

OPTICKÉ SENZORY

Vlastimil Matejec,

*Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR, v.v.i.,
Chaberská 57, 182 51 Praha 8-Kobylisy
Tel.: 266 773 511; e-mail: matejec@ufe.cz*



OBSAH

- **ÚVOD**

- Optické senzory základní pojmy, uspořádání
- Optické zdroje, detektory
- Optické detekční prvky – vlnovody, vedení světla, planární vlnovody, optická vlákna

- **VLNOVODNÉ SENZORY**

- Senzory využívající evanescentní vlnu
- Senzory reflexní
- Senzory využívající luminiscence



OBSAH

- **SPECIÁLNÍ VLNOVODNÉ SENZORY**
 - Senzory s optickými mřížkami
 - Senzory s mikrostrukturními vlákny
 - Senzory s povrchovými plazmony (SPR)
 - Senzory s optickými mikrorezonátory na principu vidů šeptající galerie WGM - „Whispering Gallery Mode“
- **OPTICKÉ MIKROSENZORY**
 - Kónicky zúžená vlákna (Tapery)
 - Luminiscenční nanočástice (PEBBLE-Probes Embedded in Biologically Localized Environment)
- **ZÁVĚRY** – Nové směry



Literatura

- M.Pospíšilová, I. Kašík, V.Matějec:
Vláknová optika pro biologii a medicínu,
skripta ČVUT, 2011
- SENZORY, 2007,
<http://www.vscht.cz/anl/paci/PAC/prezentace/senzory.pdf>
- Odkazy při přednáškách
- Průsvitky z přednášek
<http://www.ufe.cz/staff.php?id=matejec&detail=teaching>



ÚVOD

Senzor

***Senzor* je přístroj, který reaguje na vnější fyzikální nebo chemický podnět (změna teploty, tlaku, přítomnosti chemikálie, její koncentrace) a převádí ho na fyzikální signál (světlo, elektřina), který je detekován pozorovatelem nebo přístrojem.**



Definice - Cambridge

Chemický senzor

Chemický Senzor je miniaturizovaný analytický přístroj, který poskytuje informaci o přítomnosti specifických sloučenin nebo iontů v reálných vzorcích a to on-line a v reálném čase.

Pozn.: Definice nepožaduje vratnost

The Cambridge Definition of Chemical Sensors:

by K. Cammann, G. G. Guilbault, E. A. H. Hall, R. Kellner and O. S. Wolfbeis, 1996

For a review see:

Optical Chemical Sensors. McDonagh, C.; Burke, C. S.; MacCraith, B. D.
Chemical Reviews (2008), 108, 400-422.



IUPAC DEFINICE

Biosenzor

***Biosenzor* je plně integrovaný přístroj schopný poskytovat specifické kvantitativní nebo semikvantitativní analytické informace s využitím biologického rozpoznávacího prvku (biopřevodníku), který je v přímém kontaktu s detekčním-převodníkovým prvkem.**

- For a review on optical biosensors see:

Optical Biosensors. Borisov, S. M.; Wolfbeis, O. S. *Chemical Reviews* (2008), 108, 423-461



Optický senzor

Senzor tedy umožní rozpoznat a kvantifikovat vnější podnět na základě odpovídajících změn fyzikálního signálu v detekčním místě.

Optický senzor využívá jako fyzikální signál světlo a to od

ultrafialové (0,2 μm – 1,5 10^{15})

střední IČ (10 μm - 3 10^{13} Hz).

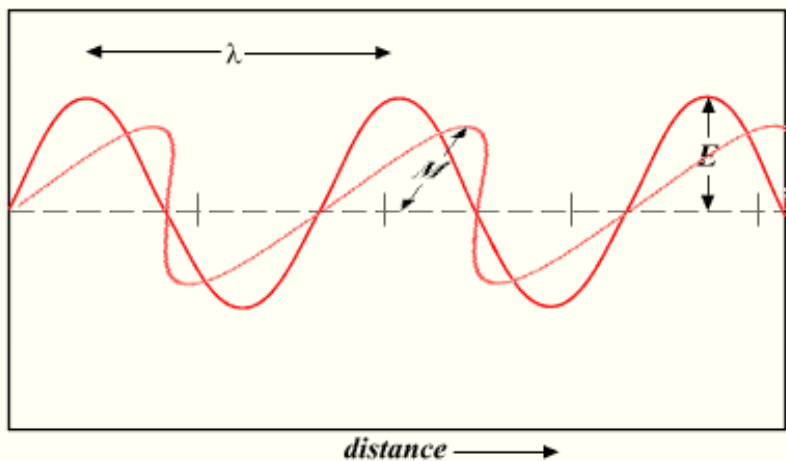
Optický senzor využívá změn amplitudy, fáze, frekvence (vlnové délky) světla způsobených měřenou veličinou



