

Úvod do laserové techniky

Detekce optického záření

Jan Šulc

Katedra fyzikální elektroniky
České vysoké učení technické v Praze
jan.sulc@fjfi.cvut.cz

18. září 2018

Světlo = elektromagnetická vlna vs proud **fotonů**

- ▶ Amplituda elektromagnetické vlny \vec{E} vs energie fotonu $E = h\nu$
- ▶ Superpozice vln, interference, koherence, rezonátor

Látka jako soubor kvantových soustav

- ▶ Existence diskrétních energetických hladin
- ▶ Výměna energie po kvantech, kvantové přechody
- ▶ Populace hladin, inverze populace, buzení a relaxace kvantových soustav

Interakce optického záření s látkou

- ▶ Základní procesy interakce kvantových soustav s elektromagnetickým zářením:
absorpce, spontánní emise, stimulovaná emise
- ▶ Rezonanční (nutná) podmínka (Bohrův vztah):

$$\nu_{nm} = \frac{E_n - E_m}{h}.$$

- ▶ Pravděpodobnost umožňují vypočítat Einsteinovy koeficienty B_{mn} , A_{nm} a B_{nm}

Detekce optického záření

- ▶ Detekce záření je zjišťování přítomnosti optického záření v daném místě a v daném čase
- ▶ Optické záření – elemag. vlna $\lambda \sim 10^{-6}$ m, $\nu \sim 10^{15}$ Hz – fotony $E = h\nu$
- ▶ Přímá detekce $\vec{E}(x, y, z, t)$ optického záření není možná (? nanotechnologie)
- ▶ Detekovat lze pouze intenzitu optického záření

$$I(t) = \frac{1}{2} c \epsilon \mathcal{E}(t)^2 \quad \text{Intenzita záření } I \text{ [W/m}^2\text{]}$$

- ▶ Minimální detekovatelná energie je energie jednoho fotonu $E \sim 10^{-19}$ J ~ 1 eV
- ▶ **Detekce záření je založena na absorpci fotonů kvantovými systémy a následné konverzi excitační energie na jinou, lépe zpracovatelnou formu.**
 - ▶ elektrický signál – fotobuňka
 - ▶ teplo – pyrodetektor
 - ▶ změna chemického složení detektoru – fotografický materiál
 - ▶ nervový vzruch – oko
 - ▶ foton jiné vlnové délky – noktovizor

Základní parametry optických detektorů

Konverzní účinnost – charakterizuje účinnost procesu konverze energie během procesu detekce. **Kvantová účinnost detektoru** – souvisí s pravděpodobností absorpce fotonu a následnou emisí – v případě fotoelektrického jevu = počet uvolněných elektronů ku počtu dopadajících fotonů

Časová odezva – rychlost, s jakou probíhá přeměna energie v detektoru; rychlost, s jakou detektor zpracovává optický signál, respektive reaguje na jeho změnu. Charakteristická doba odezvy (Δt).

Minimální detekovatelný výkon a detektivita – Detektivita D udává vztah mezi minimálním detekovatelným výkonem P_{\min} a šířkou pásma detektoru $\Delta f \simeq 1/\Delta t$:

$$D = \frac{\sqrt{\Delta f}}{P_{\min}}$$

Spektrální charakteristika – udává citlivost detektoru pro různé vlnové délky elmag. záření. Spektrálně selektivní \times neselektivní detektor

Šumové charakteristiky – všechny detektory vykazují určitý šum (např. „tepelný“ šum) – parazitní náhodnou odezvu která nesouvisí s detekovaným signálem a způsobuje chyby při detekci. Důležitý je poměr signál – šum a parametr NEP (*noise equivalent power*).

Linearita odezvy – velikost signálu je přímo úměrná intenzitě záření (počtu fotonů).

Ideální detektor

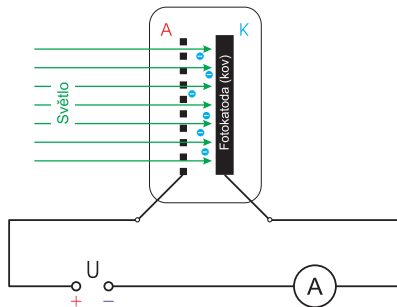
- ▶ Velmi citlivý – nízký P_{\min}
- ▶ Velká účinnost konverze – detekuje každý foton
- ▶ Okamžitá odezva na změnu optického signálu
- ▶ Spektrálně neselektivní
- ▶ Zanedbatelný šum
- ▶ Lineární

...NEEXISTUJE...

