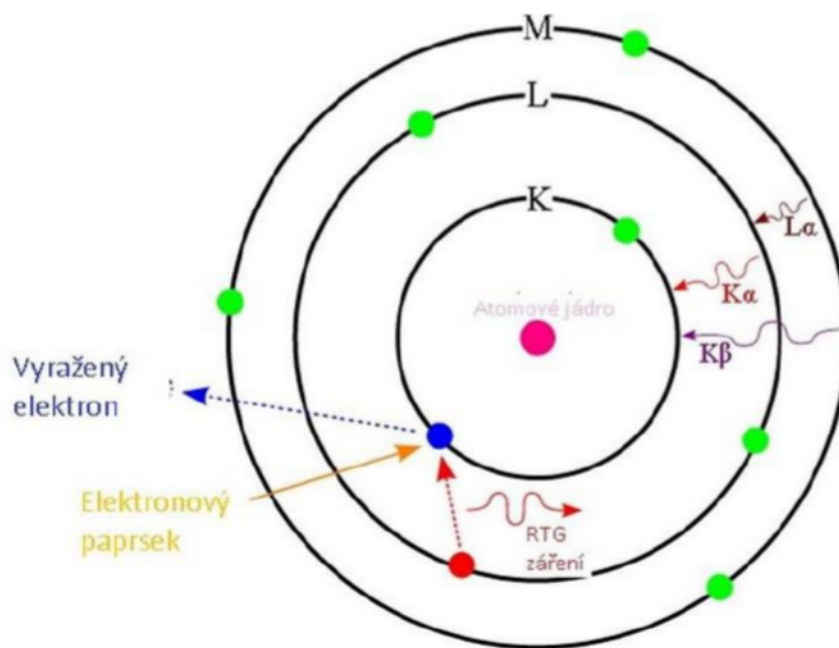
- Polovodičové detektory
 - Pracují na principu fotoefektu
 - Fotony vytvoří v polovodiči (velmi čisté krystaly Si nebo Ge) páry elektron-díra, množství je úměrné energii rtg záření

- Spojité (brzdové) záření
- Charakteristické záření



RTG paprsky jsou značeny podle toho, z které a do jaké vrstvy přechází elektron při zaplňování díry

- Jestliže zaplní elektron díru ve vrstvě K z vrstvy L vyzáří se záření K_{α}
- Jestliže zaplní elektron díru ve vrstvě K z vrstvy M vyzáří se záření K_{β}
- Jestliže zaplní elektron díru ve vrstvě L z vrstvy M vyzáří se záření L_{α}



EDS detektor

- Rozklad RTG záření podle energie
- Polovodičový detektor
- Nízké spektrální rozlišení (130-155 eV)
- Rychlejší
- Nedochází k pohybu mech. částí
- Méně nákladné

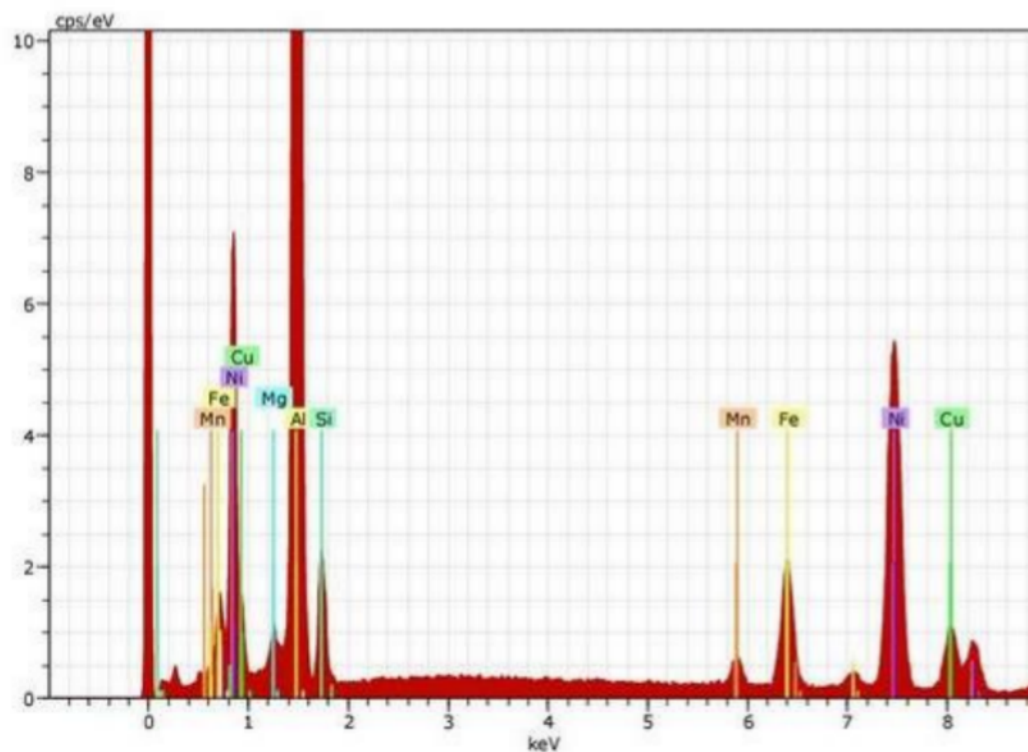
WDS detektor

- Rozklad RTG záření podle vlnové délky
- Využívá Braggova vztahu
$$2d \sin \alpha = n\lambda$$
- Vysoké spektrální rozlišení (2-6 eV)
- Pomalejší
- Dochází k pohybu mech. částí
- Nákladné

Rtg záření



- Pozice píku závisí na jeho energii
- Velikost (plocha) píku určuje množství prvku



EDS spektrum

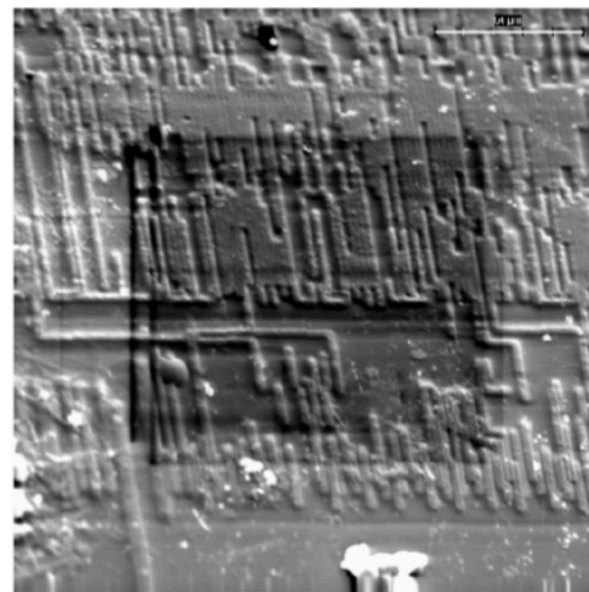
- Z (protonové číslo) – korekce na BSE
 - BSE opouští vzorek, aniž by došlo k produkci rtg záření
 - Množství BSE závisí na atomovém čísle
 - Korekce na sníženou produkci rtg kvůli BSE
- A (absorpce) – charakteristické záření je částečně pohlcované hmotou vzorku v závislosti na chemickém složení zkoumané oblasti a energii daného rtg záření
- F (fluorescence) – charakteristické a spojitě rtg záření vyvolává emisi sekundárního rtg záření o nižší energii

- Příprava vzorků pro TEM
 - Přímá metoda – tenké vzorky celé, příp. řezy
 - Nepřímá metoda – studujeme repliku
 - Plastové
 - Uhlíkové
 - Nepřímé (dvojstupňové)

- Příprava vzorků pro SEM
 - Vodivé materiály není třeba zvlášť připravovat
 - Na nevodivé materiály se nanáší vrstvička Au nebo slitiny Au-Pd o tloušťce, která nenaruší strukturu povrchu (10 nm)



wikipedia.org



A to je bohužel dnes všechno!

Tak zase příště

Elektronová mikroskopie

Fyzika III

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 obraťte 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 plazmatu

Fyzika III



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



Ústav fyziky a měřicí techniky

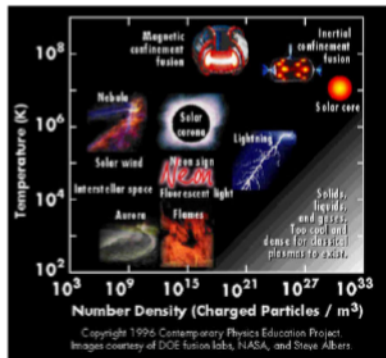


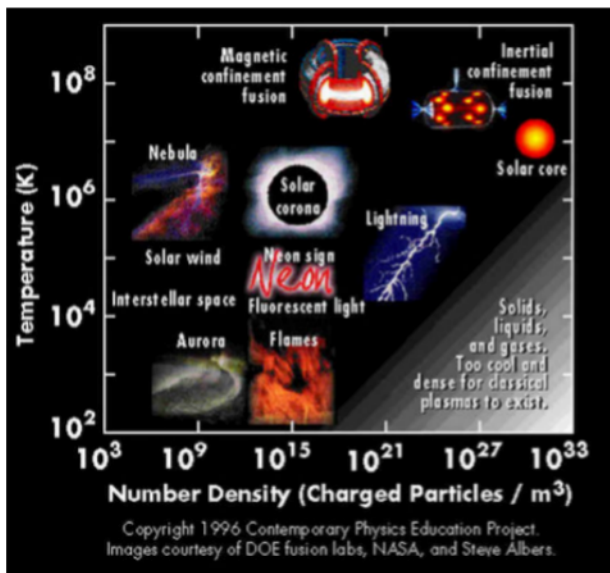
Dílo podléhá licenci Creative Commons 4.0 Česko
Uveďte původ - Zachovejte licenci

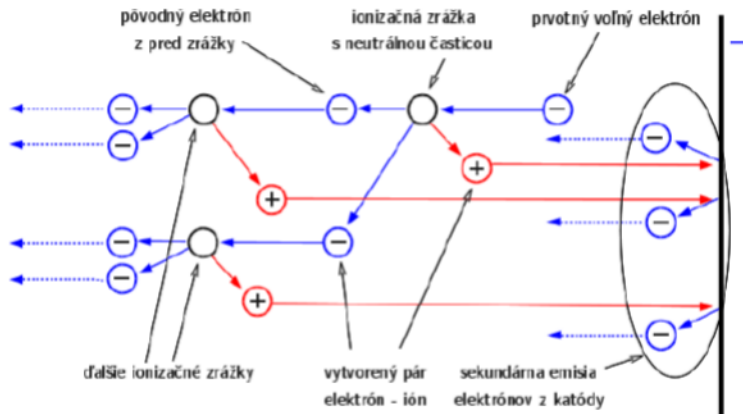
- To plazma!
- Plazmatem se nazývá částečně nebo plně ionizovaný plyn složený z iontů, elektronů a neutrálních částic, které vykazují kolektivní chování a kvazineutralitu.

- Plazma dělíme na:

- vysokoteplotní
teplota 10 až 20 tisíc K
blesky, nitra hvězd, tokamak
- nízkoteplotní
excitované pouze elektrony
elektrické výboje, polární zář

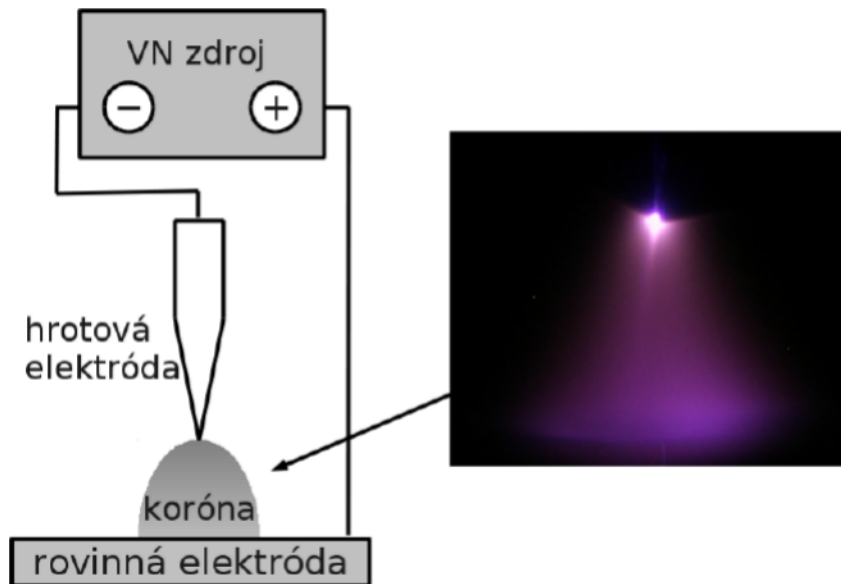


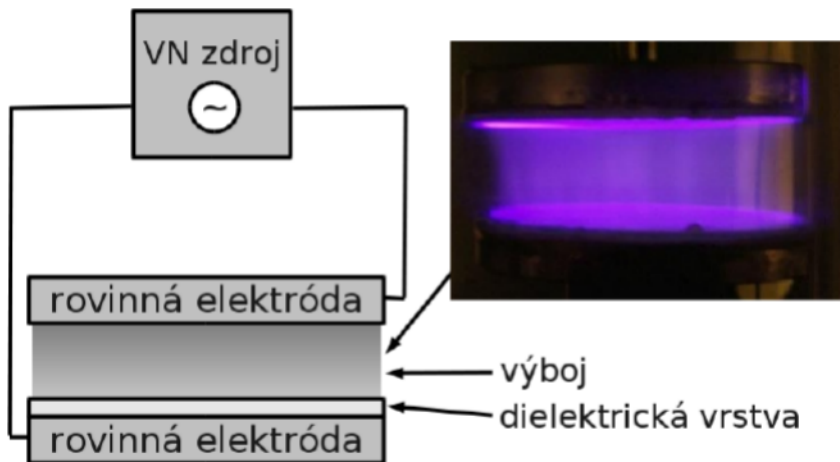


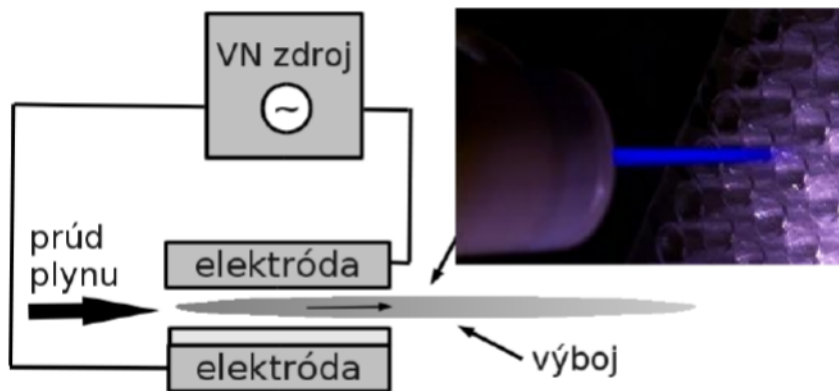


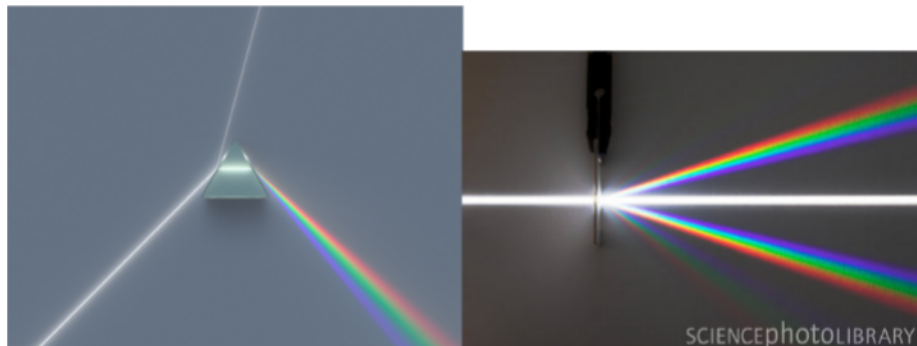
$$N_n = \gamma(N_0 e^{\alpha d} - N_0)$$

