

Fotovodivost

- Destička polovodiče s E_g a indexem lomu n_1 .
- Dopadající záření o intenzitě I_0 a $h\nu \geq E_g$.
- Do polovodiče pronikne záření o intenzitě:

$$F = I_0(1 - R) = I_0 \frac{4|n_1 n_0|}{|n_1 + n_0|^2}$$

- Vznikne g párů díra-elektron.
- Přírůstek koncentrace a vodivosti:

$$\Delta n = g\tau_n, \quad \text{resp.} \quad \Delta p = g\tau_p \quad \Delta\sigma = e(\Delta n \mu_n + \Delta p \mu_p) = eg(\tau_n \mu_n + \tau_p \mu_p).$$

- Klíčový je součin doby života nosiče náboje a jeho pohyblivosti.

Fotovodivost

- Fotoelektrický zisk G – doba života nosiče ku době potřebné k jeho průchodu mezi kontakty vzdálenými L . Charakterizuje využití generovaných nosičů pro vlastní proud, když je na něm napětí U .

$$G = \tau \mu \frac{U}{L^2}$$

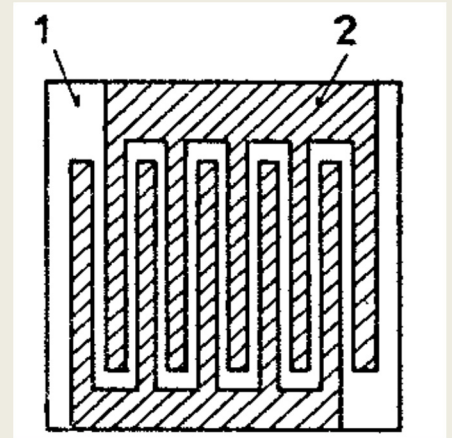
- Využívá se tohoto jevu pro elektronické součástky – fotoodpor. Ovlivňujeme dobu života a tím citlivost na osvětlení.
- Doba života vnáší velkou setrvačnost fotoodporu -> po skončení záření ještě teče proud dokud nosiče náboje nezaniknou rekombinací

Fotoodpor

- Je to elektronická součástka využívající vlastní fotovodivost k měření intenzity dopadajícího záření.
- Výroba:
 - Monokrystalický polovodič
 - Sintrování z monokrystalických prášků
 - Depozicí tenkých vrstev
- Zajímá nás: citlivost a odezva na záření, spektrální závislost.
- Materiály: CdS, CdSe, $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$. Případně jejich mícháním (směsné krystaly) optimalizují spektrální charakteristiky, díky změně šířky zakázaného pásu.
- Jsou vhodné pro viditelné záření, ale mají velkou setrvačnost.
- Materiály: PbS, PbTe, PbSe. Mají úzký zakázaný pás (0,2 eV až 0,4 eV). Vhodné na detekci IČ záření. Mají nízkou setrvačnost.
- Pro detekci extrémně dlouhovlnného záření (až do 7 μm) se používá InSb (0,17 eV). Doba odezvy v řádu 10^7 . Vysoká citlivost dána vysokou pohyblivostí nosičů náboje.