...ZATIM...

Fotoelektrický jev

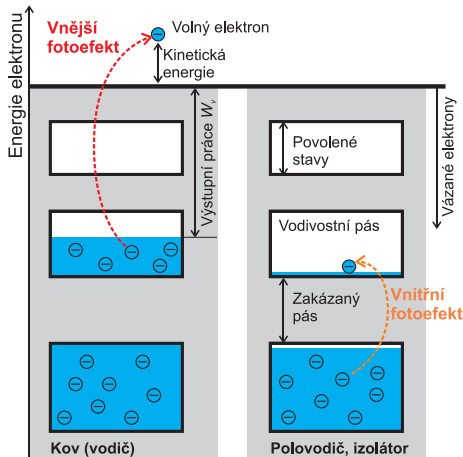
- ▶ Dopadem optického záření (obvykle UV) na kovovou fotokatodu (např. zinek) může dojít k uvolnění (fotoemisi) elektronů a k průchodu proudu obvodem. Experimentálně bylo zjištěno toto:



1. Pro každý kov existuje určitá **kritická (mezní) frekvence ν_c** , při které dochází k uvolňování elektronů. Pro menší frekvenci již k emisi elektronů nedochází bez ohledu na intenzitu záření.
2. Počet uvolněných elektronů (velikost „fotoproudu“) pro $\nu > \nu_c$ je úměrný intenzitě.
3. Energie uvolněných fotoelektronů je přímo úměrná frekvenci záření. Nezávisí na intenzitě elemag. pole.

- ▶ **Klasická fyzika** nedokáže fotoefekt vysvětlit.
 - ▶ Pro vytržení elektronu z kovu by měla být rozhodující amplituda elektrického pole, tedy intenzita záření.
 - ▶ Není důvod pro existenci mezní frekvence.
- ▶ Pozorován byl i tzv. vnitřní fotoefekt – nárůst vodivosti polovodičů (selen) po dopadu světla

Kvantová teorie fotoelektrického jevu (A. Einstein 1905)



- ▶ Elektron je v kovu vázaný. Pro jeho uvolnění je potřeba určitá minimální energie – výstupní práce W_v .
- ▶ Foton, který má vyvolat emisi elektronu musí mít minimálně energii W_v .
- ▶ Pokud je energie fotonu větší, případně přebytek energie na kinetickou energii volného elektronu. Platí zákon zachování energie:

$$h\nu = W_v + \frac{1}{2} m_e v^2$$

- ▶ Pokud je energie fotonu menší, k fotoemisi nemůže dojít \Rightarrow **mezní frekvence** $\nu_c = W_v/h$.

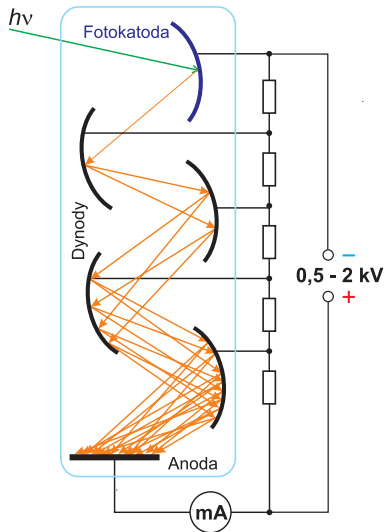
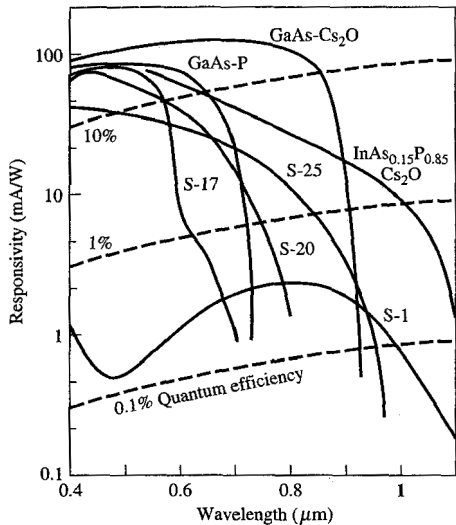
- ▶ **Mezní vlnová délka** – fotoefekt je obecně spektrálně selektivní

$$\lambda \leq \lambda_v = \frac{hc}{W_v}$$

- ▶ V případě vnitřního fotoelektrického jevu odpovídá výstupní práci šířka „zakázaného“ pásu