Světlo

Příčné elektromagnetické vlnění

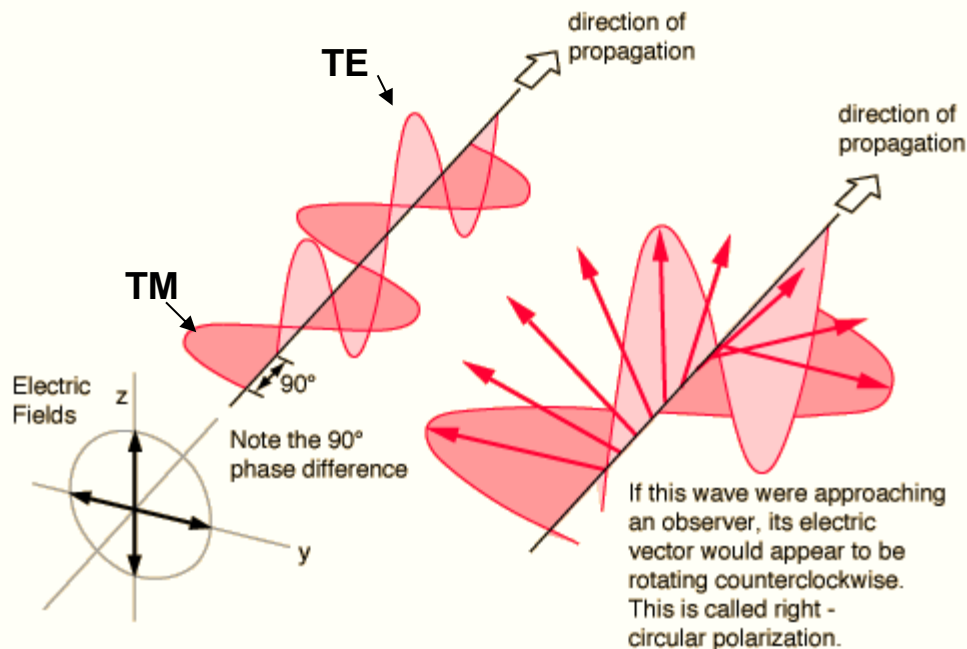
Light Wave



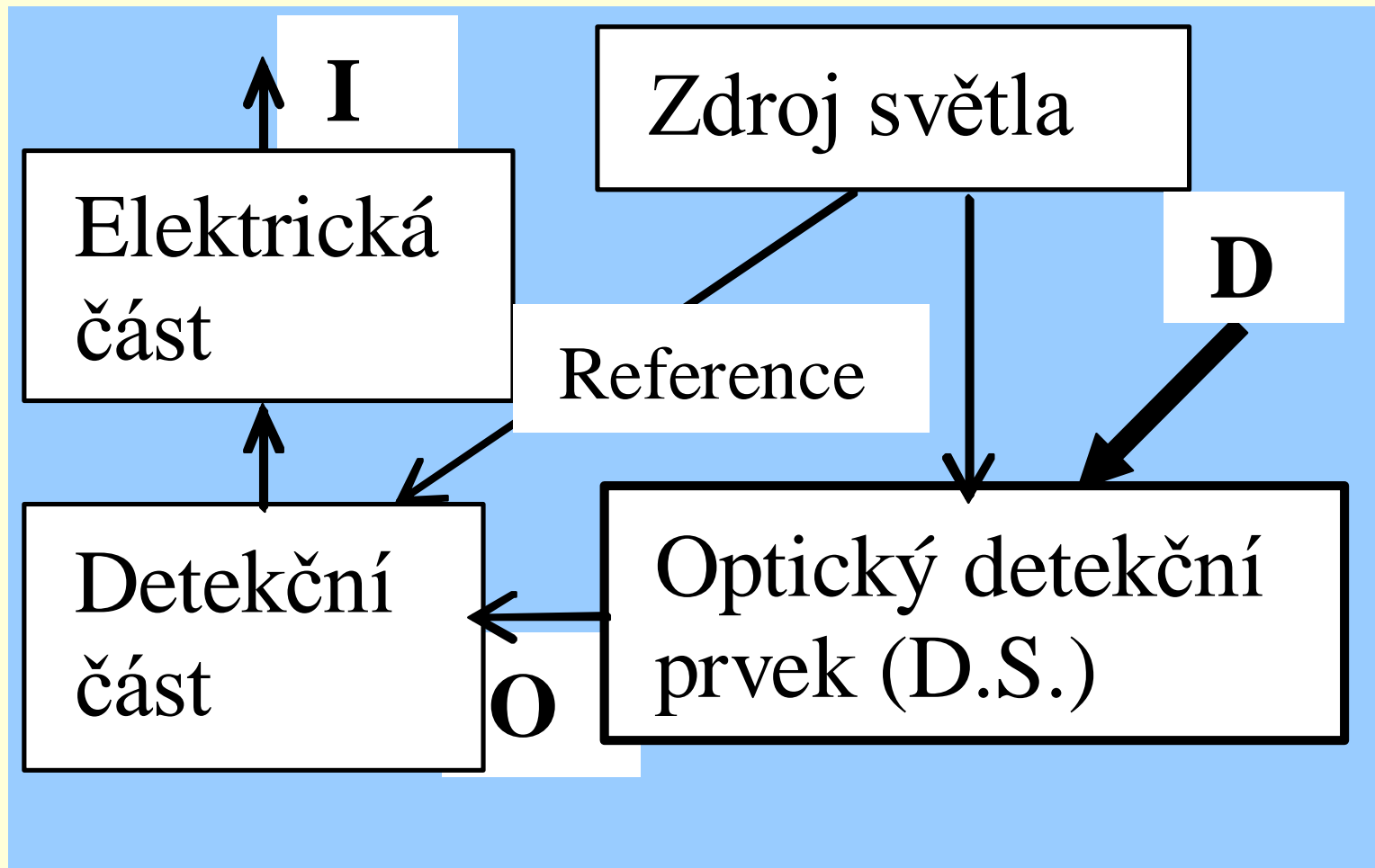
λ = wavelength
E = amplitude of electric field
M = amplitude of magnetic field

Polarizace

TE (p) a TM(s) polarizace se definují vzhledem k rovině dopadu na materiál (p=paralelní)



Uspořádání optického senzoru



D.S. – Detekční místo („Detection site“)



Senzorový efekt

V optickém senzoru detekovaná veličina D mění v detekčním místě vlastnosti světla (intenzitu, fázi, polarizaci, vlnovou délku) Q a tyto změny jsou detekovány ve výstupním elektrickém signálu senzoru I.



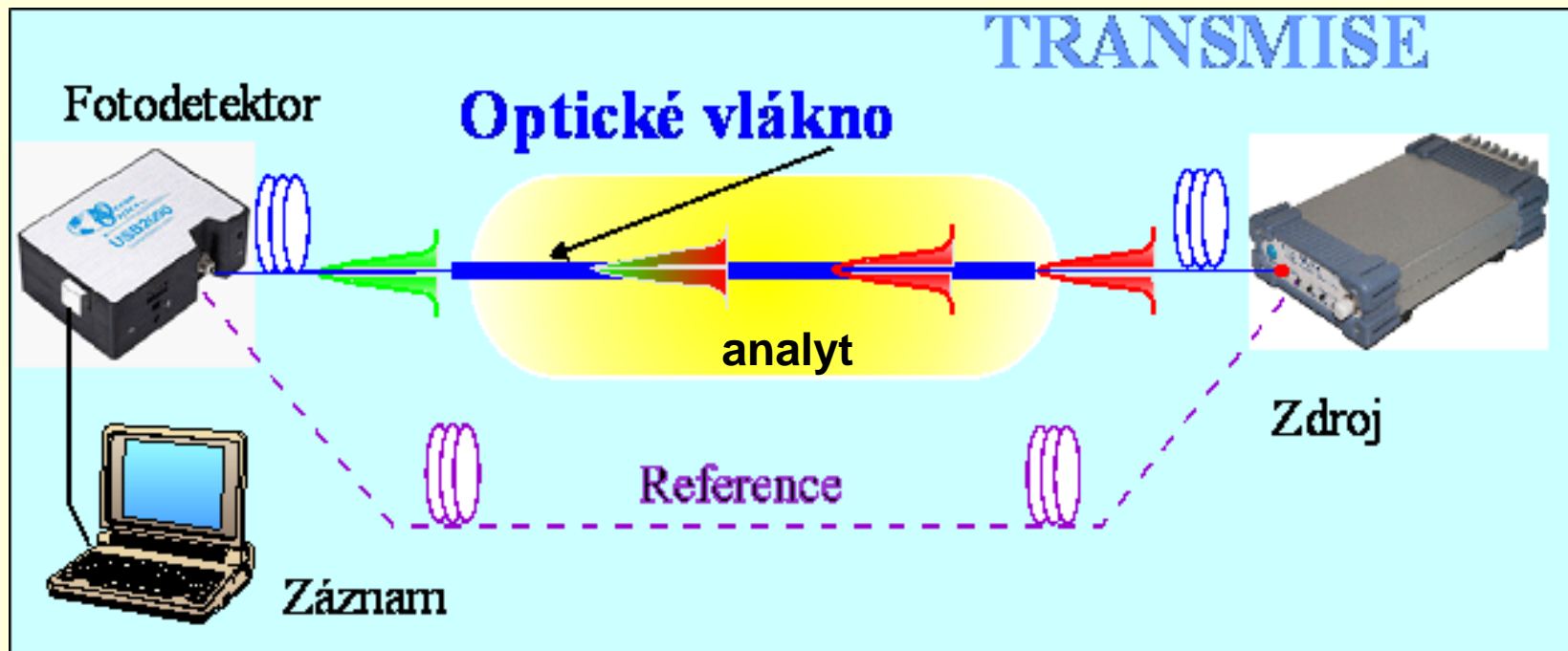
Optický senzor – nezbytné části

- Zdroj světla (žárovka, LED, laser, ...)
- Detekční prvek (vlnovod, mřížka, folie , ..)
- Detektor (fotodioda, lavinová fotodioda, ..)
- Elektrická část pro napájení a zpracování optického signálu)

Všechny tyto části musí být integrovány v jednom systému.



Vláknově-optický transmisní senzor



Základní pojmy

Senzor přímý:

Detekovaná veličina \leftrightarrow Světelná vlna \Rightarrow Změna parametrů vlny

Př: Detekce toluenu při 1690 nm, kde má toluen absorpci

Senzor nepřímý:

Detekovaná veličina \leftrightarrow Převodník \Rightarrow Změna parametrů
převodníku

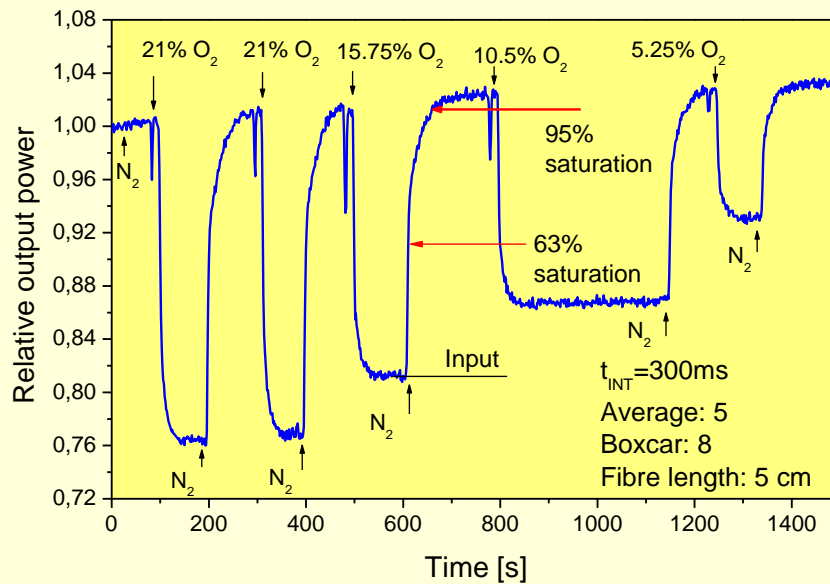
Převodník \leftrightarrow Světelná vlna \Rightarrow Změna parametrů vlny