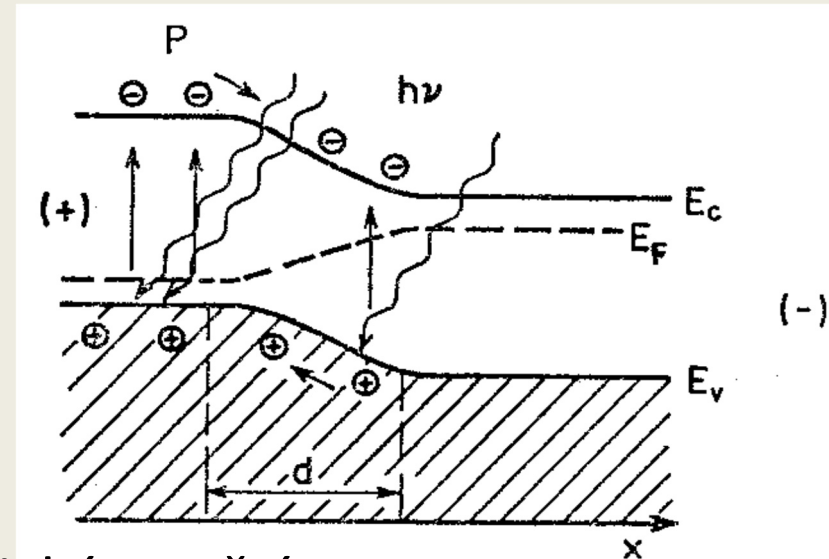
Fotoodpor

- Polovodiče s úzkým zakázaným pásem jsou citlivé na příměsi a poruchy -> výroba z monokrystalů. Časem degenerují. Musí pracovat za nízkých teplot.
- Široký zakázaný pás umožňuje levnější tenkovrstvou výrobu. Polovodič může být i polykrystal.
- Při návrhu fotoodporu se používá hřebenové uspořádání kontaktů.



PN přechod

- Na rozdíl od fotoodporu dopadá záření na rozhraní P-N polovodiče.
- Po dopadu fotonů vzniklé elektrony a díry difundují do oblasti N a P.
- Vznikne fotoelektrické napětí na rozhraní P-N.
- Zapojíme-li k P-N přechodu závěrné napětí, poteče proud úměrný ozáření -> odporová fotodioda -> zapojení nakrátko.
- Zapojení naprázdno -> fotoelektrické napětí.
- Záření musí dopadat kolmo na P-N přechod.



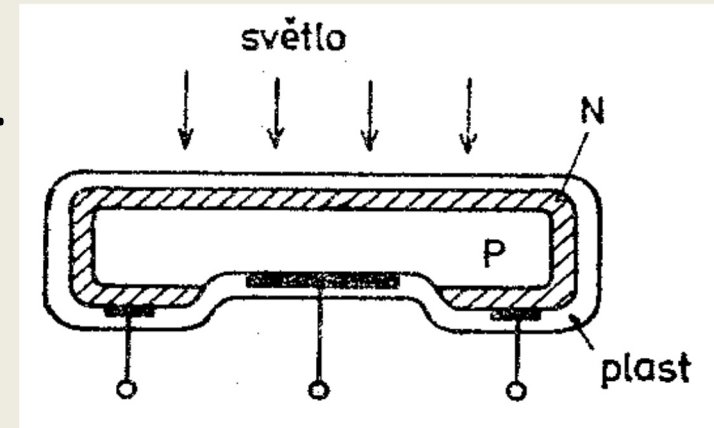
Fotočlánek – solární článek

- P-N přechod vystavený záření slouží jako zdroj elektrického proudu.
- Spektrální citlivost P-N přechodu by měla co nejvíce odpovídat slunečnímu záření.
- Ideální velikost zakázaného pásu je 1,5 eV až 2,5 eV.