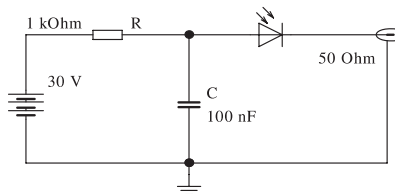
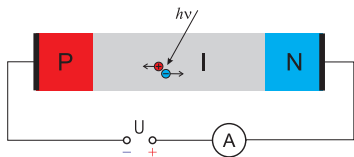
Detektory využívající vnější fotoelektrický efekt

- ▶ Klíčová je volba fotokatody – speciální materiály s co nejnižší výstupní prací (alkalické kovy)
- ▶ Vakuová fotodioda, fotonásobič



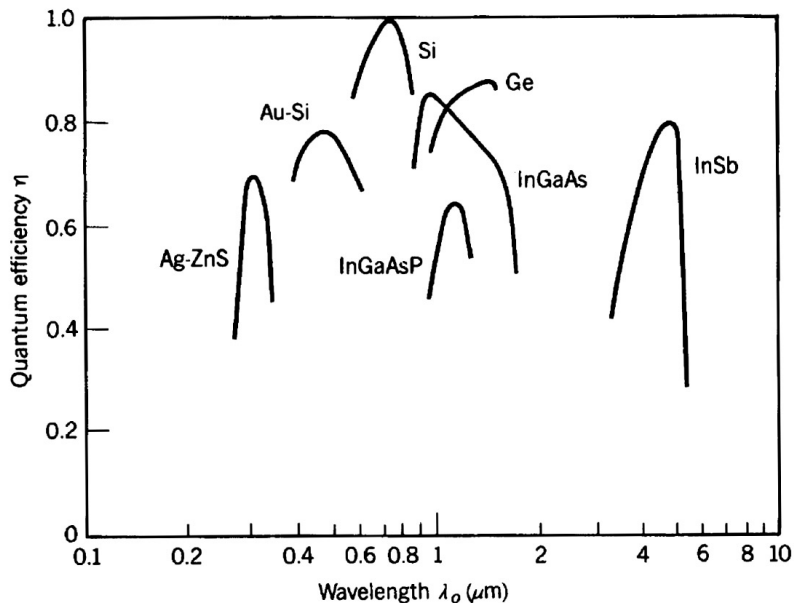
Detektory využívající vnitřní fotoelektrický efekt

- ▶ **Fotovodivostní detektor** generace páru elektron-díra v polovodiči (selen, Si, InAs, nízká teplota)
- ▶ **Fotorezistor** změna pohyblivosti nosičů náboje – polovodivé sloučeniny (PbS), nelineární odezva
- ▶ **Polovodičová fotodioda** – vnitřní fotoelektrický jev + řízení PN-přechodu – speciální struktura zvyšuje citlivost, rychlost (PIN-dioda Si), heterostruktury (slitiny GaInAsSb/GaAlAsSb, InAs/InAsSbP), lineární odezva



- ▶ **Lavinový detektor** speciální struktura fotodiody zvyšuje kvantový výtěžek sekundární lavinovou generací nosičů náboje (citlivá, rychlá, nelineární)
- ▶ **Matice detektorů – CCD, CMOS** 1D, 2D, záznam obrazu, mezní vlnová délka pro křemík je cca 1180 nm, pro $\lambda > \lambda_c$ je průhledný – neabsorbuje – „nevidí“.
- ▶ **Fotočláanky** přechod kov-polovodič – přímá konverze světla na elektrický proud

Kvantová účinnost polovodičů



Optické záření – fotony →

- absorpce systémem kvantových soustavou a jejich excitace →
 - postupná relaxace do základního stavu →
 - zářivé i **nezářivé přechody** →
 - fotony a fonony →
- luminiscence (světlo) a mechanický pohyb mikročástic (**teplo**)

Záření je absorbováno, energie elektromagnetického pole je částečně přeměněna na tepelnou energii (pohyb), což vede k ohřevu části detektoru – detekuje se změna teploty.