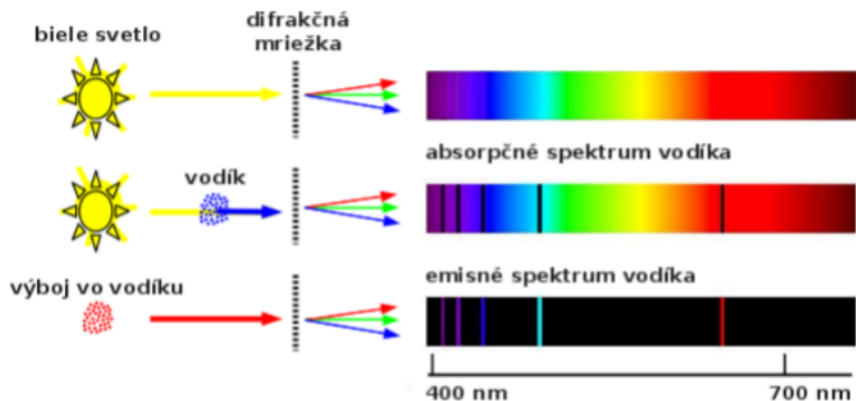
Elektrické výboje – koronový výboj

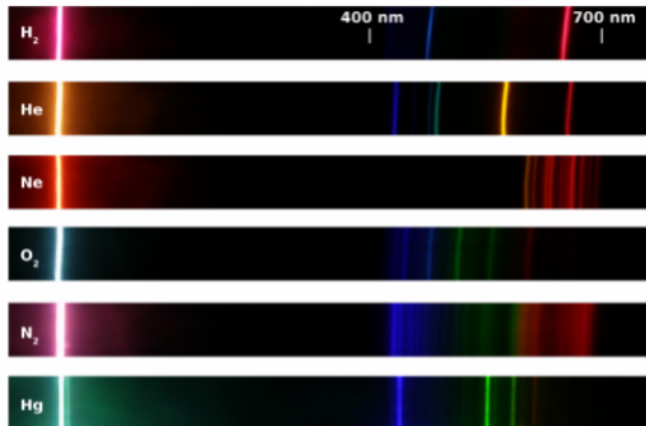




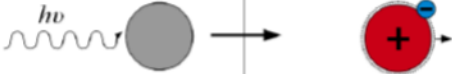
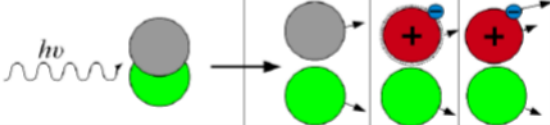


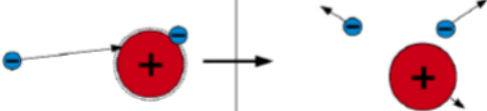


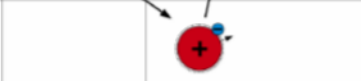




excitace	
ionizace	
záchyt	
disociace	

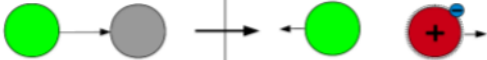
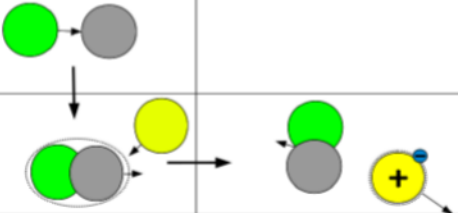
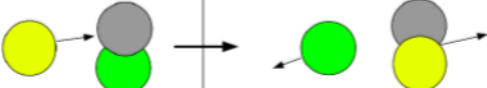
fotoexcitace	
fotoionizace	
fotodisociace	

deexcitace	
postupná excitace	
postupná ionizace	

rekombinace	
	
	
excitace	
ionizace	
disociace	
vyražení	

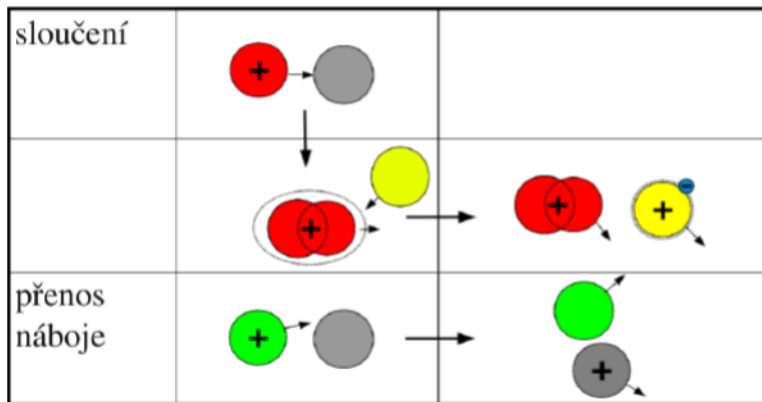
deexcitace	
postupná excitace	
postupná ionizace	
excitace	
ionizace	
disociace	

Srážka dvou těžkých neutrálních částic

excitace	
ionizace	
sloučení	
substituce	

ionizace	
asociativní ionizace	
Penningova excitace	
disociace	

ionizace	
přenos náboje	
rekombinace	
odtržení elektronu	

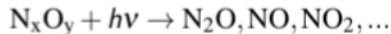
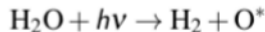
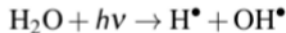
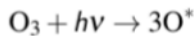
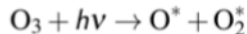
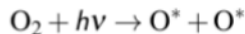
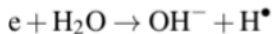
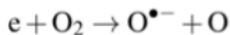
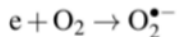
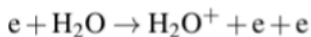
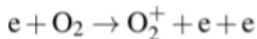
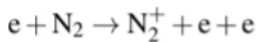


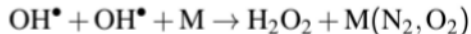
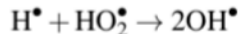
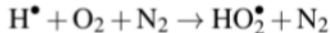
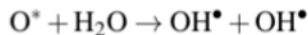
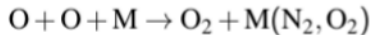
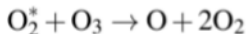
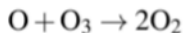
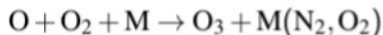
- Suchý vzduch
- 78 % dusík
 - 21 % kyslík
 - 1 % ostatní plyny

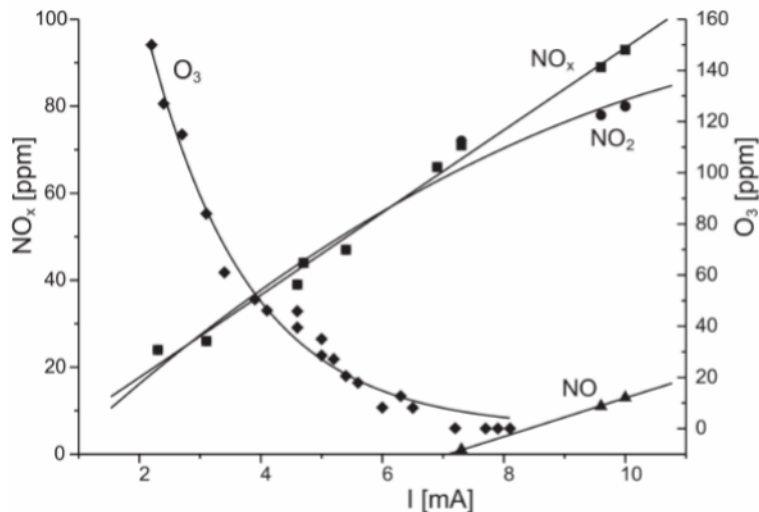
- Vlhký vzduch
- vodní pára, při běžných teplotách 20–30 °C v množství až do 20 g/m³.

Chemické reakce budou probíhat hlavně mezi dusíkem, kyslíkem a vodní párou. V tomto prostředí vznikají, mimo jiných, různé aktivní částice, které se souhrnně nazývají reaktivní kyslíkové částice (ROS – reactive oxygen species) a reaktivní dusíkové částice (RNS – reactive nitrogen species).

- ROS** atomární kyslík O , singletový kyslík 1O_2 , ozon O_3 , superoxidový anion $O_2^{\bullet-}$, hydroxylový radikál $OH^\bullet$, hydroxylový anion OH^- , peroxidový anion $HO_2^\bullet$, nebo peroxid vodíku H_2O_2
- RNS** atomární dusík N , excitovaný atomární dusík N^* , elektronově excitovaná molekula dusíku N_2^* , vibračně excitována molekula dusíku $N_2(v)$ nebo oxid dusnatý NO .







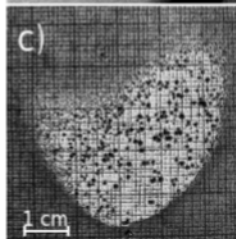
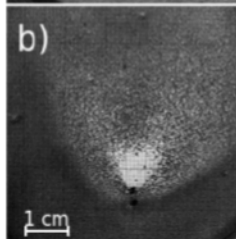
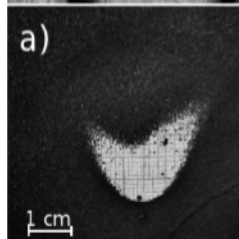
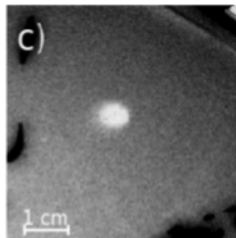
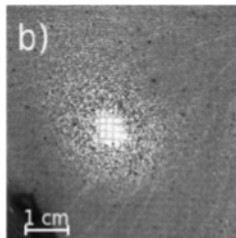
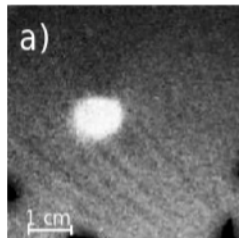
Závislost koncentrace generovaných oxidů dusíku a ozonu na proudu v záporném korónovém výboji v proudícím vzduchu.

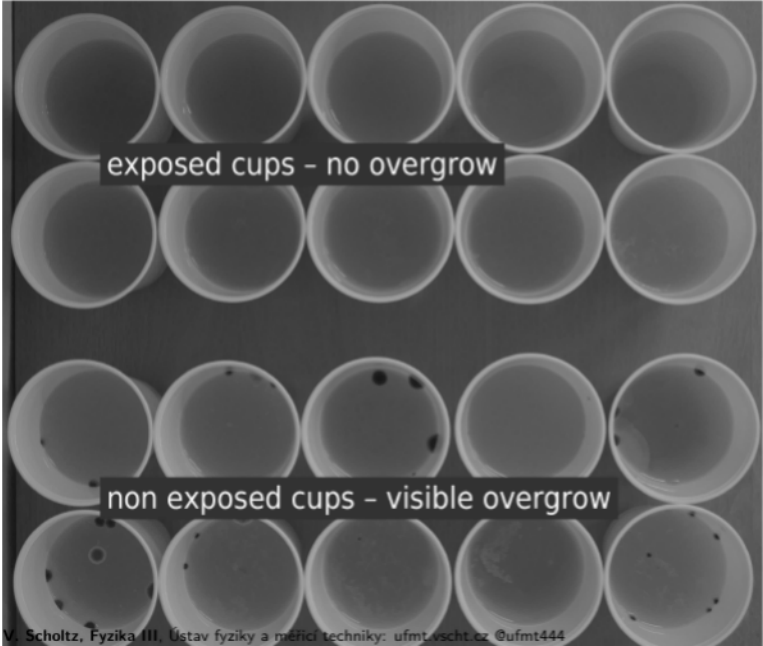
- Hubení mikroorganismů

- Dekontaminace povrchů
- Dekontaminace kapalin
- Dezinfekce kůže
- Léčba kožních mykóz
- Mrtvá voda – PAW

- Modifikace nanočástic

- Změna povrchových vlastností
 - polypyrrolu
 - diamantů
- Příprava a modifikace Si nanostruktur