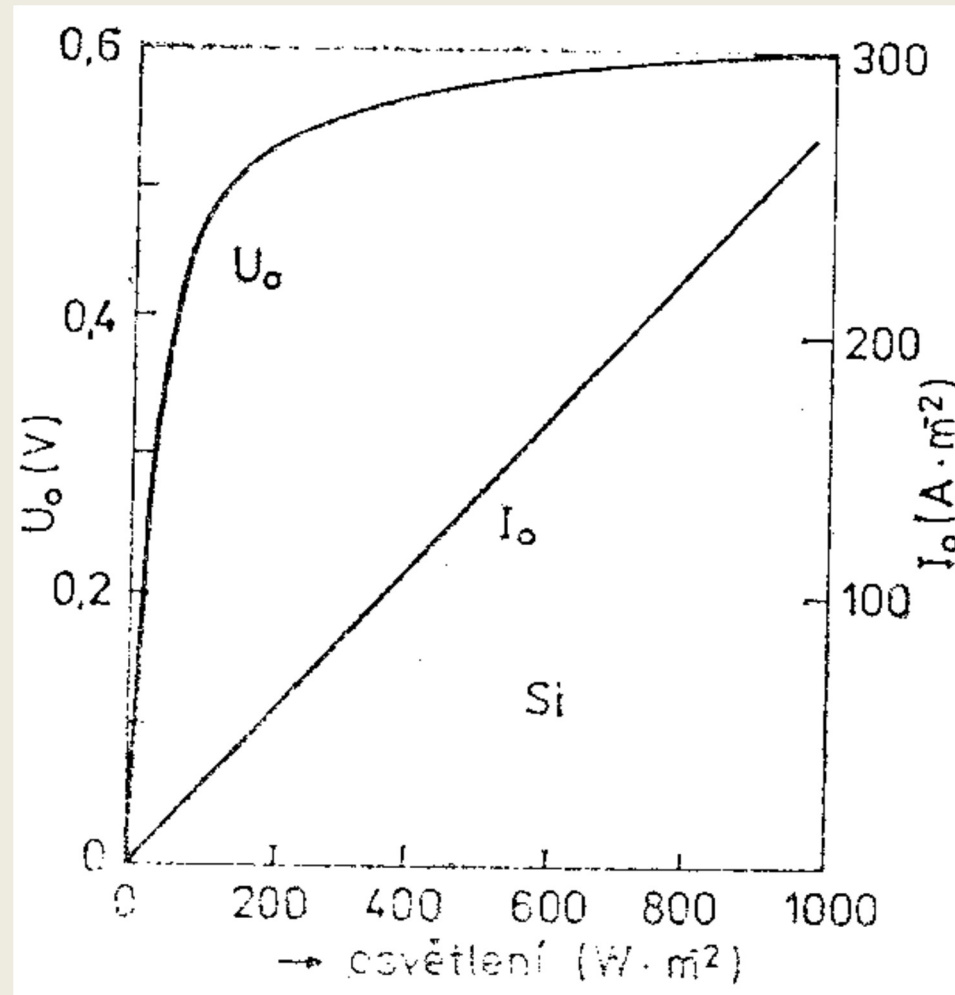
Polovodič	E_g	$U_{0\max}$	Účinnost	
			teoretická (%)	dosažená (%)
Si	1,12	0,6	19	15
InP	1,29	0,7	22	2
GaAs	1,45	0,9	23,5	6,5
CdTe	1,43	0,6	23	2,1
CdS	2,42	0,5	17	4

Fotočlánek – solární článek

- Řez křemíkovým solárním článkem.
- Základem je destička Si na jejímž povrchu je difúzí vytvořena vrstva typu N.
- Nutnost vyrobit ohmické kontakty a zalít do plastu/skla -> musí se snížit koeficient odrazu -> co nejvíc záření dopadne na P-N přechod.
- Napětí naprázdno roste s osvětlením a dosáhne saturované hodnoty 0,6 V -> fotočlánek se pak chová jako P-N přechod v propustném směru -> P-N bariéra odstraněna.



Fotočlánek – solární článek

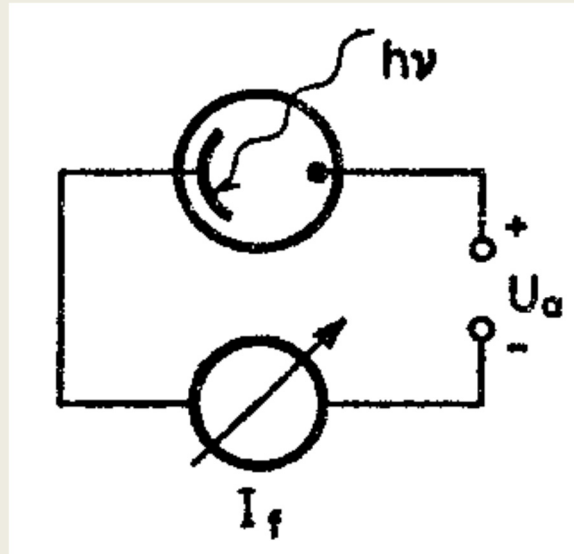


Vnější fotoefekt

- Je to jev, kdy je emitován elektron z látky po dopadu záření - fotoemise.
- Energie fotonu je tak velká, že excitovaný elektron unikne do vakua.
- Pozoruje se to jak pro viditelné, tak UV a IČ záření -> elektron absorbuje celé kvantum záření.
- Speciální efekty nastávají, když jde o RTG nebo γ záření -> elektron nemusí celé kvantum záření absorbovat.
- Dochází ke Comptonově jevu (rozptylu), kdy srážka elektronu a fotonu vyvolá změnu směru pohybu obou částic a úbytek energie fotonu na úkor přírůstku energie elektronu.