Př.: detekce pH s využitím kolorimetrických indikátorů



Parametry senzoru dynamické

Časová odezva senzoru = čas potřebný, aby se výstup senzoru změnil z aktuálního stavu do konečného stavu v rámci určitého tolerančního rozmezí (např. 5%)



$$I = I_s \left(1 - \exp \left(\frac{-t}{\tau} \right) \right)$$

I_s ustálená hodnota

τ - časová konstanta
(pro $I=0.632 I_s$)

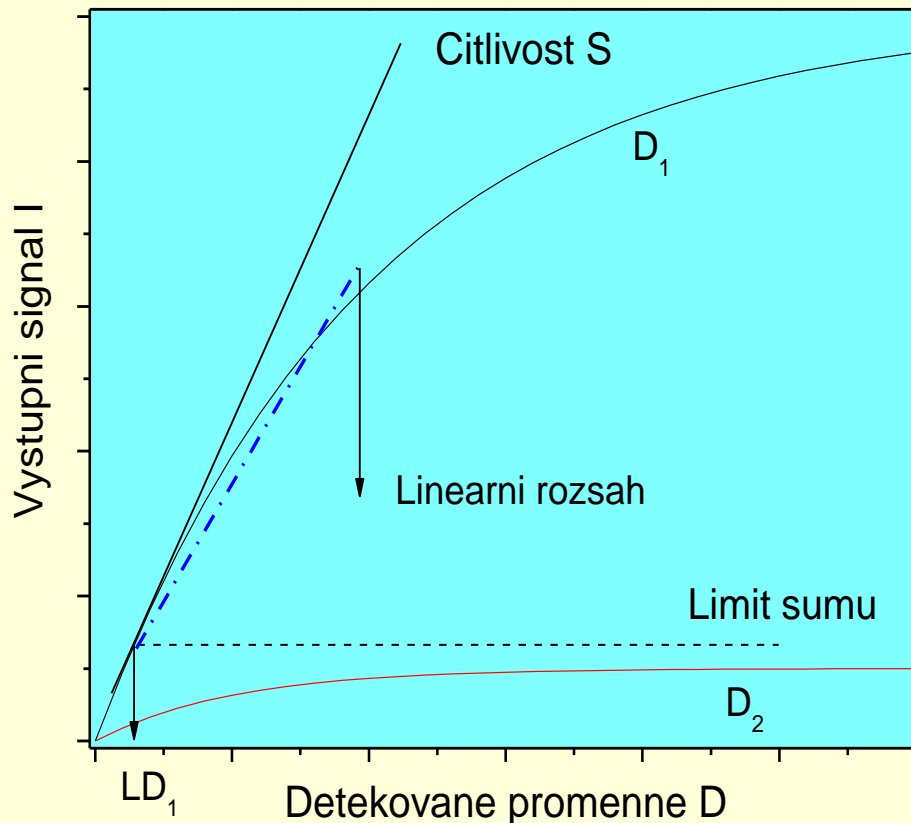
Odezvy s - min

Detekce kyslíku zhášením fluorescence
Ru komplexu



Parametry senzoru - Statické

Kalibrační křivka



Proměnná D_1 detekovaná v rozsahu $LD_1 \rightarrow$

Proměnná D_2 nemůže být senzorem detekována



Citlivost (**S**) of optického senzoru

$$S_i = \left(\frac{\partial O}{\partial D_i} \right) \left(\frac{\partial I}{\partial O} \right)$$

Selektivita k proměnné **D**

Schopnost senzoru detekovat jen veličinu **D**

S je vysoké pro detekovanou veličinu **D**

$I \ll$ limit šumu nebo $S \rightarrow 0$ (pro další detekované proměnné v detekčním místě)



Základní pojmy – Statické parametry

Přesnost senzoru:

Charakterizuje odchylku od skutečné hodnoty

Př.: Vliv interferujících látek, systematické chyby – iontové síly, složení roztoku

Reprodukovatelnost

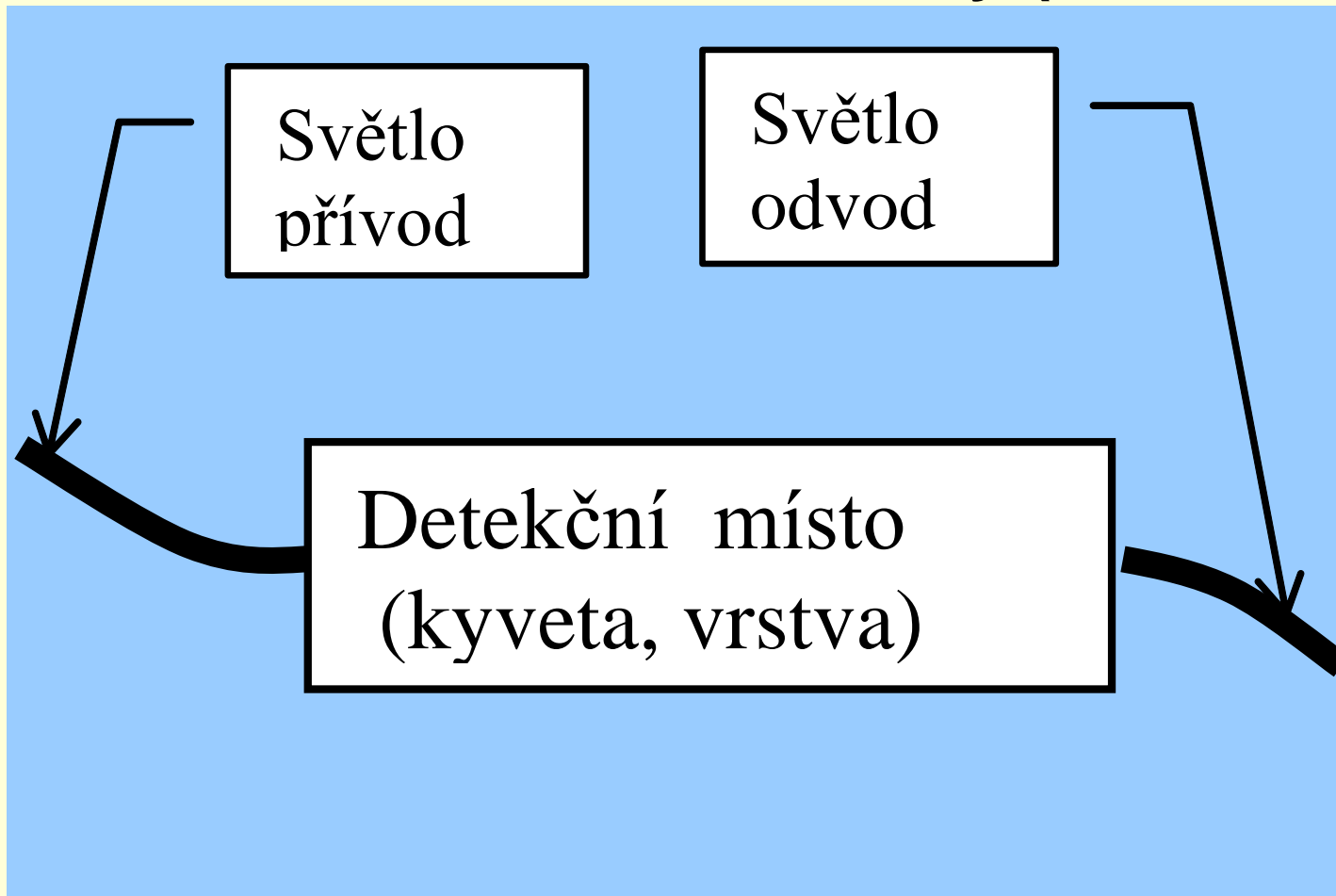
Charakterizuje rozdílnost výsledků při pokusech opakovaných za stejných podmínek

Limit detekce LD

Nejmenší hodnota detekované proměnné, kterou lze ještě v šumu detekovat.