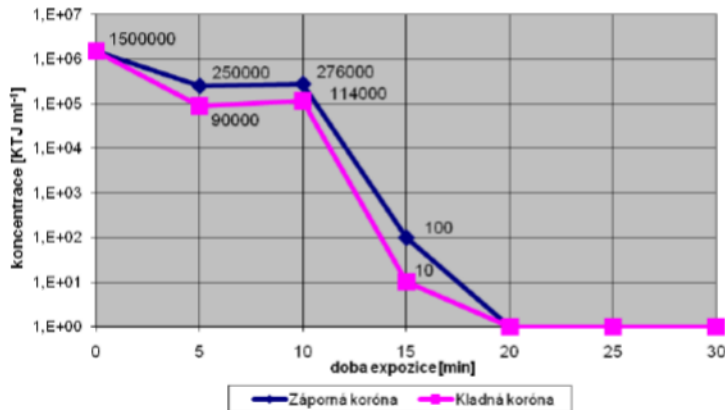


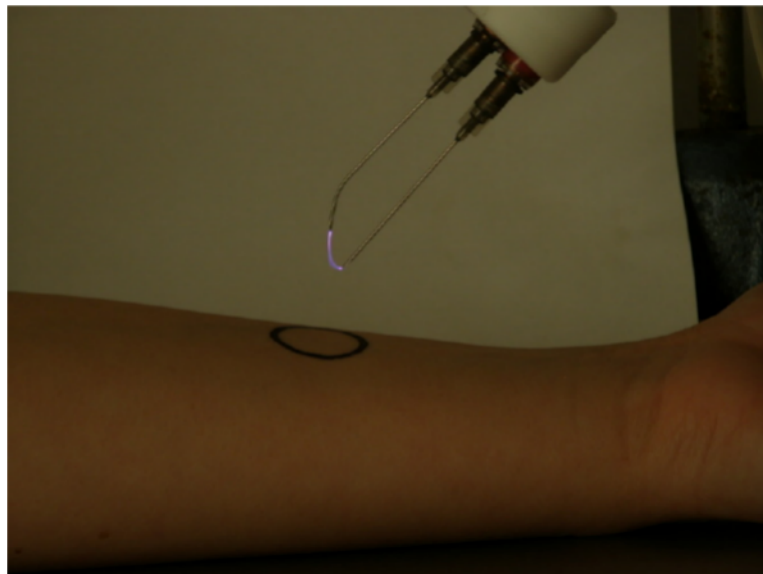
exposed cups - no overgrow

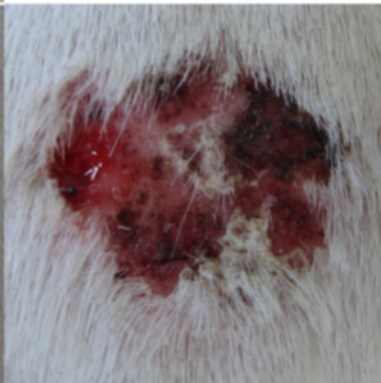
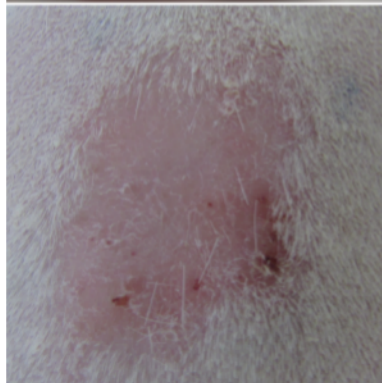
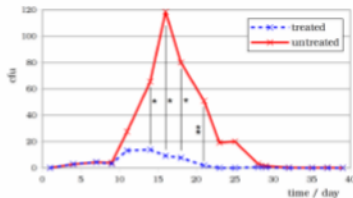
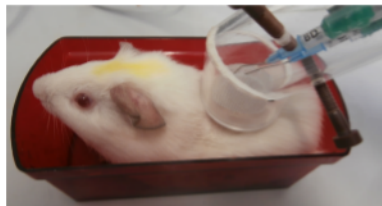
non exposed cups - visible overgrow



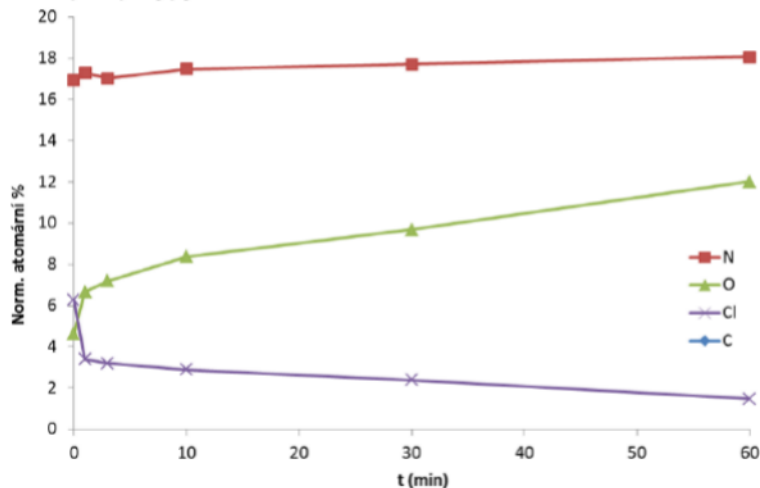
Cladosporium sphaerospermum



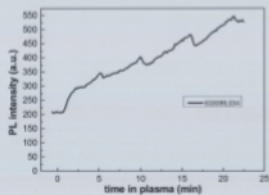
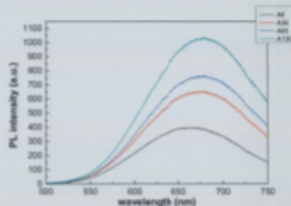
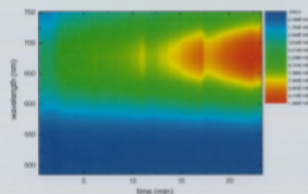




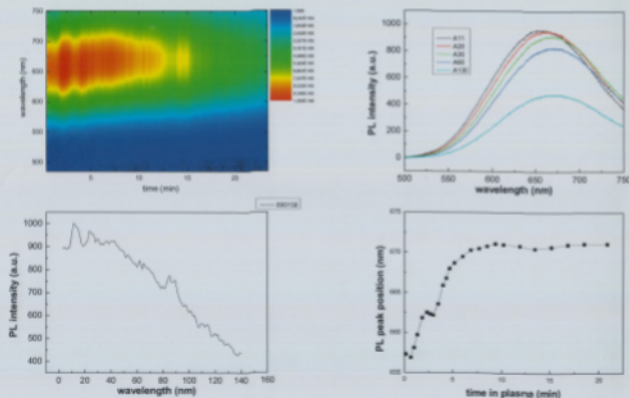
EDS pro polypyrrol

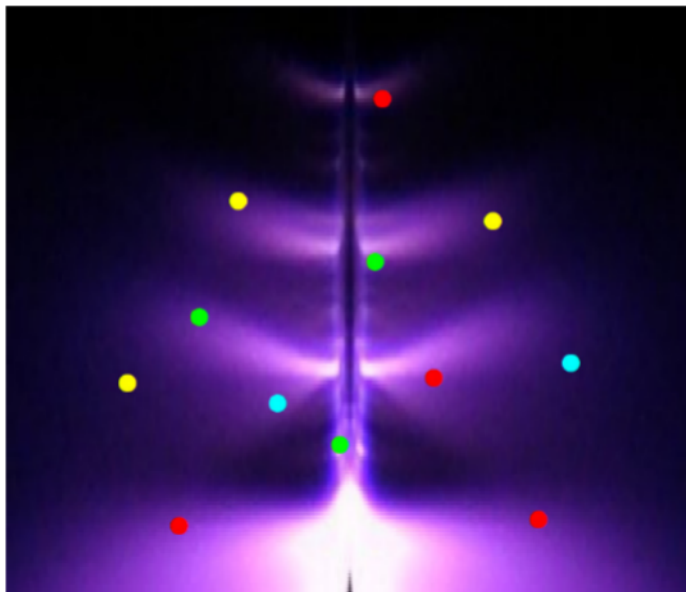


discharge in ethanol, higher plasma



discharge in H₂O, higher plasma





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!

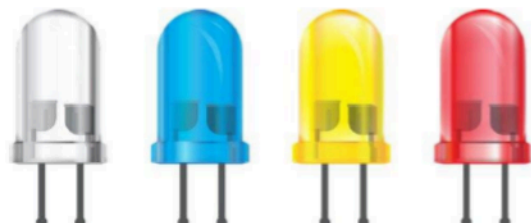
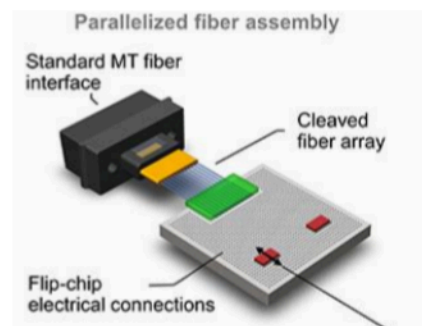
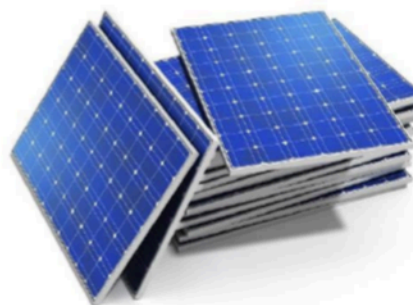
Optoelektronika



- Fotonika: zařízení, která kontrolují tok fotonů
- Elektronika: zařízení, která kontrolují tok elektronů

➡ Optoelektronická zařízení: 1) pomocí elektronů kontrolují tok fotonů
2) využívají fotonů ke generaci volných elektronů

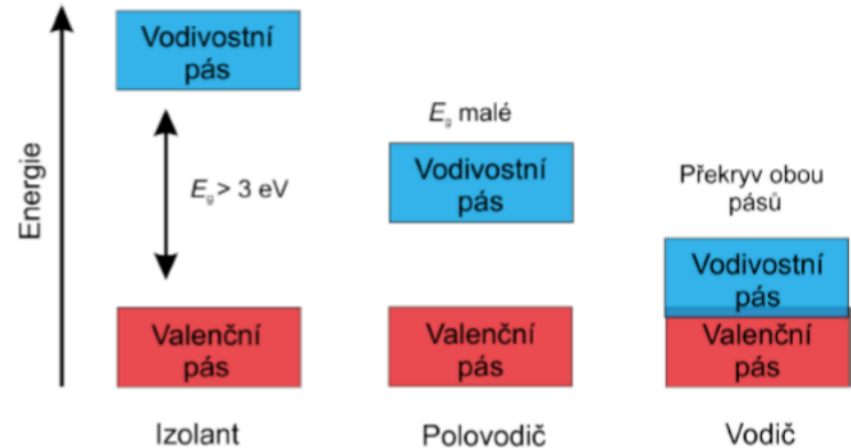
- Jmenovitě: - **zdroje a detektory záření**
- zesilovače
- vlnovody
- modulátory
- sensory
- nelineární optické prvky





- Pásová struktura: energetické pásy oddělení zakázanými oblastmi energií

- Izolant: $E_g > 3 \text{ eV}$
- Vodiče: $E_g < 0 \text{ eV}$
- Polovodiče: $0,1 \text{ eV} < E_g < 3 \text{ eV}$



Polovodiče:

- 1) Elementární polovodiče (prvky IV. skupiny):
 - C (diamant), $E_g = 5,5 \text{ eV}$
 - Si, $E_g = 1,1 \text{ eV}$
 - Ge, $E_g = 0,66 \text{ eV}$ (Sn a Pb, E_g příliš malý)
- 2) Binární polovodiče (Prvky III./V. nebo II./VI.):
 - GaAs ($E_g = 1,42 \text{ eV}$)
 - CdTe ($E_g = 1,51 \text{ eV}$)
 - InAs ($E_g = 0,36 \text{ eV}$)
- 3) Ternární a kvaternární polovodiče

➤ Zásadní pro pochopení vlastností polovodičů není jen koncentrace příměsí, E_g , ale i $E(k)$

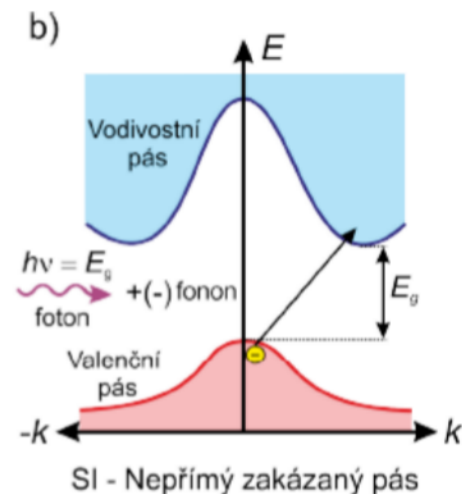
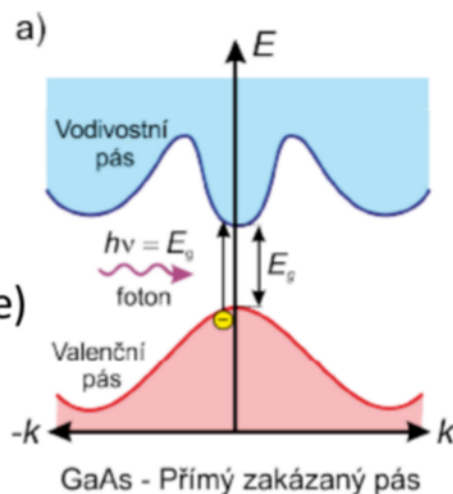
➤ Ve vakuu: $E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}$.