Vnější fotoefekt

- Schéma zapojení měřícího obvodu pro měření fotoemise.
- Pro vložené napětí U_a měřím proud I_f .



Vnější fotoefekt

- Co pozorují:
 - Pro dané spektrální složení záření je fotoelektrický proud I_f úměrný intenzitě záření.
 - Pokud je záření monochromatické, tak se fotoelektrický proud mění s vlnovou délkou.
- Fotoemise nasává až od určité prahové hodnoty vlnové délky záření -> dlouhovělnná mez λ_0 .
- Maximální kin. energie elektronu je lin. Funkcí frekvence záření. Parametry a a b závisí na materiálu terče.

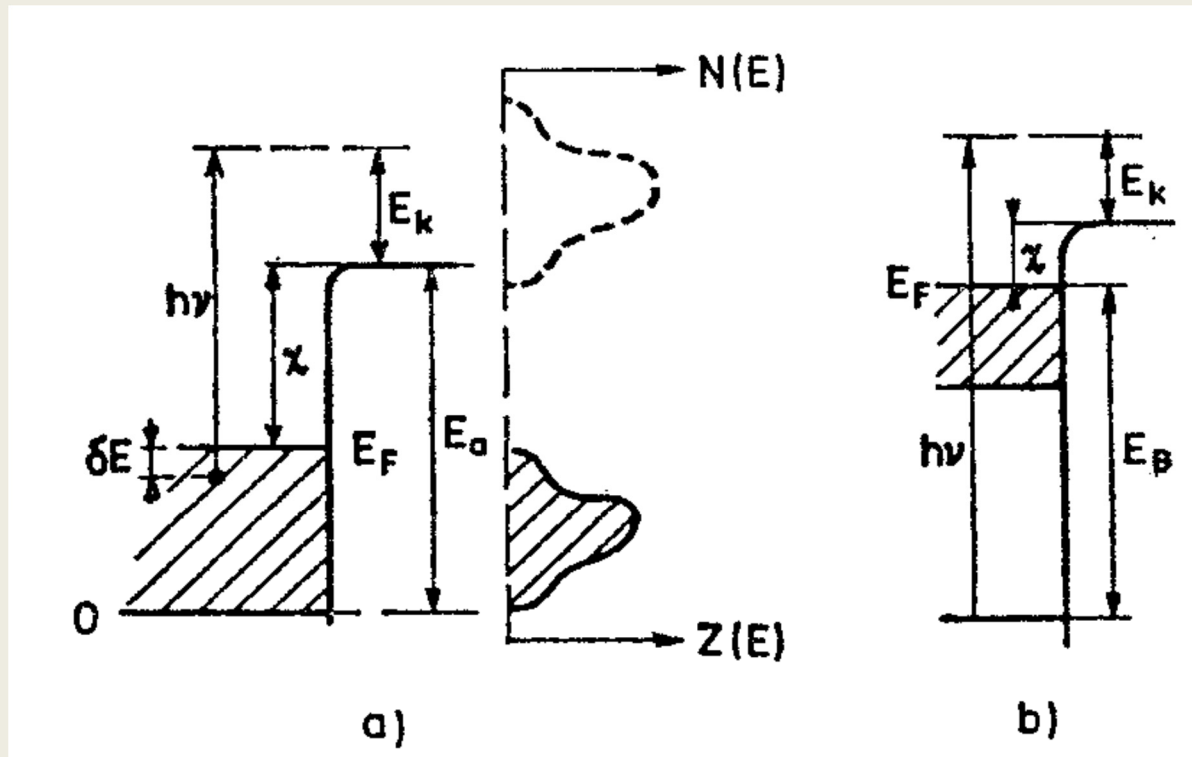
$$E_{k \max} = a\nu + b$$

- Vysvětlení fotoelektrické emise podal Einstein v roce 1905 -> korpuskulární teorie záření.