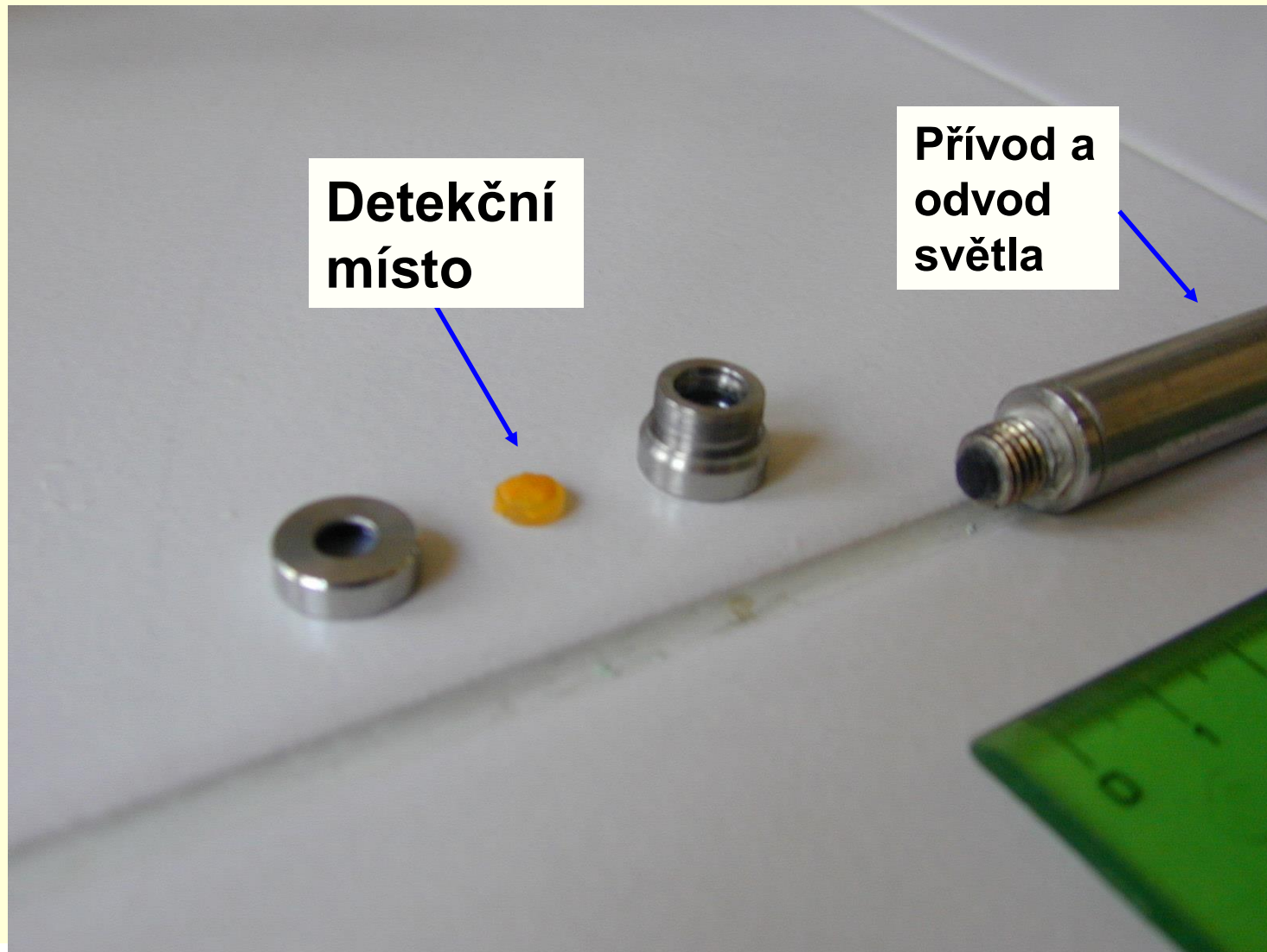
Nevlastní vlnovodné senzory (Extrinsic)



Světlo je přivedeno do detekčního místa, zde změní své vlastnosti a je odvedeno do detektoru. **Vlastní detekce je mimo vlnovod, tj. oddělena od přívodu a odvodu světla**