➤ U polovodičů je to komplikovanější

➤ Nepřímý polovodič (elem. polovodiče)

➤ Přímý polovodič (binární)

➤ Koncentrace nosičů elektronů a děr:



$$n(E) = N_c f(E) \quad \text{a} \quad p(E) = N_v [1 - f(E)]$$

Kde:

$$N_c \approx (E - E_c)^{1/2}$$

$$N_v \approx (E_v - E)^{1/2}$$

$$\text{a} \quad f(E) = \frac{1}{\exp\left[\frac{E - E_F}{k_b T}\right] + 1}$$

- Vodivost polovodičů: elektron ve vodivostním pásu a díra ve valenčním pásu
- Při teplotě $T = 0\text{K}$ polovodič nevede elektrický proud (plně zaplněné/prázdné pásy)
- Excitace volného elektron-děrového páru: Tepelně, světlem, el. polem atd.
- Zvyšování vodivosti: dotování
 - a) Akceptorem (p typ, nejčastěji prvky III. – B, Al, Ga)
 - b) Donorem (n typ, nejčastěji prvky V. – P, As, N)
- Polovodič může být intrinsický (bez příměsí) a extrinsický (s příměsí)

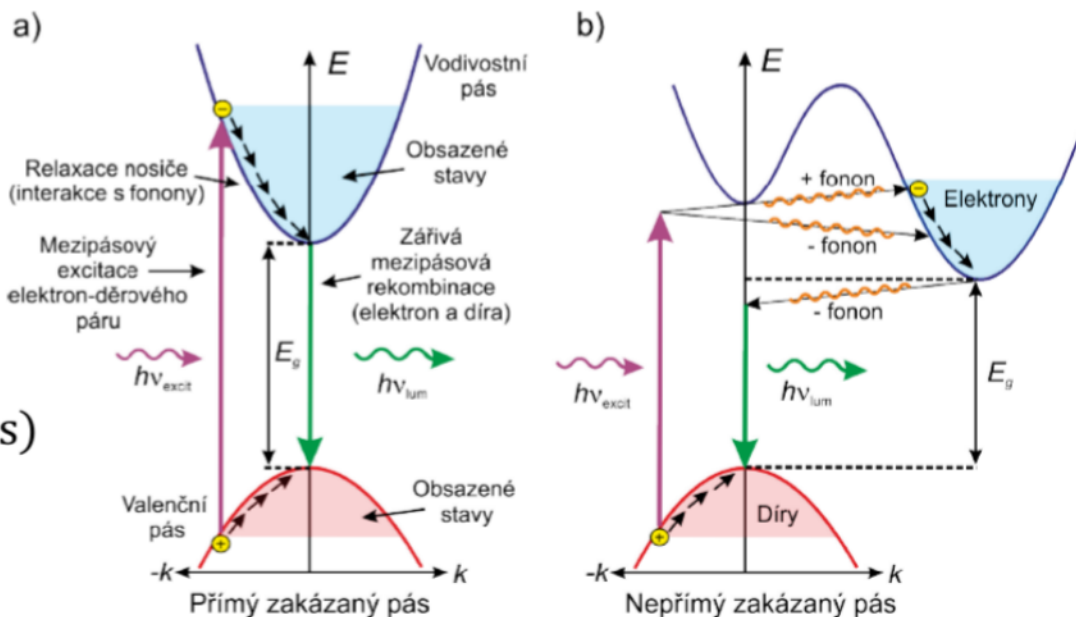
Procesy na excitovaných nosičích:

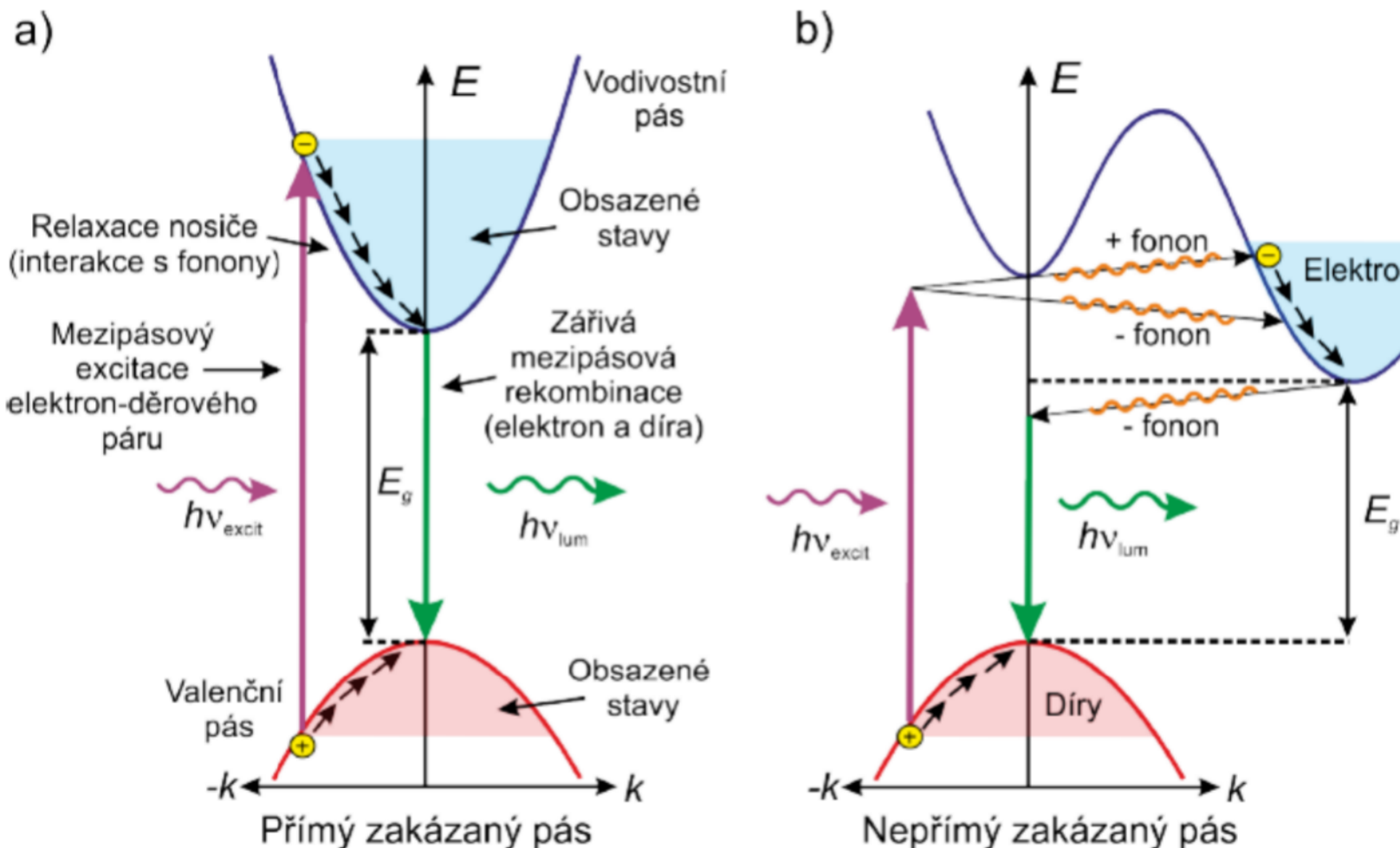
a) Relaxace ($\sim 10^{-12}\text{s}$)

b) Rekombinace



- Zářivá: a) přímý polovodič ($\sim 10^{-9}\text{s}$)
b) nepřímý polovodič ($\sim 10^{-6}\text{s}$)
- Nezářivá (Auger, fonony atd.)

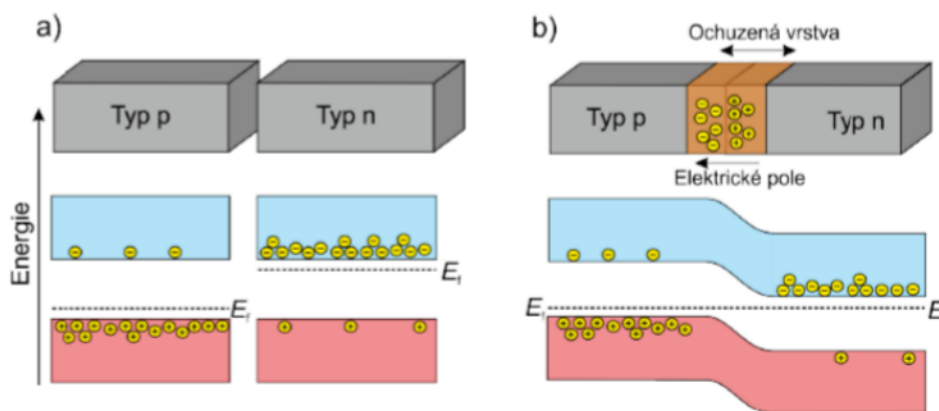




- Přechod p - n : Základ prvek polovodičových součástek. Kombinace dvou různě dotovaných stejných polovodičů (homopřechod)
- Propojením polovodičů dojde k difuzi majoritních nosičů.
- Vznik oblasti bez pohyblivých nosičů, která vytváří el. pole blokující další difuzi (vnitřní napětí V_0)
- Přiložení napětí v propustném směru ➡ snížení V_0 (exponenciální proud)
- Přiložení napětí v závěrném směru ➡ rozšíření V_0 (proud minoritních nosičů)

➤ Aplikace:

- Usměrňovače
- Logický propust
- Regulátor napětí
- Luminiscenční a laserové diody
- Fotodetektory
- Sluneční články



- Přechod p - n : Základ prvek polovodičových součástek. Kombinace dvou různě dotovaných stejných polovodičů (homopřechod)
- Propojením polovodičů dojde k difuzi majoritních nosičů.
- Vznik oblasti bez pohyblivých nosičů, která vytváří el. pole blokující další difuzi (vnitřní napětí V_0)
- Přiložení napětí v propustném směru  snížení V_0 (exponenciální proud)
- Přiložení napětí v závěrném směru  rozšíření V_0 (proud minoritních nosičů)

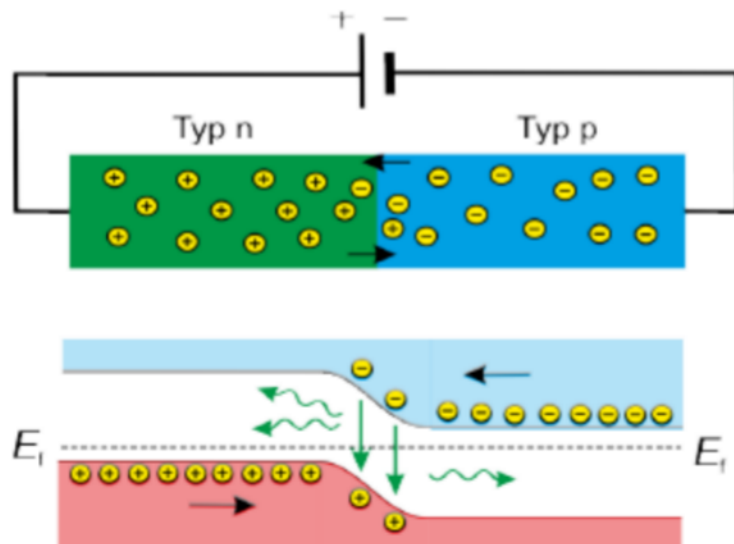
Heteropřechody: Kombinace různých polovodičů

- Svou strukturou vytvářejí skokovou změnu energetických pásů
- Umožňují prostorovou lokalizaci elektronů a děr na rozhraních
- Umožňují tvorbu nízkodimenzionálních struktur, mřížek atd....
- Typický zástupce: p - i - n struktura (rozšiřuje ochuzenou oblast)



Light emitting diod (LED)

- Generace fotonů u polovodičů: elektron-děrová rekombinace
 - Běžné podmínky: Málo nosičů pro efektivní generaci světla
- ➔ Injekce nosičů vnějším polem do p - n přechodu v propustném směru
- Vznik tzv. injekční luminiscence (spontánní jev). Zařízení využívající tento efekt - LED



Light emitting diod (LED)

- Vyzáření výkon LED: $P = \eta_e \eta_i h\nu \frac{i}{e}$

kde i je injektovaný el. proud a η_e a η_i jsou vyzařovací a vnitřní kvantová účinnost

Hlavní parametry určující výkon LED

- Vnitřní kvantová účinnost η_i (schopnost přeměny elektronu a díry na foton)

- Si $\sim 0,001\%$
- GaAs $\sim 60\%$
- GaN $\sim 100\%$



- Vyzařovací účinnost η_e (schopnost vyzářit fotony z LED)

běžně: $\eta_e \sim 1\%$



Light emitting diod (LED)

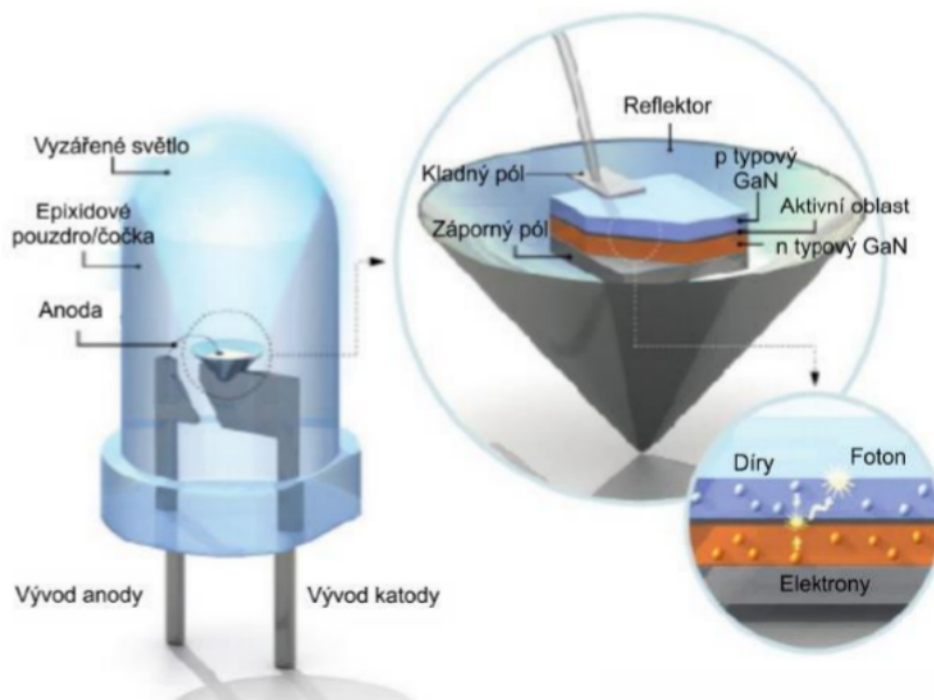
➤ Parametry ovlivňující vyzařovací účinnost:

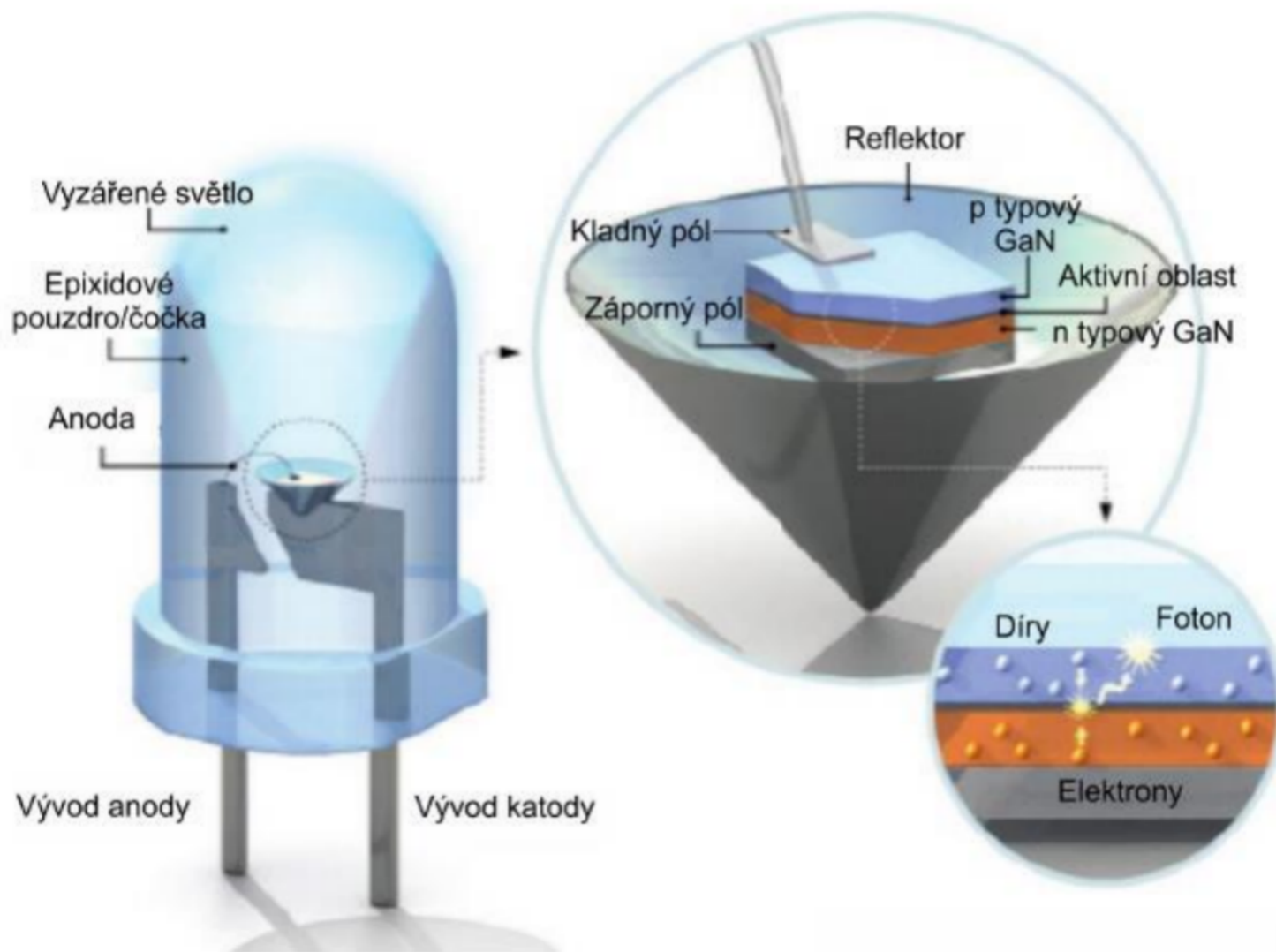
- a) Všesměrovost luminiscence. Mimo polovodič jen záření $\theta \leq \theta_c$ (GaAs, $\theta_c \sim 16^\circ$)
- b) Zpětný odraz záření od rozraní polovodič/vzduch ($\sim 30\%$)
- c) Absorpce fotonů průchodem polovodičů

➤ Řešení:

- a) Zrcadlící plochy u polovodičů
- b) Ztenčení jedné část p - n přechodu
- c) Epoxidové pouzdro

➔ $\eta_e \sim 10\%$





Light emitting diod (LED)

➤ Vlastnosti emitovaného záření:

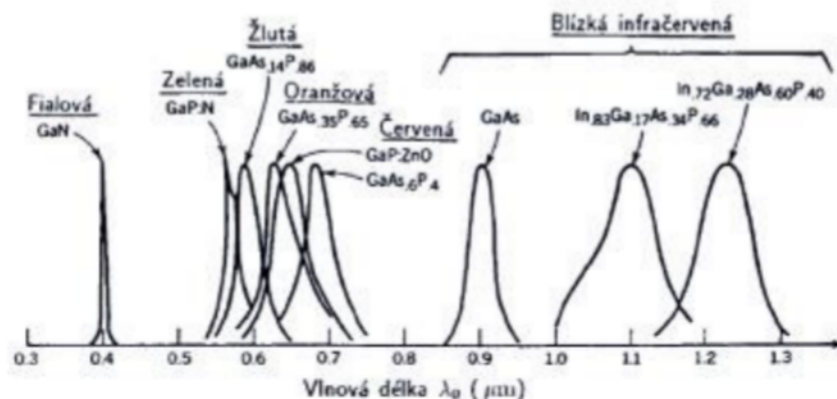
a) Maximum intenzity vyzářeného světla

- maximum vyzařování neodpovídá zakázanému pásu: $h\nu_{max} = E_g + \frac{k_b T}{2}$

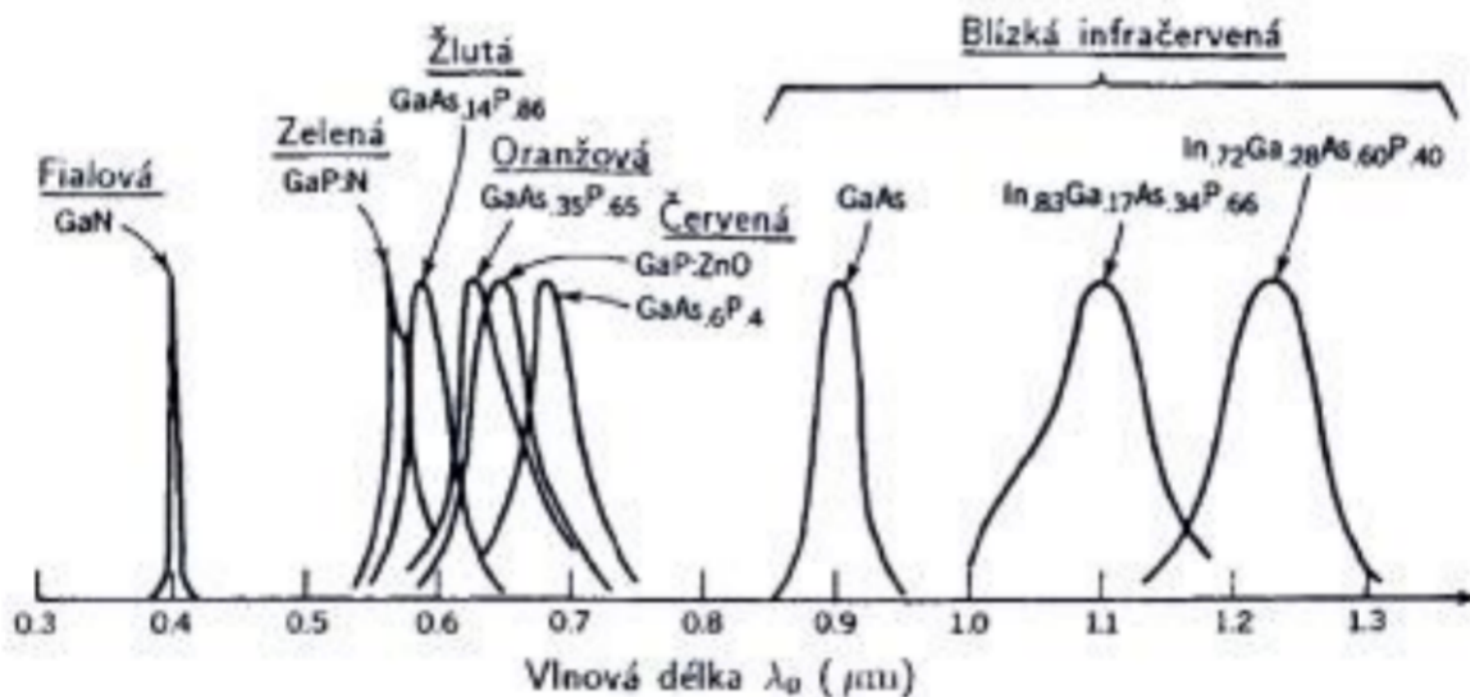
b) Spektrální šířka záření: $\Delta\lambda \approx 1,45 \lambda_{max}^2$

LED o $\lambda_{max} = 1\mu\text{m}$ odpovídá $\Delta\lambda \approx 36 \text{ nm}$

c) Vyzařovaný spektrální interval: Použitý polovodič



Light emitting diod (LED)



Laserová dioda (LD, injekční polovodičové lasery)

- V principu se jedná o LED opatřenou zpětnou vazbou
- K laserování v podélném směru dochází vytvoření dostatečné hodnoty inverze el. proudem procházejícím v příčném směru
- Inverze mezi nosiči ve vodivostním a valenčním pásu (v podstatě 4 hlad. systém)
- S růstem čerpání roste oblast s inverzní populací. Roste nejen intenzita, ale i spektrální šířka

Transparentní hustota proudu:

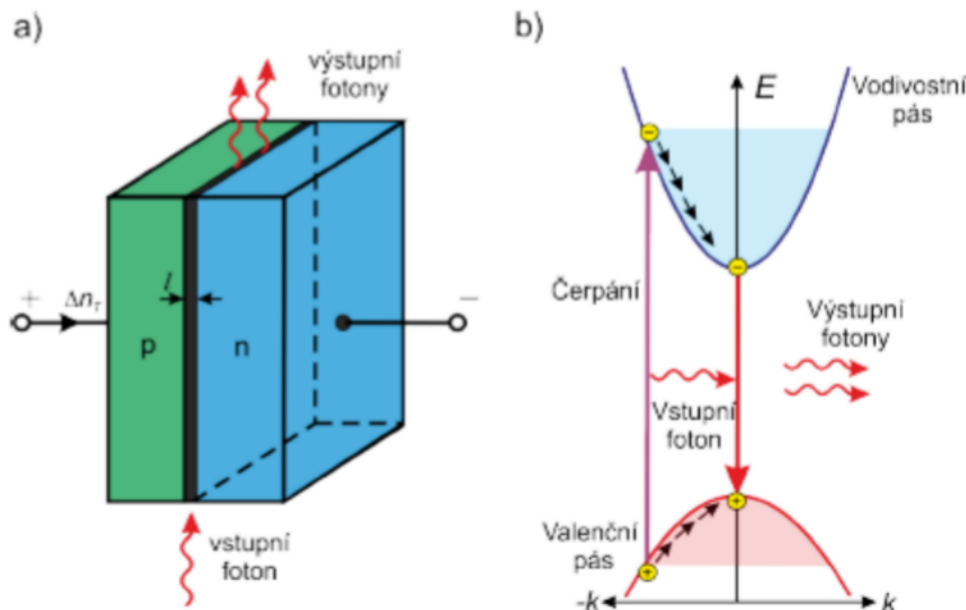
$$J_T = \frac{el}{\eta_i \tau_r} \Delta n_T$$

Prahová hustota proudu:

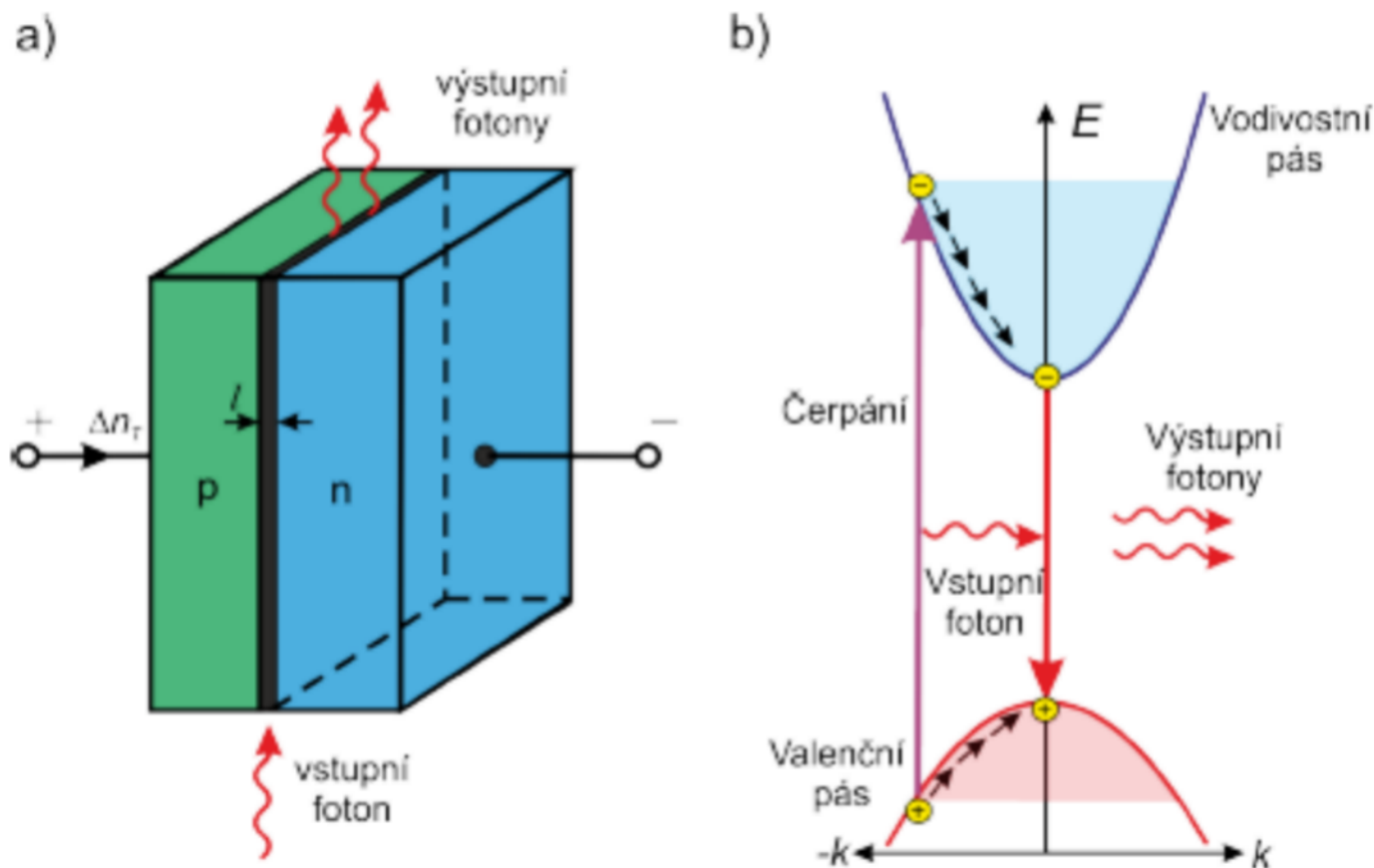
$$J_{th} = \frac{\alpha_r + \alpha}{\alpha} J_T$$