Fotoemise kovů

- Kin. energie elektronu ve vakuu je:

$$E_k = h\nu - \chi \pm \delta E - \Delta E$$



Fotoemise kovů

- Pokud elektron odchází s Fermiho hladiny ($\delta E = 0$) a zároveň ztráty přechodem do vakua jsou nulové $\Delta E = 0$, pak maximální kinetická energie elektronu je:

$$E_{k \max} = h\nu - \chi = h(\nu - \nu_0)$$

- Zde ν_0 (resp. λ_0) je dlouhovlnná mez $\rightarrow$ z její znalosti lze určit fotoemisní výstupní práci: $\chi(\text{eV}) = 1236/\lambda_0 \text{ (nm)}$
- Pro kovy je χ v rozmezí 4 až 5 eV $\rightarrow$ minimálně potřebují UV záření.
- Platí to pro $T = 0 \text{ K}$ $\rightarrow$ jinak jsou elektrony i nad Fermiho mezí a dlouhovlnná mez je neurčitě daná (rozmazaná).

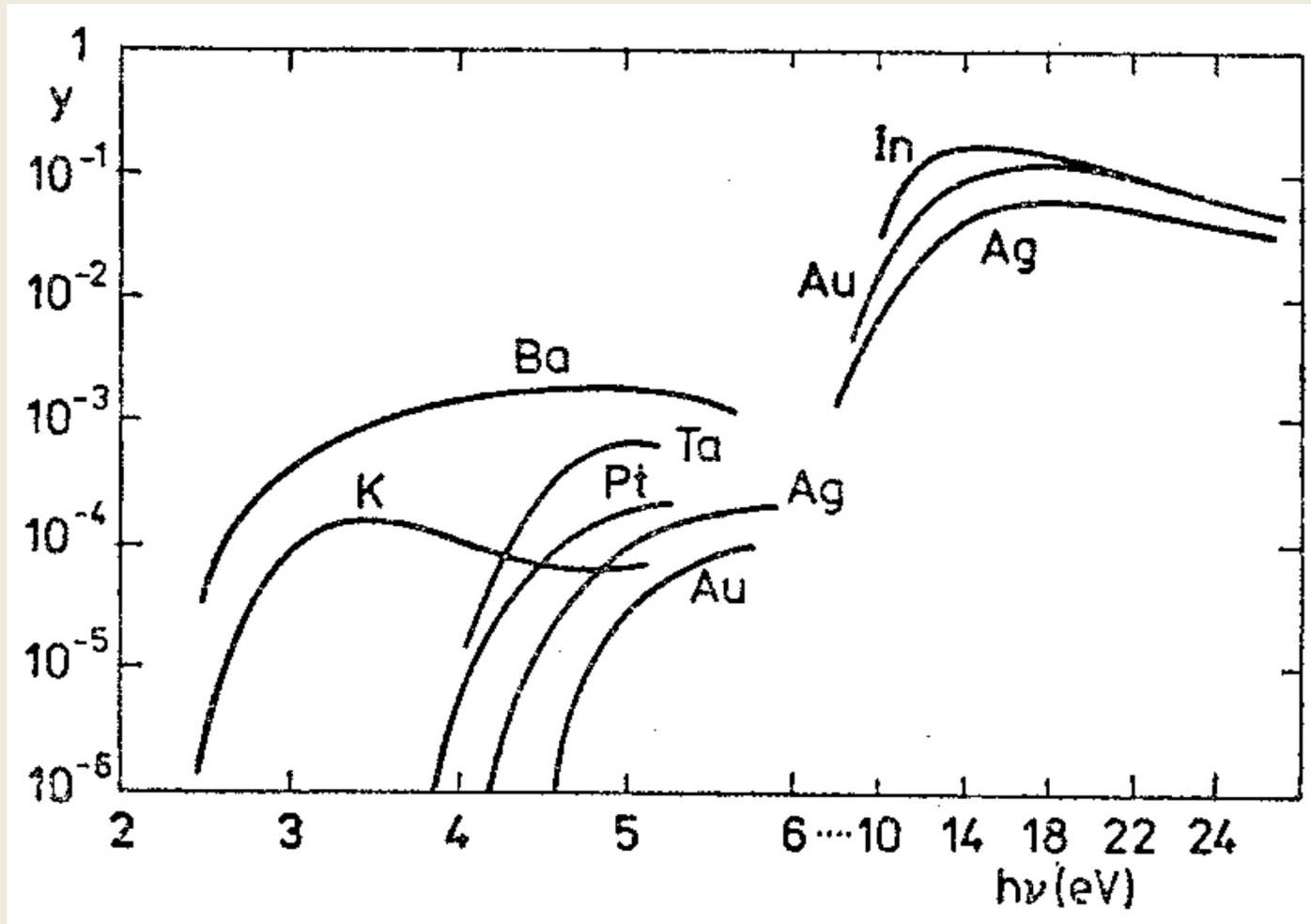
Fotoemise kovů

- Pokud je energie kvanta velmi vysoká (RTG), pak dochází k excitaci elektronů v vnitřních hladin atomů s vazbovou energií E_B .
- Pak kin. Energie elektronu je:

$$E_k = h\nu - \chi - E_B - \Delta E$$

- Kvantový výtěžek (počet elektronů na energii kvanta) fotoemise ve skutečnosti také závisí na optických vlastnostech materiálu.
- Vliv reflexe -> ne všechno záření se absorbuje a přispívá k fotoemisi.
- Nebo interference vlnění, pokud je na povrchu tenká vrstva materiálu s jiným indexem lomu.

Fotoemise kovů



Fotoemise kovů

- K přesnému popisu fotoemise je třeba popsat mechanismu interakce záření s elektrony látky.
- Musíme určit pravděpodobnost přechodu elektronu mezi počátečním a konečným K.-M. stavem elektronu při interakci s fotonem.
- Elektron je excitován kvantem záření -> pohybuje se pevnou látkou a interaguje
 - s elektrony,
 - s mřížkou - fonony,
 - s volnými elektrony kolektivně (plazmové interakce)
- Pak ztrácí energii -> je to odlišné pro různé PL.
- Ve finále musí překonat výstupní práci a vystoupit do vakua.

Fotoemise kovů

- Podobně jako u termoemise lze odvodit teoretické vztahy pro hustotou fotoemisního proudu.
- Pro případ, že $T = 0$ K a vlnová délka záření je větší jak dlouhovlnná mez je fotoemisní proud:

$$j_f = \frac{\alpha A_0 h^2}{2k^2} (\nu - \nu_0)^2$$

- Pro nenulovou teplotu lze odvodit:

$$j_f = \frac{\alpha A_0}{2} \left[\frac{h^2 (\nu - \nu_0)^2}{k^2} + \frac{\pi^2}{3} T^2 \right]$$

- Teplotní závislost se uplatní tehdy, když jsem blízko ν_0 .

Fotoemise kovů

- Pokud by záření mělo vlnovou délku větší jak dlouhovlnná mez $\lambda > \lambda_0$, pak se uplatní jen teplotní člen:

$$j_f = \alpha A_0 T^2 \exp \left[- \frac{h(\nu - \nu_0)}{kT} \right]$$

- V podstatě dostanu Richardson-Dushmanův vztah pro termoemisi z kovů, protože se mohou emitovat jen elektrony, jež jsou tepelně excitovány.
- Uvedená teorie fotoemise je jen přiblížením skutečných fotoemisních spektrálních charakteristik.
- Musím znát přesně hustotu obsazených a neobsazených stavů -> vzájemně se ovlivňují. Musím popsat energetické ztráty elektronů cestou k povrchu a do vakua.

Aplikace fotoemise

- A. Fotoelektrický proud se používá k měření a zpracování světelných signálů.
- B. Energetické spektrum emitovaných fotoelektronů umožňuje charakterizovat povrch pevné látky.
 - Ad A. K měření světla slouží **fotokatody**.
 - Požadujeme od nich:
 - Vysoký kvantový výtěžek pro požadované vlnové délky
 - Vhodná spektrální charakteristika
 - Malý proud ve tmě při pokojové teplotě
 - Pro UV oblast lze použít čisté kovy. Větší citlivost mají některé intermetalické sloučeniny (TeCs_2 , TeRb_2).
 - Pro viditelnou oblast se používají polovodiče s adsorbovanou vrstvou (Cs) snižující výstupní práci.