- ▶ Rychlost odezvy závisí na tepelné kapacitě detektoru
- ▶ Spektrální citlivost závisí na absorpčních schopnostech detektoru

Kalorimetr – absolutní měření tepla a energie

$$\Delta Q = Cm\Delta T$$

Termočlánek – měření rozdílu teplot díky vzniku termoelektického napětí na rozhraní dvou různých kovů

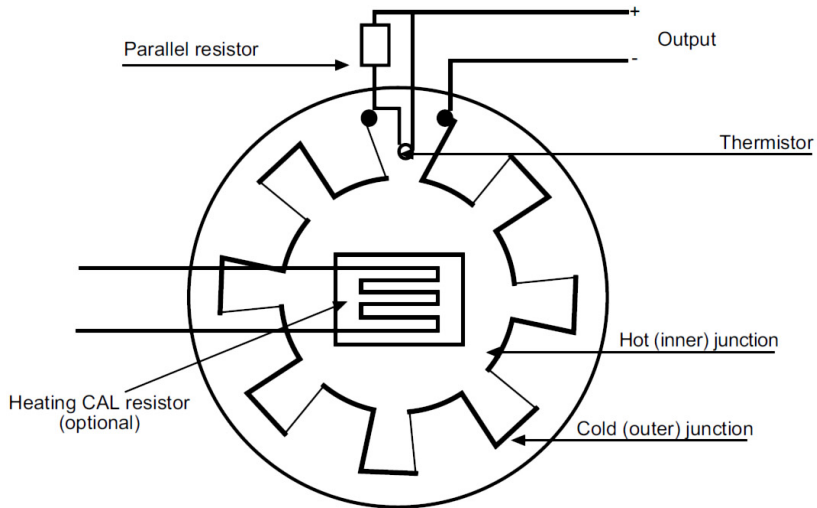
Bolometr – měří teploty na základě měření odporu vodiče (odpor s teplotou roste v důsledku kmitů mřížky)

Termistor – využívá silnou nelineární závislost odporu některých materiálů (polovodičů) na teplotě – odpor s teplotou klesá díky tepelné excitaci vodivostního pásu

Pyroelektrický detektor – založen na pyroelektrickém jevu – zahřátím nebo ochlazením krystalu se změní elektrická polarizace dipólů uvnitř krystalu a na stěnách krystalu se objevuje náboj.

- ▶ Lithium tanatalát
- ▶ Zirkon-titanová keramika
- ▶ Polyvinilfluorid

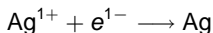
Termočlánkový tepelný detektor – zapojení



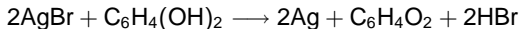
- ▶ Vnitřní fotoelektrický jev
- ▶ Nelineární proces (denzitometrie)
- ▶ Velká plocha a rozlišení, RTG

Černobílá negativní fotografická emulze

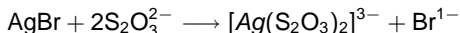
- ▶ AgBr absorbuje světlo pro $\lambda_c \leq 460$ nm
- ▶ Expozice – světlem se rozkládá halogenid stříbra, redukuje se atomární kovové stříbro (latentní, zárodečný obraz):

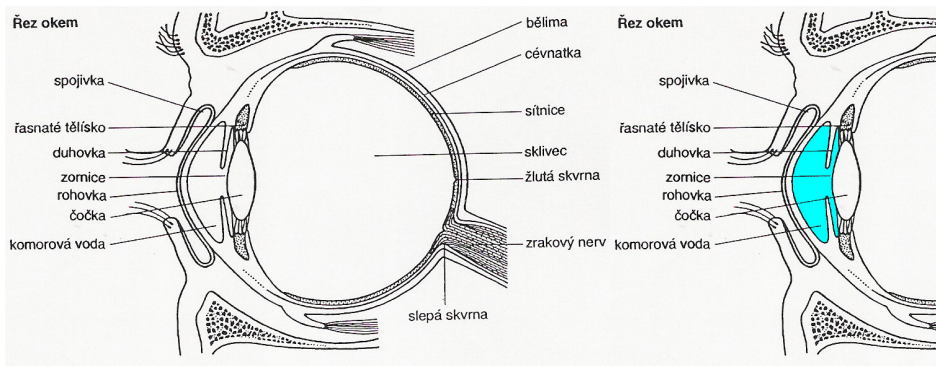


- ▶ Vyvolávání – redukce stříbra z AgBr v okolí zárodků

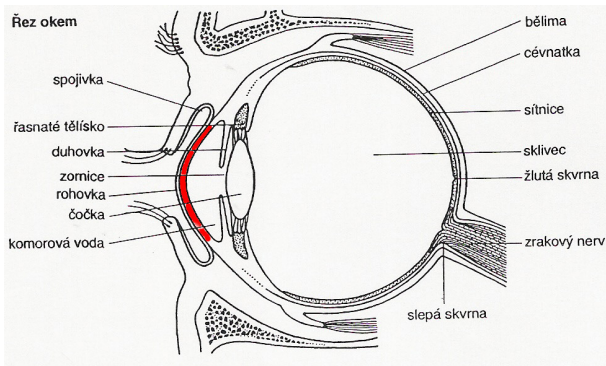


- ▶ Ustalování – thiosíran převádí zbylý nerozpustný halogenid na rozpustnou komplexní sloučeninu, která se pak odstraňuje vypíráním v čisté vodě:

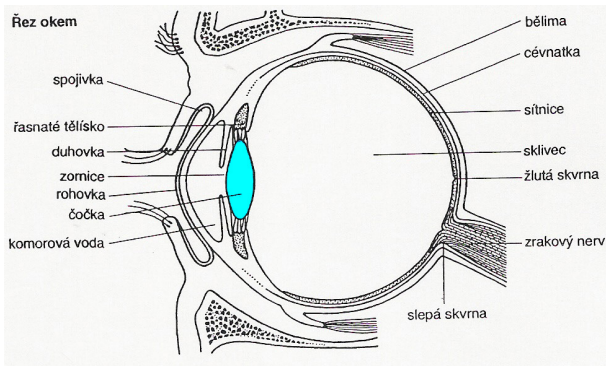




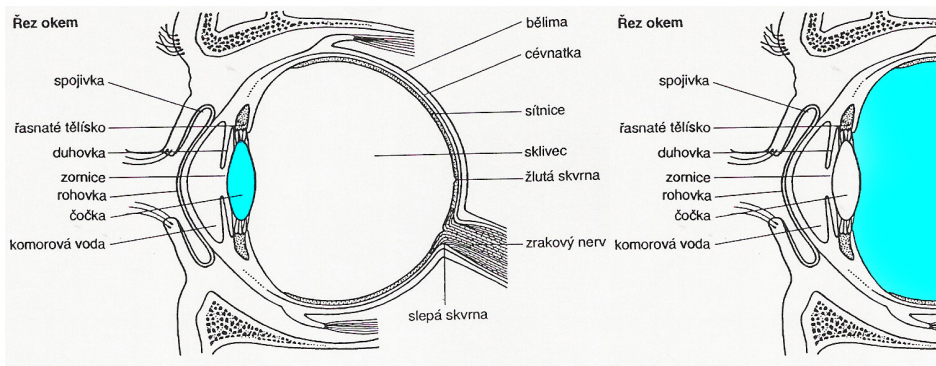
Oční koule (bulbus oculi) je mírně asymetrická koule, jejíž sagitální průměr je okolo 24–25 mm, transversální průměr je asi 24 mm. Hloubka přední komory, v níž je komorová voda, je 3,5 mm. Mezi komorovou vodou a čočkou je **duhovka** (iris), sloužící jako clona. Její radiální a kruhová svalová vlákna dokážou měnit průměr otvoru – **zornice** (zřítelnice, pupilla) v intervalu od 2 mm do 6 mm v závislosti na dopadajícím světelném toku.



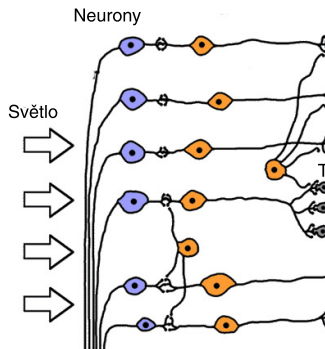
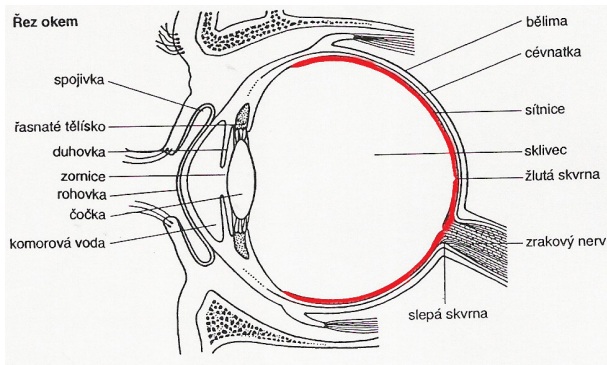
Rohovka (cornea) je průhledná část vnějšího povrchu, která kryje zornici a duhovku. Tloušťka 0,8 mm. Rohovka je zároveň první a nejsilněji lámavá plocha optického aparátu, podílí se spolu s přední a zadní plochou čočky na vytvoření ostrého obrazu na sítnici. Předpokladem její průhlednosti je její neustálé zvlhčování.