Výstupní výkon LD:

$$P = \frac{\eta_i \eta_e (J - J_{th})}{A} \frac{h\nu}{e}$$



Laserová dioda (LD, injekční polovodičové lasery)



Laserová dioda (LD, injekční polovodičové lasery)

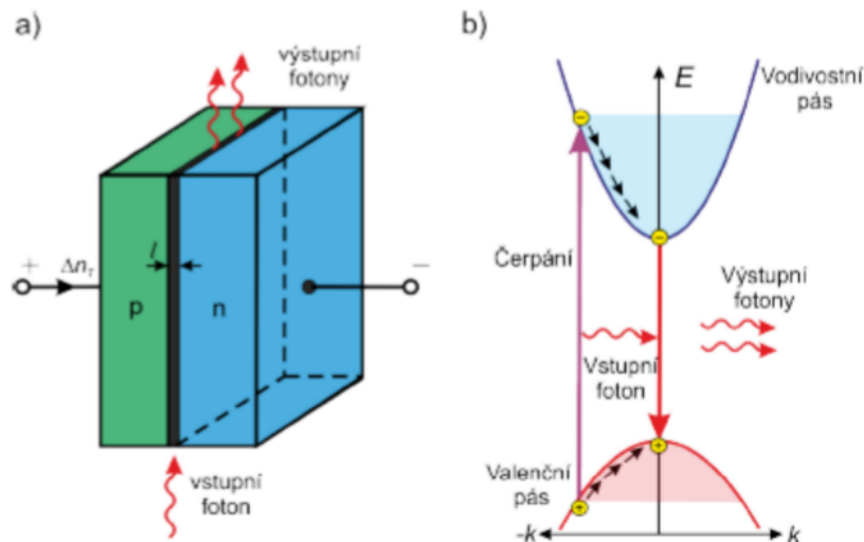
➤ Výhody LD:

- a) Vždy není nutné vytváření zpětnou vazou. Výrazné rozdíly indexu lomu materiálů často stačí pro vytvoření dostatečné odrazivosti.
- b) Vysoká účinnost generace:
 - Stimulovaná emise není všesměrová
 - Nejsou ztráty absorpcí
 - Vysoká odrazivost slouží jako zpětná vazba

➡ I běžné LD mají $\eta \sim 40 - 65\%$

➤ Nevýhody LD:

- a) Vysoká divergence svazku
- b) Špatné rozložení intenzity
- c) Nízká intenzita do 100 mW



Laserová dioda (LD, injekční polovodičové lasery)

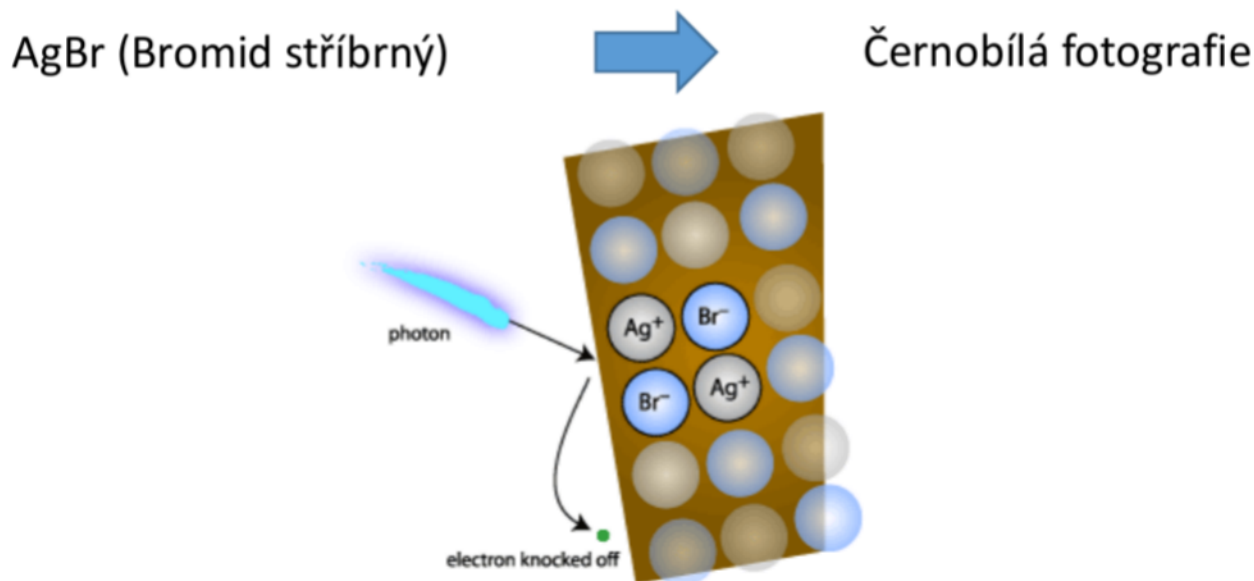
- Běžné LD: a) InGaAsP nebo GaInP
 - b) LD založené na kvantových tečkách

- Aplikace: a) Čerpání pevnolátkových laserů
 - b) Ukazovátka
 - c) Lasery pro běžnou elektroniku
 - d) Laserové tiskárny

- **Detektory záření:** Zařízení, které přeměňuje světelné záření na jiný druh měřitelného signálu

Dělení

- a) Emulzní fotodetektory: dopadající záření způsobuje fotochemickou reakci

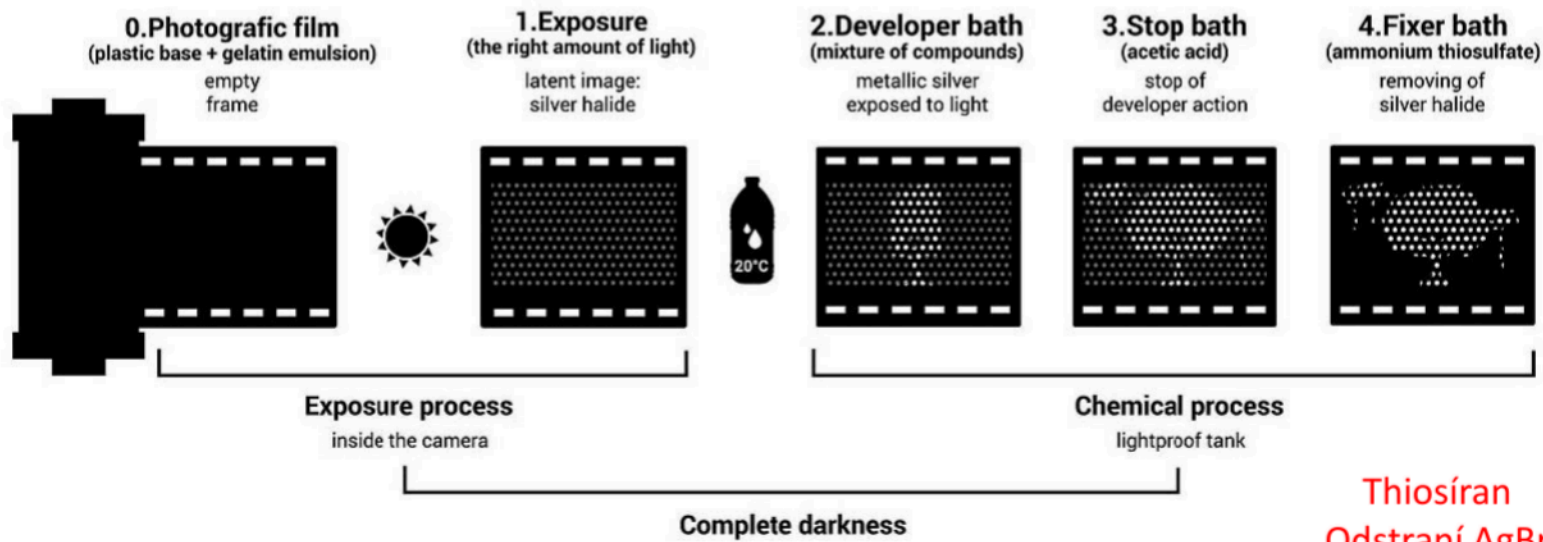


- **Detektory záření:** Zařízení, které přeměňuje světelné záření na jiný druh měřitelného signálu

Dělení

a) Emulzní fotodetektory: dopadající záření způsobuje fotochemickou reakci

Slabé redukční činidlo : Hydrochinon



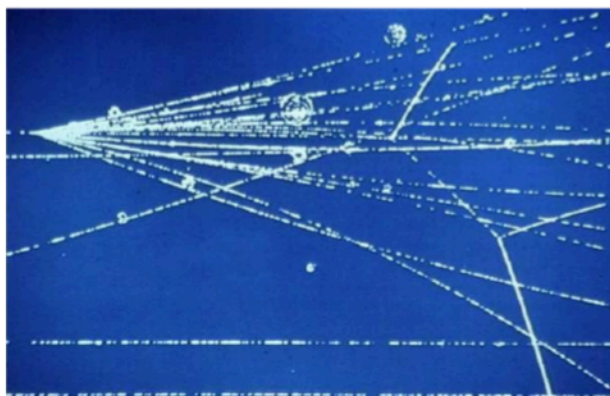
Thiosíran
Odstraní AgBr

- **Detektory záření:** Zařízení, které přeměňuje světelné záření na jiný druh měřitelného signálu

Dělení

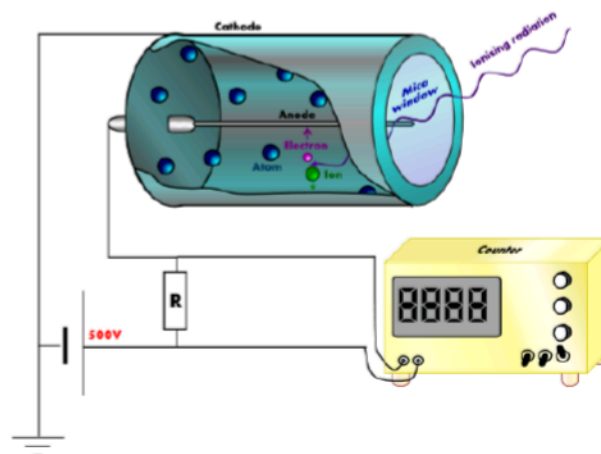
- a) Emulzní fotodetektory: dopadající záření způsobuje fotochemickou reakci
- b) Plynové fotodetektory: dopadající záření ionizuje nebo excituje atomy plynu detektoru

Bublinková (mlžná) komora
(Glacer 1952, 1960 NP)



wikipedia.org

Geigerův-Müllerův počítač (1908)



- **Detektory záření:** Zařízení, které přeměňuje světelné záření na jiný druh měřitelného signálu

Dělení

- a) Emulzní fotodetektory: dopadající záření způsobuje fotochemickou reakci
- b) Plynové fotodetektory: dopadající záření ionizuje nebo excituje atomy plynu detektoru
- c) Termální fotodetektory: dopadající záření zvyšuje teplotu detekčního materiálu.

Bolometry (změna odporu)



Termovizní
kamera

Termočlánek (změna termoelektrického napětí)



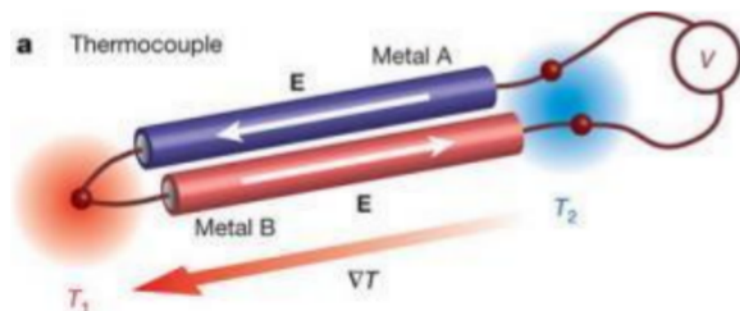
Seebeckův
termoelektrický
jev

- **Detektory záření:** Zařízení, které přeměňuje světelné záření na jiný druh měřitelného signálu

Dělení

- a) Emulzní fotodetektory: dopadající záření způsobuje fotochemickou reakci
- b) Plynové fotodetektory: dopadající záření ionizuje nebo excituje atomy plynu detektoru
- c) Termální fotodetektory: dopadající záření zvyšuje teplotu detekčního materiálu.