Aplikace fotoemise - fotokatoda

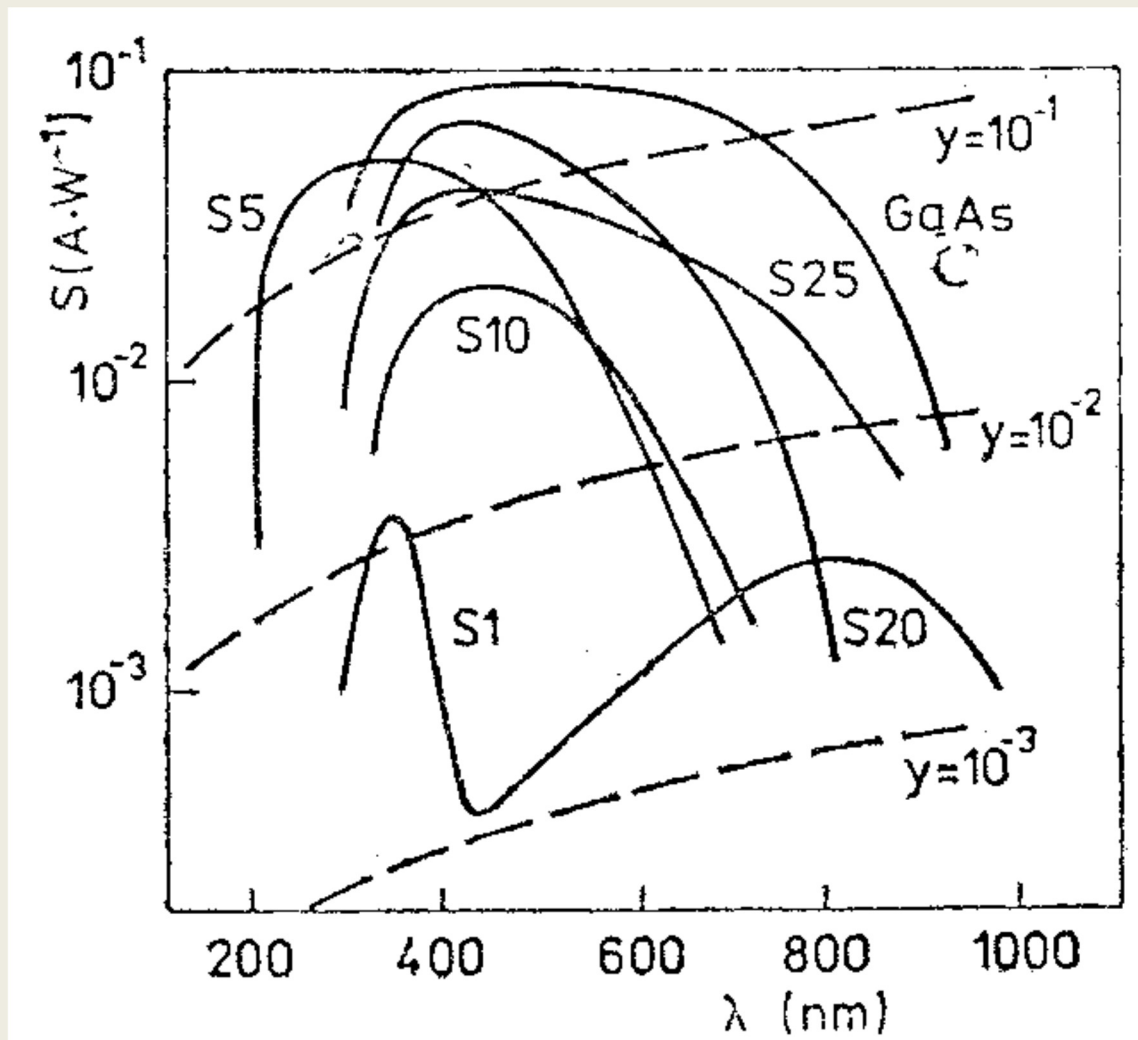
- Nejčastěji se používají fotokatody vyrobené z antimonu (Sb) - > napařují antimon v parách alkalických kovů (často i aktivují kyslíkem).
- Mohu různě kombinovat složení a ladit spektrální charakteristiku a přiblížit se citlivost lidského oka.
- Většinou jsou průhledné, mají vyšší citlivost v červené oblasti spektra a je to polovodič typu P (ohnutí pásů snižující výstupní práci).
- Použití ve fotonkách, fotonásobičích, zesilovačích obrazu, snímacích elektronkách