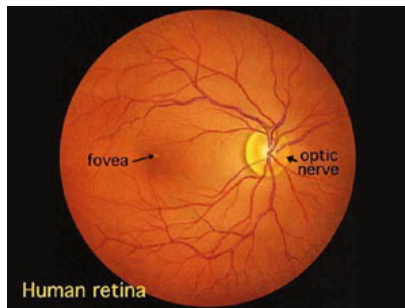
Čočka (lens crystalina) je nehomogenní těleso tvaru dvojbypuklé čočky z tuhé, rosolovité, dokonale průhledné hmoty. Je asi 4 mm silná, její povrchové části mají index lomu 1,38 a vnitřní části 1,41. Během života přibývají na čočce vrstvy, které s přibývajícím stářím tvrdnou a snižují akomodaci oka. Optická mohutnost samotné čočky je 18 D.



Akomodace je změna vyklenutí čočky, a tedy její optické mohutnosti. Oko akomodované na dálku má ohniskovou vzdálenost 0,017 m a optická mohutnost 58,8 D. Optická mohutnost rohovky je 42 D, čočky 18 D a kapalin (komorové vody, sklivce) 2–3 D. Akomodací na blízko se může zvětšit mohutnost u 10-letého člověka až o 15 D. Tato akomodační šíře činí u 45-letého člověka už jenom 4 D a u 60-letého nejvýše 1 D.



Sítnice (retina) vystýlající vnitřní povrch cévnatky je 0,2 mm až 0,4 mm silná. Tvoří ji 11 vrstev. Dva typy receptorů: **tyčinky** ($1,3 \times 10^8$, $\varnothing 2 \mu\text{m}$) slouží pro vnímání světla, **čípky** ($5 - 7 \times 10^6$, $\varnothing 4 \mu\text{m}$) jsou receptory barevného vidění. Místem nejostřejšího vidění je tzv. žlutá skvrna o průměru 1 mm. V ní převládají čípky. Sítnice je citlivá na barevné spektrum v intervalu vlnové délky 400 až 750 nm (velmi citlivé oko až v rozmezí 380–780 nm). Citlivost oka je největší pro 555 nm (zelená barva).







Žlutá skvrna (fovea) je místo na sítnici o průměru cca 0,2–0,5 mm. Nachází se na ose oka, je to místo nejostřejšího vidění, kterým my lidé ostříme. Na 1 mm^2 připadá asi 150 000 čípků (odpovídá rozlišení asi 10 000 dpi!), nejsou zde skoro žádné tyčinky. Žlutá skvrna slouží k ostrému a barevnému dennímu vidění. Vysoké rozlišení podporuje i fakt, že každý čípek ve žluté skvrně má svůj vlastní optický nerv (vlákno).

Slepá skvrna místo bez čípků a tyčinek, kde zrakový nerv opouští bulbus – je asi 5 mm vzdálená od žluté skvrny.

- ▶ Záření rovnovážných zdrojů
 - ▶ Černé těleso
 - ▶ Žárovka
 - ▶ Záření Slunce
- ▶ Záření nerovnovážných zdrojů
 - ▶ Luminiscence
 - ▶ Výbojka

- ▶ Detekce záření – konverze na lépe zpracovatelnou formu energie
- ▶ Detekujeme intenzitu záření, resp. fotony
- ▶ Parametry detektorů (účinnost konverze, časová odezva, citlivost, šum)
- ▶ Detektory založené na fotoefektu (vnitřní, vnější)
- ▶ Detektory využívající konverzi záření na teplo
- ▶ Oko

-  VRBOVÁ M., JELÍNKOVÁ H., GAVRILOV P.: *Úvod do laserové techniky*, Skriptum FJFI ČVUT, Praha, 1994 (<http://people.fjfi.cvut.cz/sulcjan1/ult/>)
-  VRBOVÁ M. a kol.: *Lasery a moderní optika - Oborová encyklopedie*, Prometheus, Praha, 1994
-  Sochor V.: *Lasery a koherentní svazky*, Academia, Praha, 1990 (<http://people.fjfi.cvut.cz/sulcjan1/ult/Lasery a koherentni svazky.pdf>)
-  Engst P., Horák M.: *Aplikace laserů*, SNTL, Praha, 1989 (<http://people.fjfi.cvut.cz/sulcjan1/ult/Aplikace laseru.pdf>)