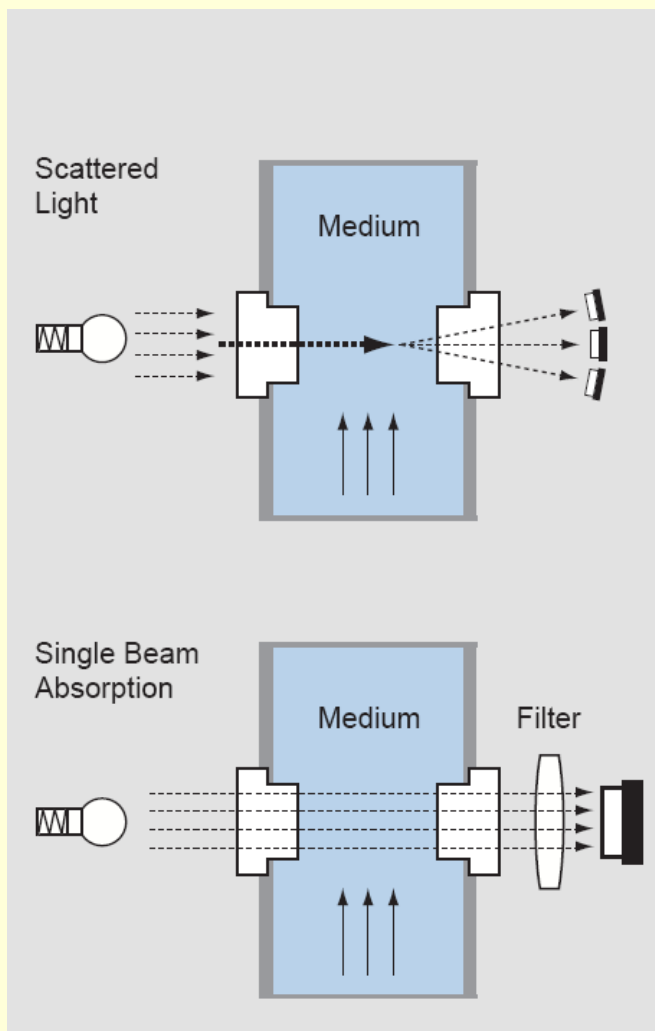
Nevlastní senzor kyslíku



**Detekční
místo**

**Přívod a
odvod
světla**

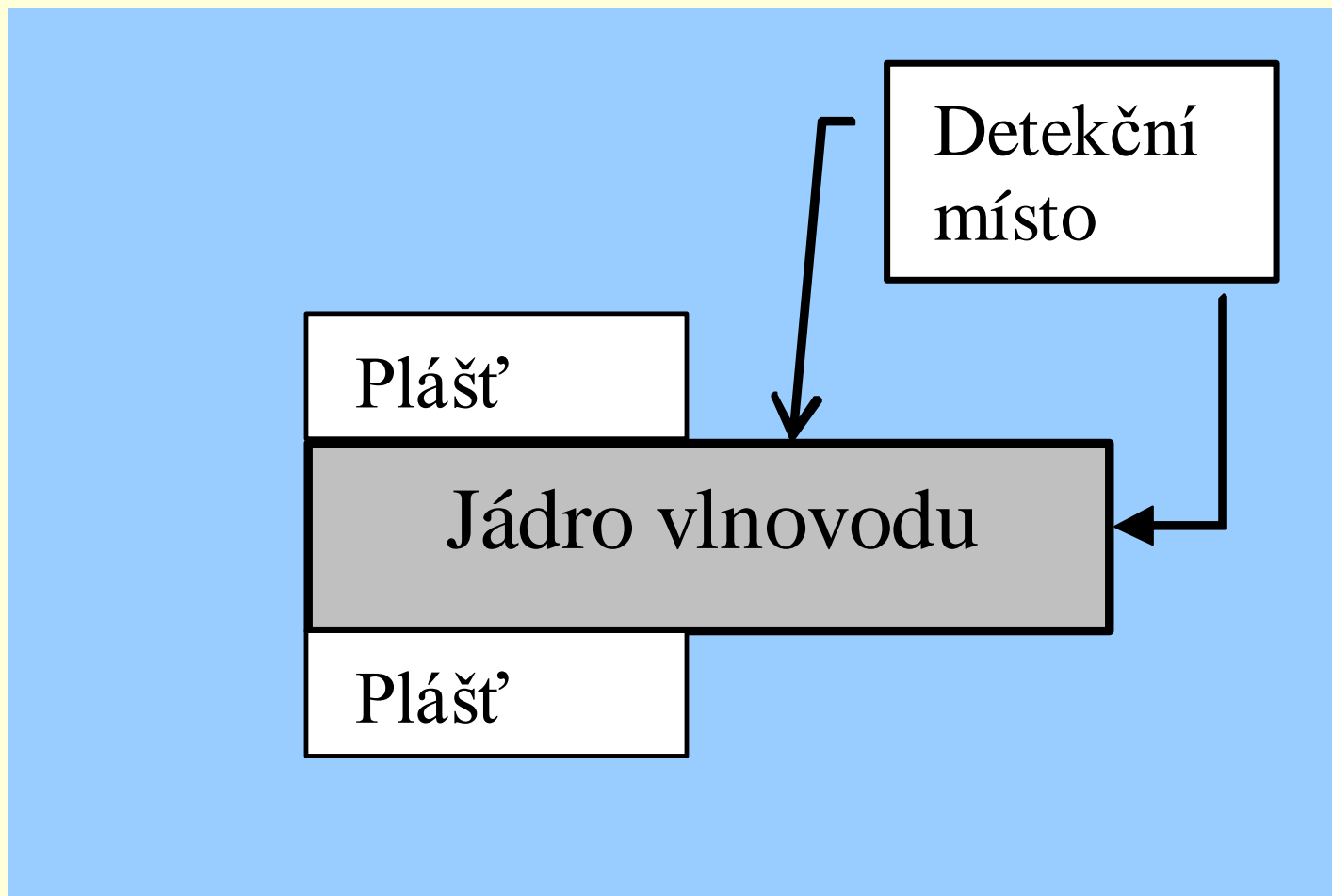
Nevlastní UV senzor



**Měření zákalů ve fermentorech,
chromatografické detektory**



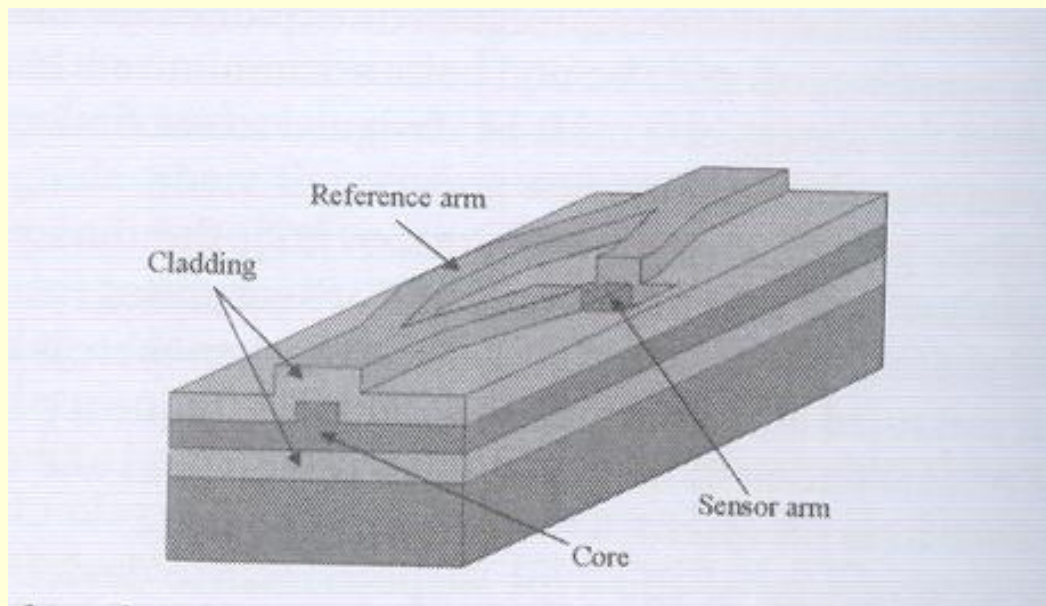
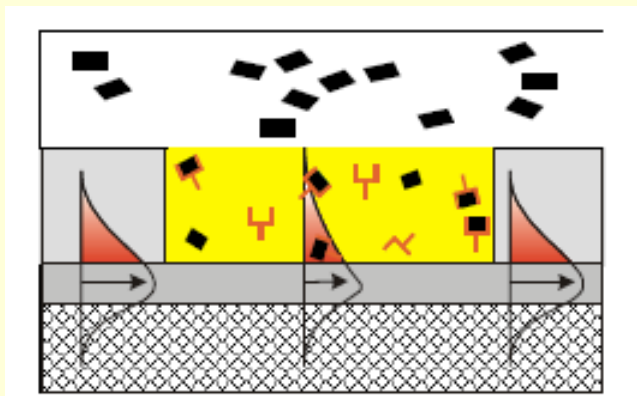
Vlastní vlnovodné senzory (Intrinsic)



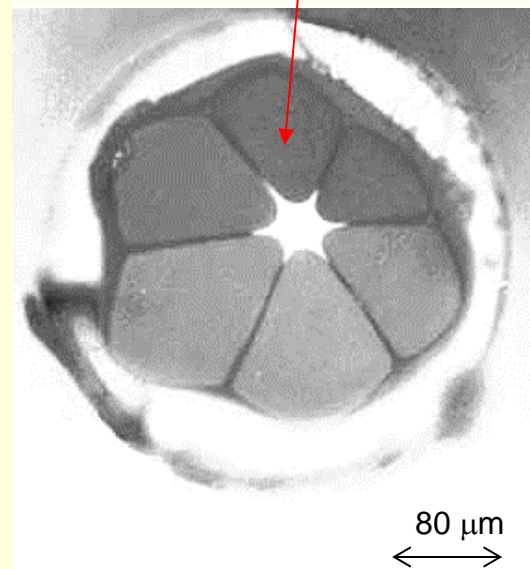
Světlo je měněno při jeho přenosu vlnovodem; **Přívod, detekce a odvod světla jsou v jednom prvku**



Vlastní senzory



Detekční místo v
dírách vlákna



DETEKOVANÉ PROMĚNNÉ

Fyzikální: teplota, tlak, mechanické deformace, mechanická napětí, elektrické napětí, proud, jaderné záření

Chemické: přítomnost molekul, koncentrace

Biologické: přítomnost látek, koncentrace

- Book on optical sensors see e.g.:

Optical Sensors. Narayanaswamy R., Wolfbeis, O. S.- Editors, *Springer Series on Chemical Sensors and Biosensors 01, (2004)*



VÝHODY OPTICKÝCH SENZORŮ

- **Malé rozměry a váha**
- **Nízká spotřeba energie („green photonics“)**
- **Odolnost k rušení vnějšími elektrickými a magnetickými poli**
- **Vysoká citlivost v širokém rozsahu detekovaných proměnných**
- **Odolnost k nespecifickým vlivům okolí**
- **Možnost využít telekomunikační součásti**



Využití - Automobily

Comfort

- Atmospheric pressure sensor (transmission control, motronic)
- Manifold absolute pressure sensor (Electronic diesel control, motronic)
- Knock sensor (Motronic)
- Mass air flow sensor (Motronic – air intake)
- Angular position sensor (Motronic – cam and crankshaft position)
- Piezo actuator (Fuel injection)
- Rotational speed sensor (Electronic transmission control, motronic)
- Oil quality sensor (Transmission and engine)
- Soot sensor (Motronic – exhaust)
- High pressure sensor (Fuel injection system, common rail)
- Oxygen sensor (Motronic - lambda)
- Pedal position sensor (Electronic accelerator, electro-hydraulic brake)
- Tank/tire pressure (On board diagnostics)
- Tilt sensor (headlamp aiming, security)

Powertrain

- Humidity/temperature (Air condition)
- Air quality sensor (Air condition)
- Angular rate (Navigation, tilt, chassis)
- Light sensor (Automatic light, air conditioning)
- Rain sensor (Wash/wipe control)
- Microphones/displays (Communication)
- Inertial/pressure (Central locking, theft protection)
- Radar 77 GHz (lateral control, obstacle detection)
- Infrared (Night vision system)
- Radar 24 GHz (Pre-crash, parking aid)
- Steering wheel angle sensor (Vehicle dynamics)
- Rotational speed (Antilock braking system)
- Pressure sensor (Vehicle dynamics, crash detection)
- Yaw rate (Electronic stability program)
- Angular rate sensor (Roll over)

Safety

- CMOS camera (parking aid)
- Inertial sensors (airbag and stability control)
- Out of position sensor (Airbag)
- Seat occupancy sensor (Airbag)