Aplikace fotoemise - fotokatoda

Označení	Složení	Max. kvant. výtěžek (el/kvantum)	λ_0 (nm)	Integrální citlivost ($\mu\text{A/Lm}$)	E_g (eV)	E_a (eV)	Proud I ($\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$, 25°C)
S_1	$\text{Cs}_2\text{O}(\text{Ag, Cs})$	0,05	1200	25	—	—	$10^{-11} - 10^{-13}$
S_5	$\text{SbCs}_3(\text{Cs})$	0,15	580	40	1,6	0,45	10^{-14}
S_{10}	$\text{BiCs}_3(\text{Ag, O})$ (průhl.)	0,08	750	40—90	0,7	0,9	$10^{-13} - 10^{-14}$
S_{20}	$\text{SbNa}_2\text{K}(\text{Cs})$	0,3	870	150—300	1,0	0,55	$10^{-15} - 10^{-16}$
S_{25}	$\text{SbNa}_2\text{K}(\text{Cs})$ (průhl.)	0,25	950	200	1,0	0,55	$10^{-13} - 10^{-14}$
	$\text{GaAs}(\text{Cs, O})$	$\sim 0,5$	950	2000	1,35	—	*)
	$\text{JnAsP}(\text{Cs, O})$	0,12—0,2	1150	1100	1,17	—	*)

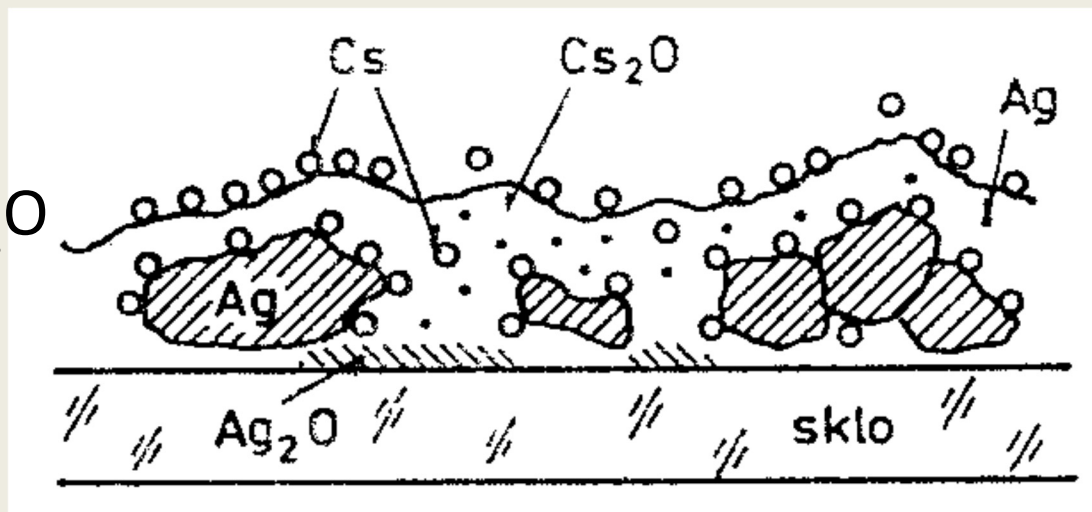
*) Mění se v širokých mezích podle technologie (viz [8])

Aplikace fotoemise - fotokatoda



Aplikace fotoemise - fotokatoda

- Pro IČ oblast je problematické vyrobit fotokatodu.
- Aplikace nočního vidění.
- Klasickým materiálem pro dlouhovlnnou oblast je fotokatoda na bázi stříbra a cesia. Dlouhovlnná mez 1100 nm.
- Zoxidovaná vrstva Ag na skle reaguje s parami Cs. Vznikne Cs_2O a nanočástice stříbra aktivované Cesiem.



Fotoelektronová spektroskopie

- Základem metody je měření energetického spektra emitovaných fotoelektronů.
- Poskytuje mi to informace o:
 - hustotě obsazených stavů, z nichž jsou elektrony emitovány
 - pravděpodobnosti přechodů
 - hustotě konečných stavů
 - interakcích elektronů před výstupem do vakua
- K ozáření se používá:
 - UV záření -> metoda UPS (Ultraviolet Photoelektron Spectroscopy)
 - RTG záření -> XPS (X-ray Photoelectron Spectroscopy)
 - ESCA (Electron Spectroscopy for Chemical Analysis) -> komerční název pro XPS, kdy mě zajímá hlavně složení zkoumané látky.