Termočlánek (změna termoelektrického napětí)



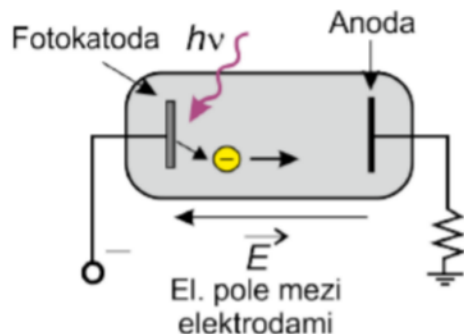
Seebeckův
termoelektrický
jev

- **Detektory záření:** Zařízení, které přeměňuje světelné záření na jiný druh měřitelného signálu

Dělení

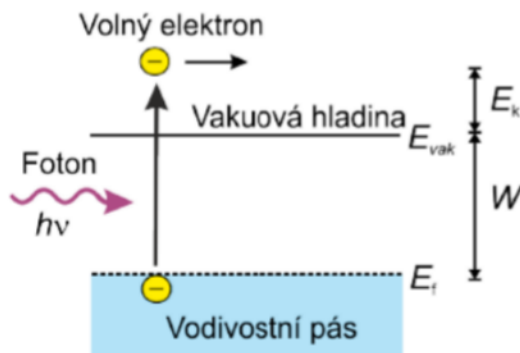
- a) Emulzní detektory: dopadající záření způsobuje fotochemickou reakci
- b) Plynové detektory: dopadající záření ionizuje nebo excituje atomy plynu detektoru
- c) Termální detektory: dopadající záření zvyšuje teplotu detekčního materiálu.
- d) Fotonové detektory: detekce záření na základě fotoelektrického jevu.

a) Detektory založené na vnějším fotoelektrickém jevu (fotoelektrická emise, fotonky)



Intenzita světla $\sim$ El. proudu

b) Detektory založené na vnitřním fotoelektrickém jevu (fotovodivost)



- Fotoodpory
- Fotodiody
- CMOS
- CCD

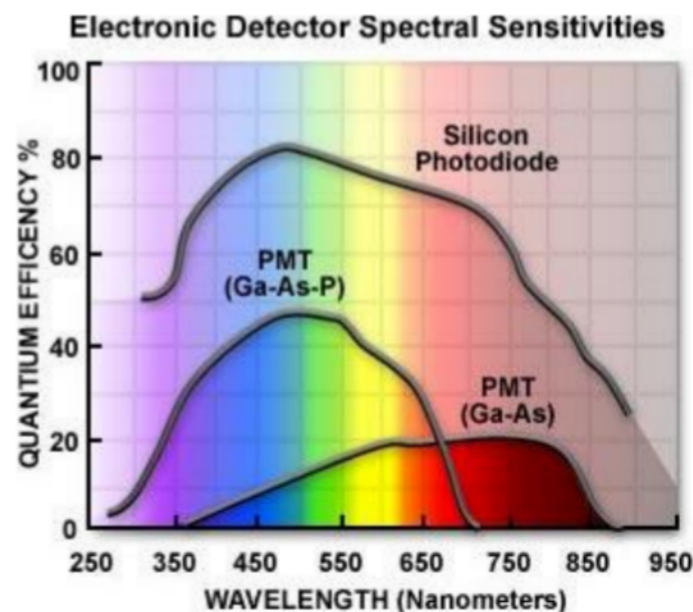
c) Scintilační detektory

- **Kvantová účinnost η :** pravděpodobnost, že dopadající foton vygeneruje elektron-děrový pár, který přispěje k el. proudu detektorem. η nabývá hodnot 0 – 1.

$$\eta = (1 - R)\delta[1 - \exp(-\alpha d)]$$

kde R je odrazivost povrchu detektoru, α je absorpční koeficient materiálu detektoru, d je jeho tloušťka a δ je koeficient určující kolik el-děr párů přispěje k el. proudu.

- Kvantová účinnost je navíc výrazně frekvenčně závislá.



- **Citlivost C:** vztah mezi el. proudem v detektoru a výkonem dopadajícího záření

$$C = \frac{\eta e}{h\nu}$$



Záření o stejné intenzitě, ale vyšší vlnové délce vyvolá větší odezvu detektoru

- **Koeficient zisku z:** průměrný počet elektronů v obvodu vyvolaný generací jednoho elektron-děrového páru

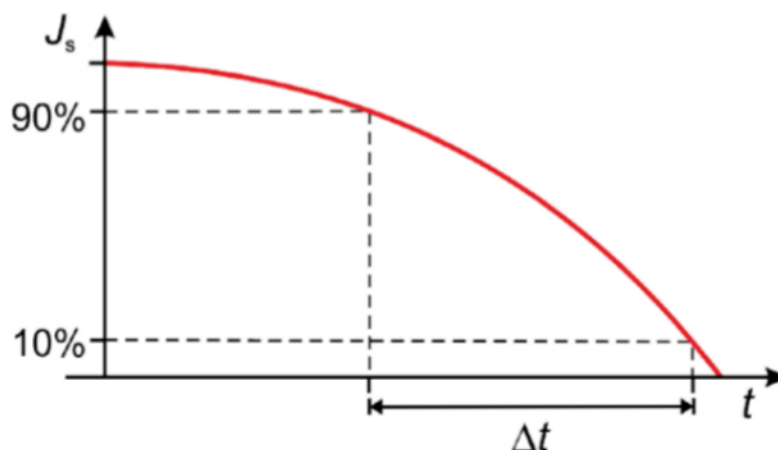
$$z = \frac{J}{G} = \frac{\tau_n}{t_R}$$

kde G je počet generovaných el-děr párů, τ_n je doba života elektronů a t_R je doba, za kterou se dostane elektron od jedné elektrody ke druhé (doba průletu).

- z může být $\ll 1$ (el-děr. rekombinace), ale i $\gg 1$ (generace sekundárních el-děr. párů)



- **Doba odezvy detektoru Δt :** doba, po kterou se fotogenerované nosiče nacházejí v detektoru (ovlivňuje operační rychlost detektoru).
- Δt bývá standardně dáno dobou, za kterou se sníží proudu detektorem z 90% původní hodnoty na 10%. $1/\Delta t$ poté udává opakovací frekvenci detektoru.
- Vysoká hodnota τ_n zvyšuje tedy zisk, ale prodlužuje dobu odezvy. Vliv na Δt má i odpor a kapacita oblasti, kde dochází k vysčítávání proudu (RC složka odezvy).



- **Šum detektoru:** Mimo rozsah této přednášky

Fotoodpor (fotorezistor)

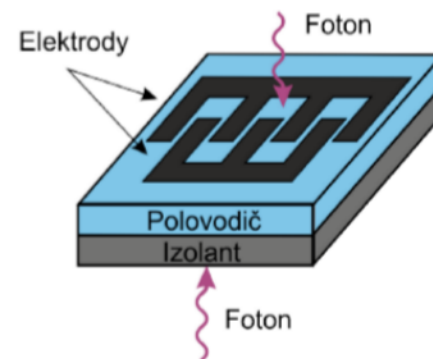
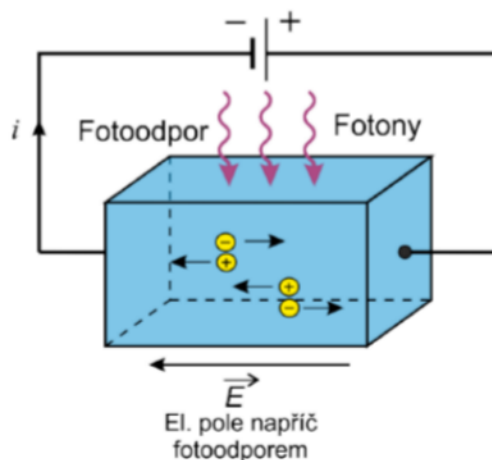
- Nejjednodušší typ fotodetektoru. Polovodič (intrinsický/dotovaný) + přívodní kontakty.
- Princip fungování: Generace elektron-děrového páru dopadajícím zářením. Sledujeme:
 - a) Změnu fotovodivosti
 - b) Změnu napětí na zatěžovacím odporu
- Hřebenovitá struktura kontaktů pro snížení t_R .

➤ Používané materiály:

- a) VIS: CdSe, CdS
- b) Blízké IČ: PbS
- c) IČ: CdTe, CdHgTe

➤ Výhody/nevýhody:

- Vysoká citlivost, nízká cena, snadné použití, dobrý zisk
- Dlouhá doba odezvy (ms až desítky μ s), relativně rychlá degradace



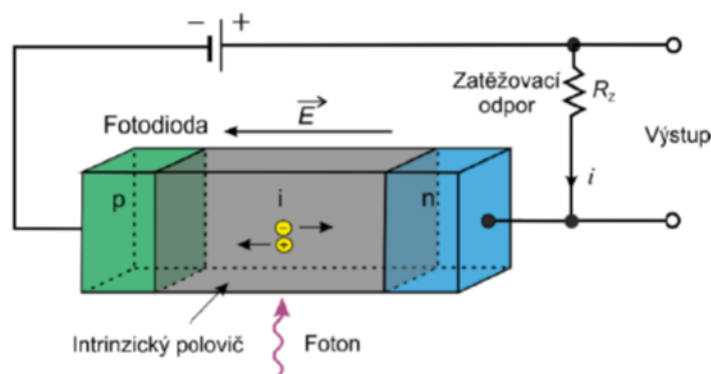
Fotodiody (konstrukce $p-n$)

- Upravený $p-n$ přechod tak, aby na něj dopadalo světlo.
 - Princip fungování: Generace elektron-děrového v celém objemu, ale jen v ochuzené vrstvě dochází k transportu nosičů (el. pole, elektrony k n oblasti).
 - Tři módy použití: a) Naprázdno. Žádný zdroj el. napětí. Vznik napětí na diodě.
b) Nakrátko. Žádný zdroj el. napětí. Měření fotoproudu.
c) Závěrný směr (fotovodivostní). Zdroj el. napětí v závěrném směru.
- Přítomnost el. pole snižuje t_R a rozšiřuje ochuzenou vrstvu a tím citlivou vrstvu detektoru.
- Používané materiály: Si, Ge, InGaAs.
 - Výhody/nevýhody:
 - Nízká doba odezvy (μs až ns)
 - Zisk vždy nižší jak 1.

Speciální typy fotodiod

- *p-i-n* fotodiody: Vložením intrinsické části vede k rozšíření funkční části fotodiody.

Výrazné snížení doby odezvy diody ($\sim$ desítky ps, $\sim$ 50 GHz).



- Fotodiody s heterostrukturou: Výrazné snížení absorpce fotonů mimo ochuzenou vrstvu.
 - Často využívající kontakt polovodič/kov (Schottkyho přechod).
 - Omezení snížení citlivosti fotodiody absorpcí vysokoenergetických fotonů na hranách
 - Pracuje s majoritními nosiči ($\sim$ 100 GHz)
 - Si nebo GaAs (*n*-typ) + Au nebo Al vrstva.

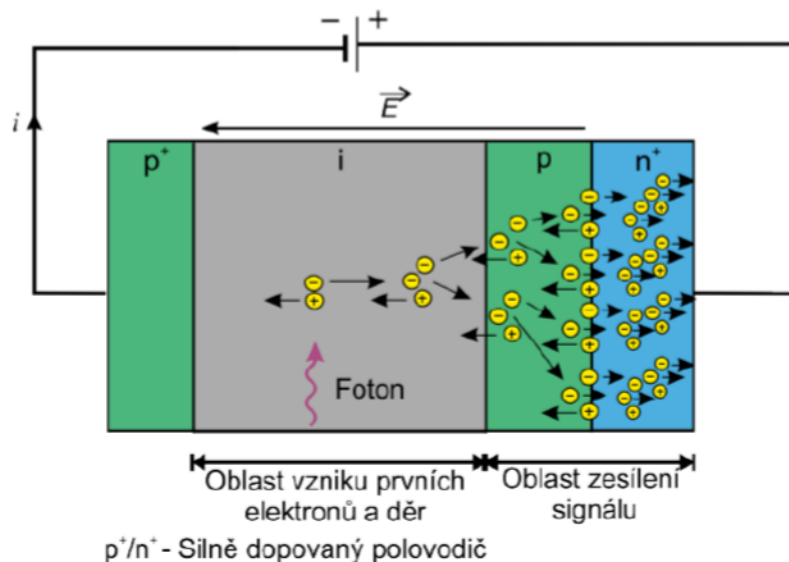
Speciální typy fotodiod

- Lavinové fotodiody (angl. APD): Diody jsou připojeny k vysokému závěrnému napětí.