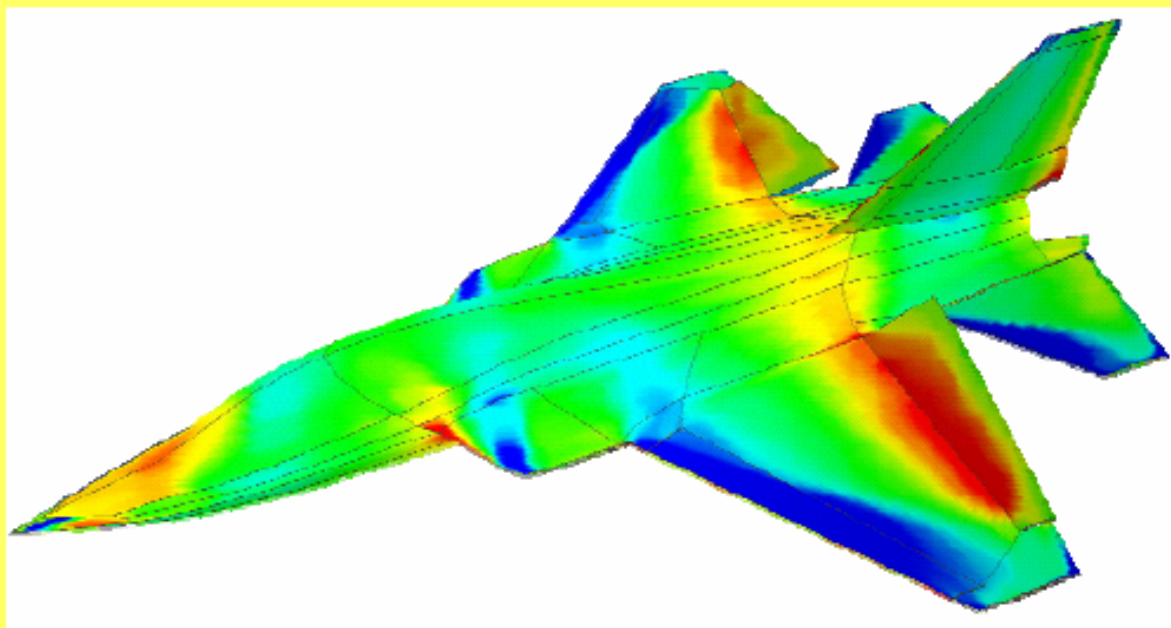
Detekce úniku vodíku v H automobilech



Využití – Automobily, letadla

- * Pressure-sensitive Paints (PSPs) and
- * Temperature-Sensitive Paints (TSPs)

Used to "photograph"
pressure (in fact oxygen)
or temperature



Book: T. Liu, J. P. Sullivan, Pressure and Temperature Sensitive Paints, 2005, Springer.

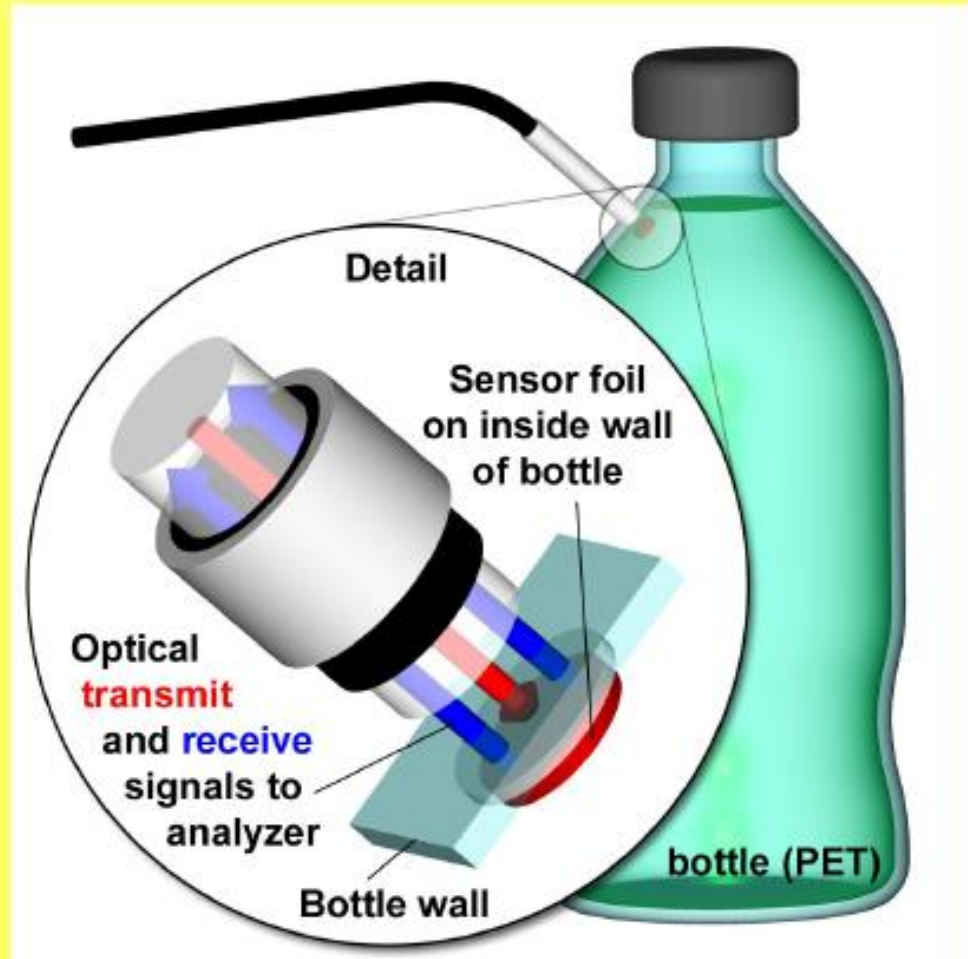


Využití – Potravinářství, Farmacie

PET is permeable to oxygen and CO₂

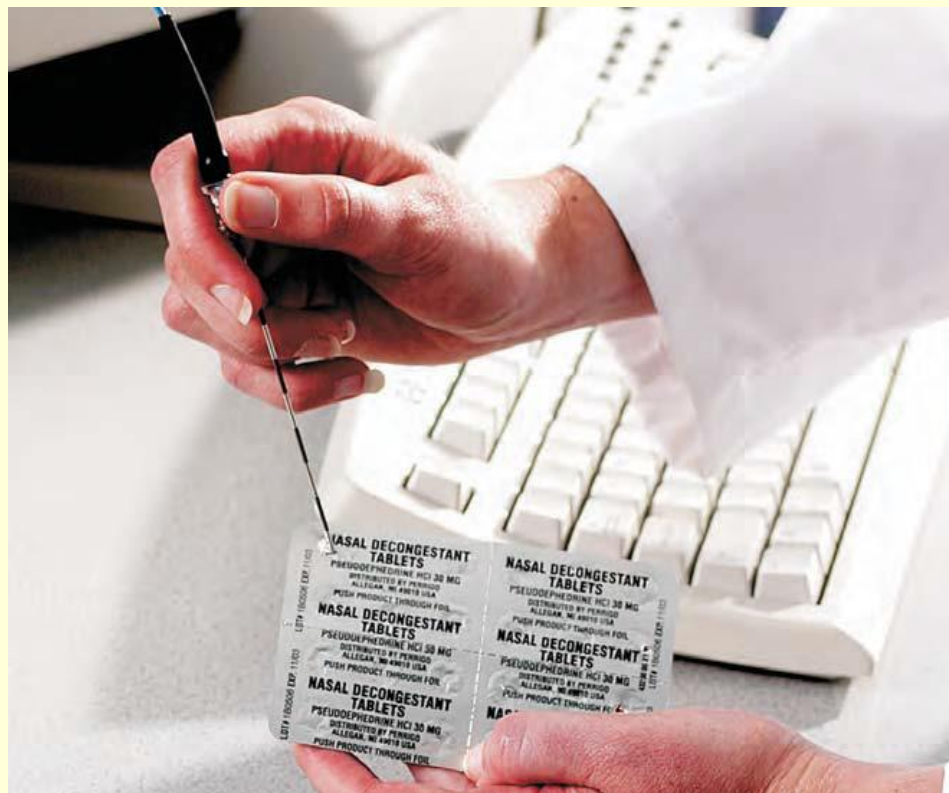
- * CO₂ diffuses out
- * O₂ diffuses in

Sensor Spots Placed Inside the Bottle



This is a large market that cannot be covered by electrochemical sensors

Využití – Farmacie



Měření úplnosti produktu

Měření obsahu

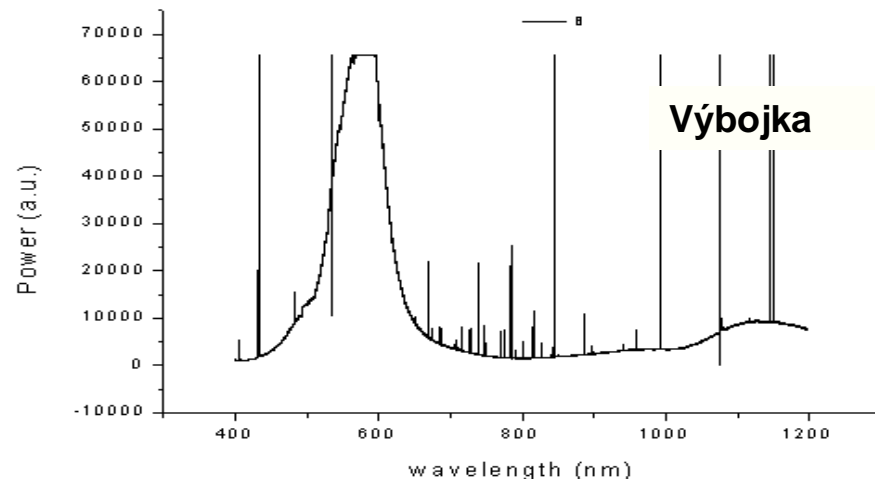
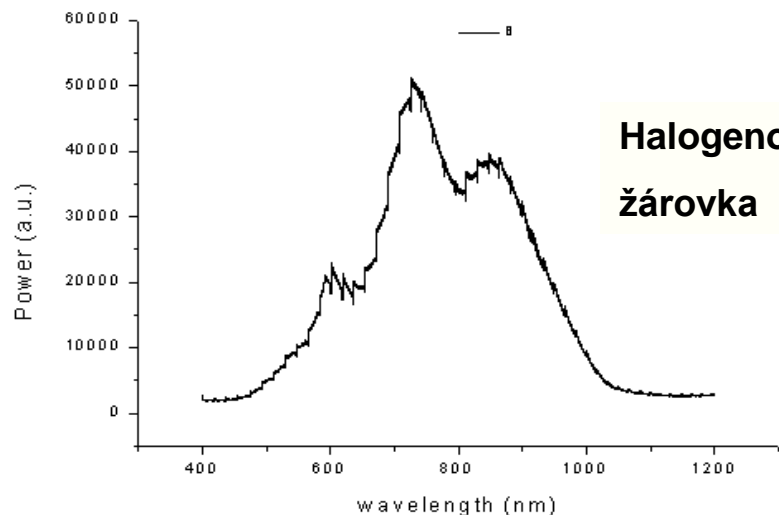


Zdroje světla

- Širokopásmové žárovky, výbojky
- LED – „Light emitting diode“, LD- „Laser diode“
- Lasery zejména polovodičové
- QCL – „Quantum cascade laser“



Žárovky a výbojky

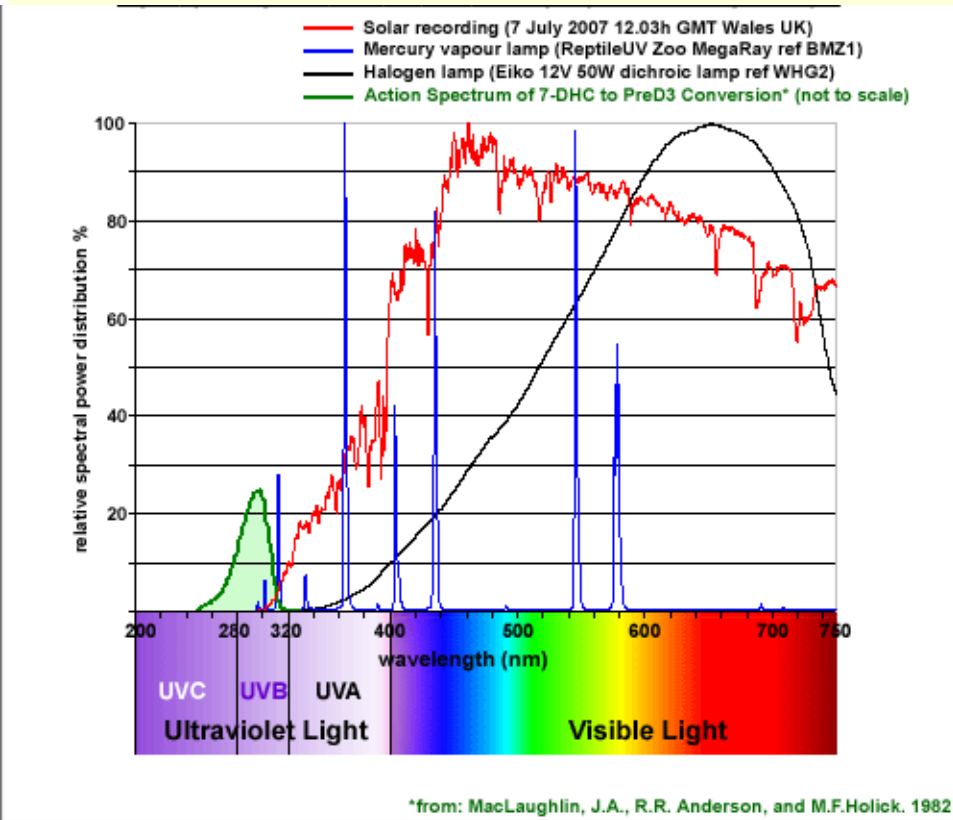
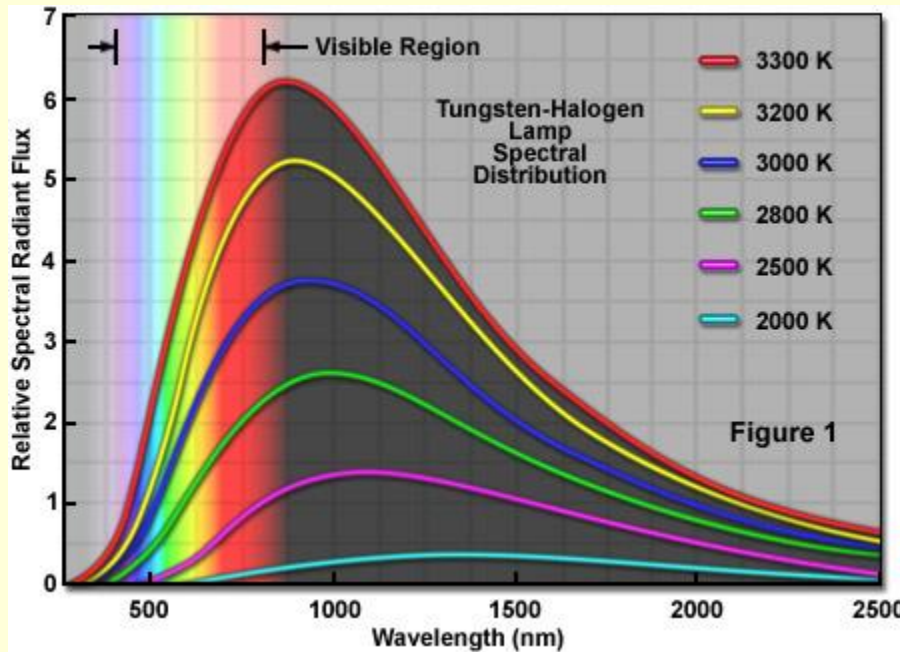


Využívají záření elektricky zahřátého emisního prvku (W spirála) nebo výboje v el. oblouku (Hg výbojka)

Intenzivní, širokopásmové zdroje, nutné kombinovat se spektrometry nebo filtry, finančně dostupné



Žárovky a výbojky

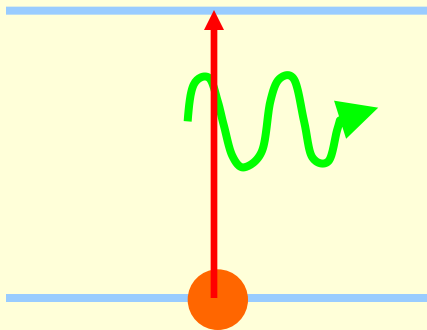


Halogenová žárovka je vhodná i do blízké IČ oblasti

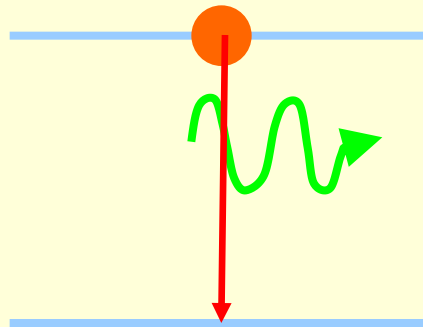


Luminiscenční zdroje – LED, LD

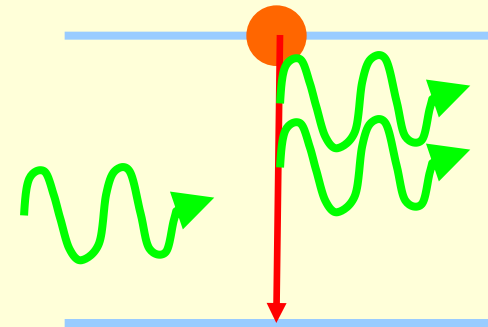
Čerpání (elektrické,
optické)



Spontánní
emise (LED)