Nosiče nárazově ionizují další ➡ $z > 1$ (až 1000)

- Výhody/nevýhody:

- Vysoká citlivost
- Dlouhá doba odezvy, konstrukční náročnost, vysoký šum,
- Nestabilita lavinovitého procesu řešena oddělením oblasti osvitů a zesílení

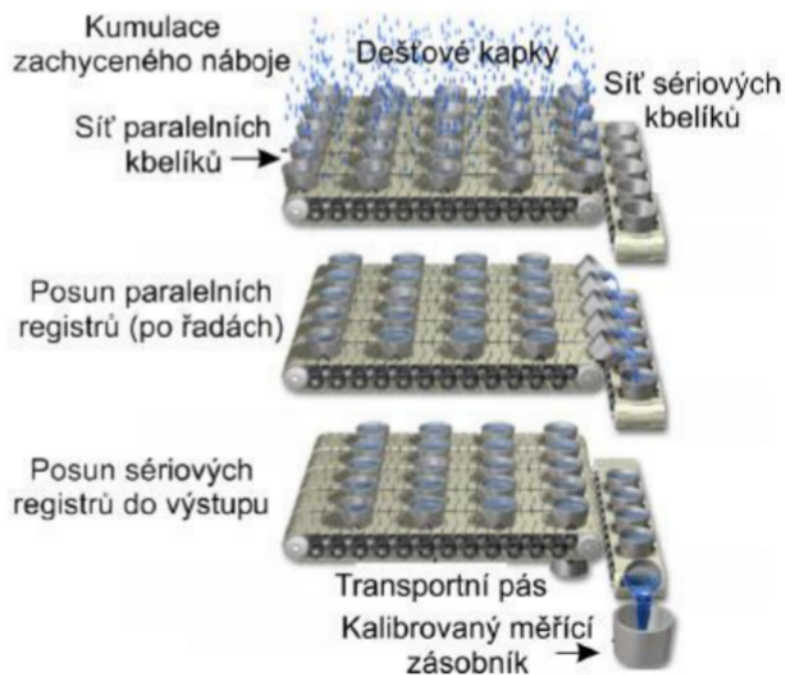
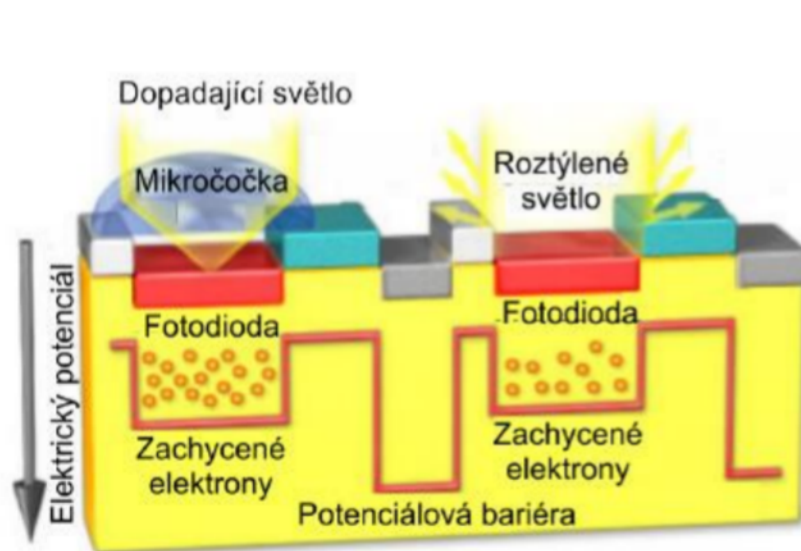


Matice fotodetektorů (CMOS a CCD)

- Součástky pro prostorově rozlišené měření záření

➤ CCD: Sít fotodiód se Schottkyho kontaktem nebo MIS struktur

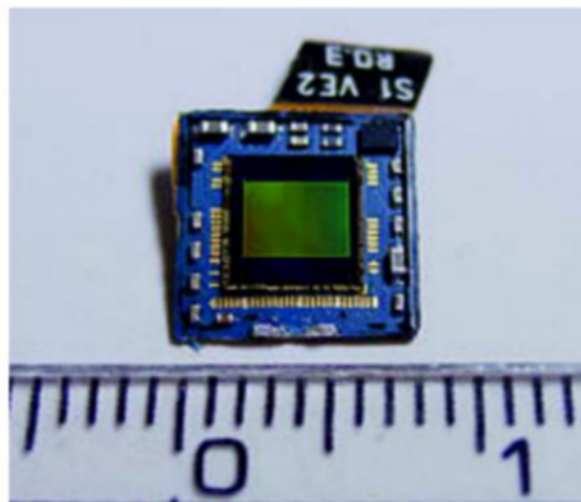
- $\eta = 35\text{-}60\%$, 290 – 900 nm.





Matice fotodetektorů (CMOS a CCD)

- Součástky pro prostorově rozlišené měření záření
- CMOS: Síť FET (field effect transistors)
 - Umožňuje analyzovat dopadající signál již v pixelu.
 - Nižší energetická náročnost, ale vyšší šum.



5M pixel CMOS chip s
Samsung Galaxy třídy S.

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.



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

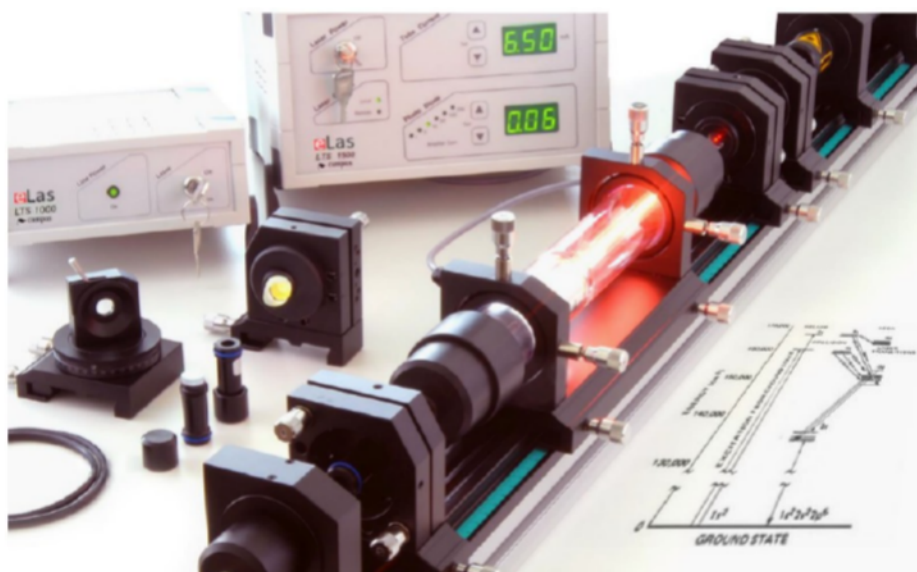


Návod pro laboratorní úlohu – LASERY

(Předmět - Fyzika III)

Abstrakt:

Laboratorní cvičení svou tematikou navazuje na sekci FOTONIKA/LASERY, která je součástí výběrové přednášky Fyzika III. V rámci tohoto cvičení studenti pomocí rozšířené laserové stavebnice e-LAS (CA-1201) sestaví vlastní laserový systém založený na fotočerpáném He-Ne kontinuálním laseru, provedou charakterizaci závislosti výstupního výkonu na velikostech parametrů zisku, ztrát a na kvalitě rezonátorové dutiny. Provedou také spektrální charakterizaci emitovaného záření.



Obrázek 1. Demonstrační fotografie laserové stavebnice CA-1200.

Pracovní úkoly:

1. Seznamte se s konstrukcí laserové stavebnice CA-1201 (manuál a příložené materiály).
2. Pomocí jedné sady rezonátorových zrcadel sestavte rezonátorovou dutinu laseru a optimalizujte nastavení zrcadel pomocí diodového laseru.
3. Pomocí kompaktního digitálního spektrometru proveďte spektrální charakterizaci výstupního záření laseru. Sledujte vznik různých TEM módů laseru při neideálním nastavení rezonátoru.



Dílo podléhá licenci Creative Commons 4.0 Česko
Uveďte původ - Zachovejte licenci

4. Proveďte charakterizaci optické stability laserového rezonátoru, tzn. proměřte závislost výkonu výstupního záření laseru na délce rezonátoru. Danou charakterizaci proveďte alespoň pro dvě různé kombinace rezonátorových zrcadel a výsledek porovnejte se vztahem pro stabilitu rezonátorové dutiny.
5. Zjistěte ideální pozici aktivního prostředí v rezonátorové dutině, tzn. proměřte závislost výkonu výstupního záření laseru na poloze aktivního prostředí uvnitř optického rezonátoru.
6. Zakomponováním dvojlomného krystalu oddělte nejdůležitější emisní píky laseru a určete závislost výstupního výkonu laseru pro vlnové délky hlavních píků na výkonu čerpání.

Postup realizace laboratorní úlohy:

Laserová stavebnice CA – 1201 se složená z komponent, ze kterých lze sestavit plně funkční He-Ne laser s vysokou hodnotou kvality rezonátorové dutiny, výkonem do 5 mW, vysokou koherenční vzdáleností, nízkou hodnotou rozbíhavosti svazků a možností ladit jednotlivé transversální mody laseru (Schéma systému viz obr. 2).

V prvním kroku sestavte rezonátorovou dutinu s aktivním prostředím bez přítomnosti dvojlomného krystalu. S vypnutým čerpáním následně pomocí zeleného diodového laseru nastavte ideální pozici rezonátorových zrcadel (vhodným nastavením posuvů zrcadel maximalizujeme výkon laseru detekovaný fotodiodou za rezonátorem)). Po zapnutí čerpání jemně doladte nastavení rezonátoru tak, aby se maximalizoval výstupní výkon laseru.

V dalším kroku odvedte pomocí dodatečného zrcadla výstupní záření mimo fotodiodu a přiveďte jej na vlákno kompaktního digitálního spektrometru a proměřte výstupní spektrum laseru (USB-650, Ocean Optics, spektrální rozsah 350-1000, lineární CCD senzor, spektrální rozlišení 2,0 nm). Následně ztotožněte hlavní emisní píky s přechody mezi hladinami Ne. Intenzitu čerpání laseru nastavte tak, aby nedošlo k poškození spektrometru. Sledujte vznik vyšších transversálních modů laseru při neideální poloze zrcadel (obrázek 3).

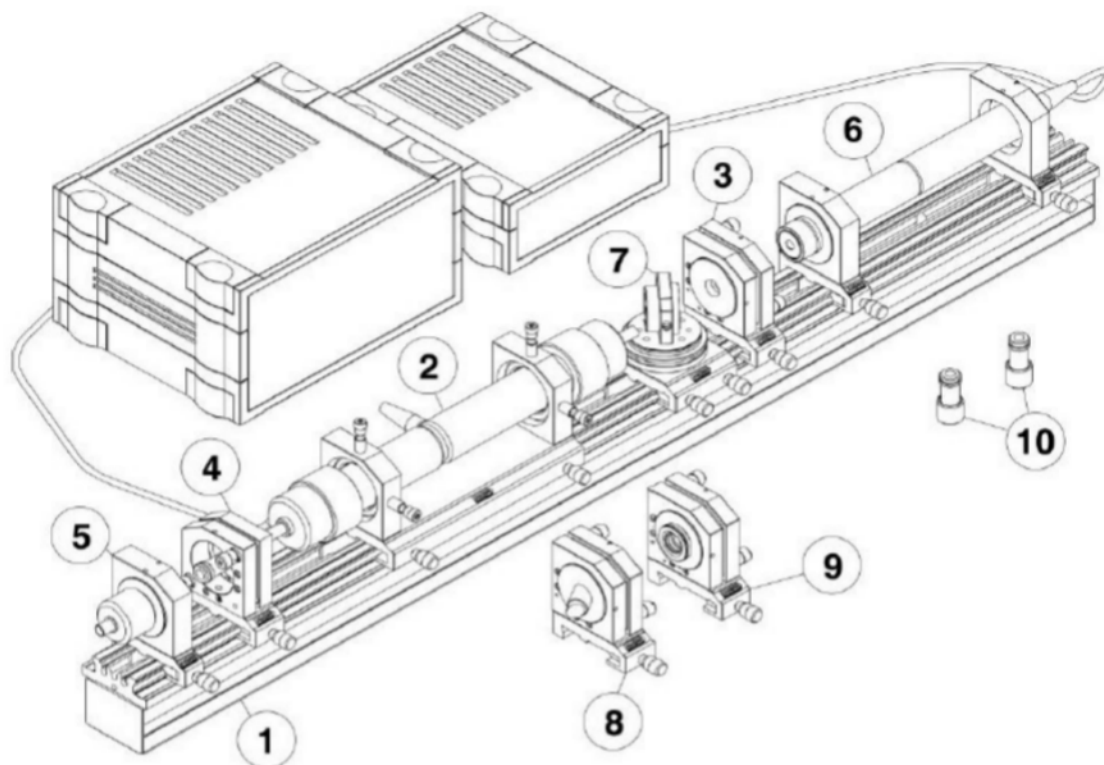
Aby v rezonátoru nedocházelo ke vzniku dodatečných ztrát, musí rezonátor splňovat tzn. podmínku stability. Pro délku rezonátoru L a poloměry křivosti rezonátorových zrcadel r_1 a r_2 musí platit, že:

$$0 \leq \left(1 + \frac{L}{r_1}\right) \left(1 + \frac{L}{r_2}\right) \leq 1 \quad (1)$$

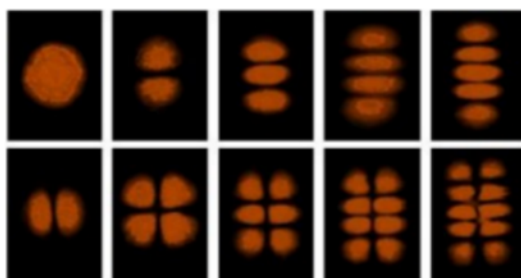
Změnou délky L sledujte změnu výstupního výkonu laseru (růst/pokles ztrát) pro alespoň dvě možné kombinace zrcadel. Zrcadla, jejichž parametry při ideálním nastavení leží více ve stabilní oblasti, budou vykazovat nižší pokles výstupního výkonu při změně parametru L .

V rámci dalšího kroku ověřte, že ideální pro fungování použitého laseru je, když se aktivní prostředí nachází přesně uprostřed rezonátorové dutiny. Fotony následně před každým zesílením urazí srovnatelnou vzdálenost. Z toho důvodu definovaně posouvejte aktivní prostředí po optické lavici a měřte velikost intenzity výstupního záření na poloze aktivního prostředí.

V posledním kroku umístíte do rezonátorové dutiny dodatečný dvojlomný krystal, aby se prostorově oddělili jednotlivé hlavní emisní píky laseru. Laděním krystalu lze cíleně vybírat z emisního spektra jen určité píky (zvyšování ztrát ostatních píků). Proměřte závislost výkonu jednotlivých emisních píků (alespoň pro 3 píky) na intenzitě čerpání.



Obrázek 2. Schéma laserového systému CA-1201 (e-LAS). (1) Optická lavice, (2) Aktivní prostředí + zesilovací fotodiody, (3), (4) Rezonátorová zrcadla na kinematických posuvech, (5) Fotodioda pro měření výstupního výkonu z laseru, (6) Zelený diodový laser pro ladění laserové dutiny, (7) Dvojlomný krystal, (8,9) Komponenty nejsou součástí dané verze stavebnice, (10) Náhradní rezonátorová zrcadla.



Obrázek 3. Příklad různých transverzálních módů laserového svazku. Horní řada módů odpovídá nastavení TEM_{00} až $TEM_{0,4}$. Spodní řada odpovídá módům $TEM_{1,0}$ až $TEM_{1,4}$.

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.