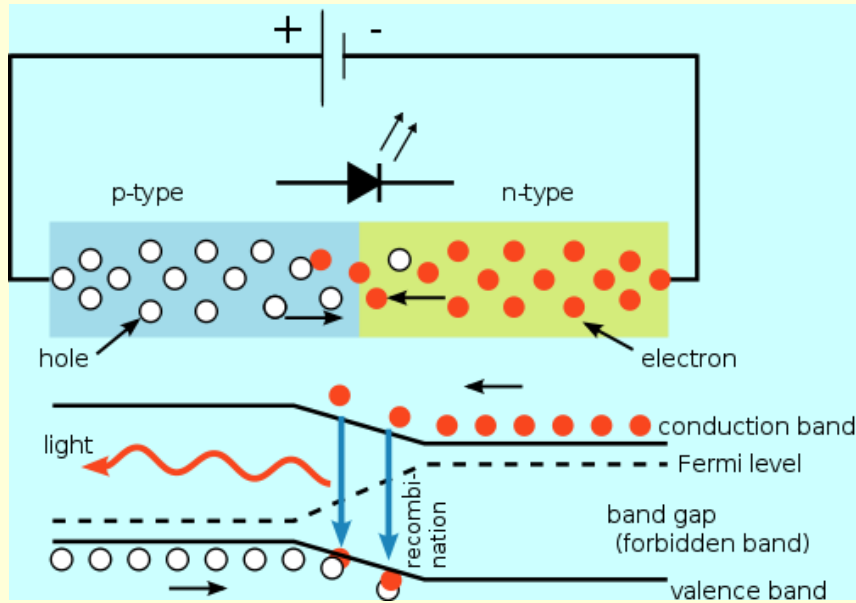
Stimulovaná
emise (LD)



Stimulovaná emise je emise fotonu (světla) vyvolaná **interakcí fotonu s excitovanou částicí** (elektron, iont) \Rightarrow Výsledkem jsou dva fotony se stejnou vlnovou délkou, fází a polarizací (koherentní světlo).

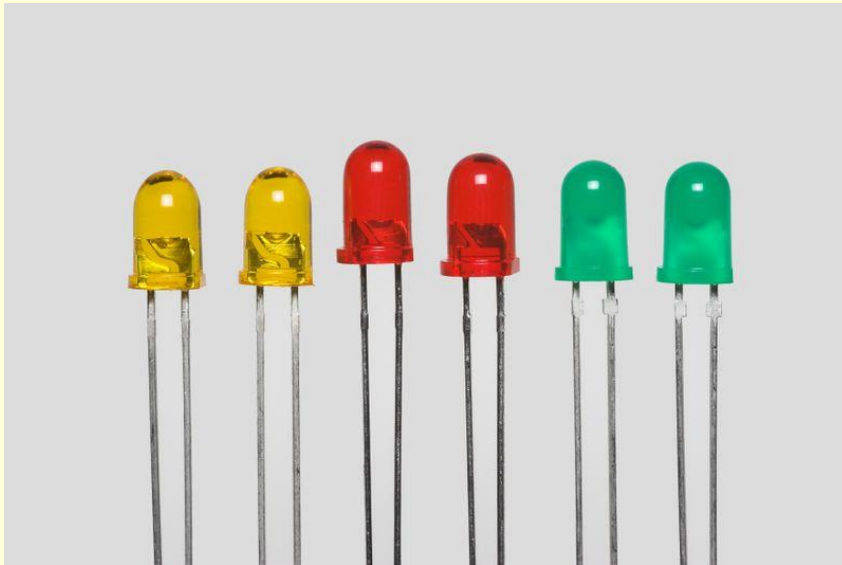


LED



$$h^+ + e^- = h\nu + \text{světlo}$$

Elektroluminiscence
elektrony jsou elektricky
vyčerpány do
vodivostního pásu
polovodiče, rekombinací s
děrami dojde k vyzáření
fotonu



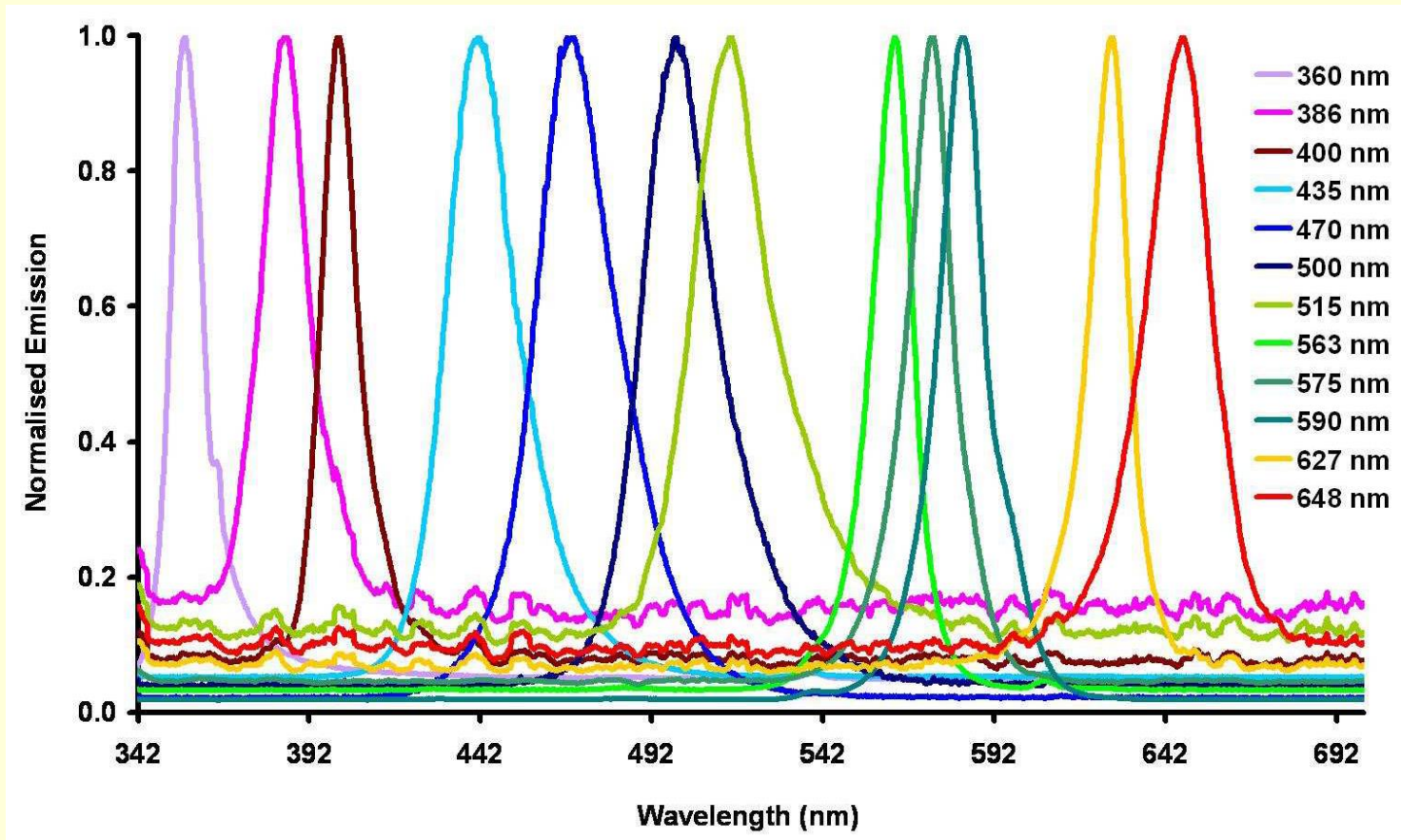
LED-materiály

Barva	Vlnová délka [nm]	Napětí [V]	Materiál
IČ	>760	< 1,9	GaAs, AlGaAs
Červená	610 – 760	1,63-2,03	AlGaAs, GaAsP, AlGaInP, GaP
Oranžová	590-610	2,03-2,10	GaAsP, AlGaInP, GaP
Žlutá	570-590	2,10-2,18	GaAsP, AlGaInP, GaP
Zelená	500-570	1,90-4,00	InGaN/GaN, GaP, AlGaInP, AlGaP
Modrá	450-500	2,48-3,7	ZnSe, InGaN, SiC, Si
Fialová	400-450	2,76-4,00	InGaN, Červená/modrá LED + fialový luminofor
UV	<400	3,10-4,40	Diamant (215 nm), AlN (210 nm), AlGaInN (<210 nm)

Bílé LED – kombinace modrá, zelená, červená LED nebo modrá LED s vhodným emitujícím materiálem



LED emise



Pološířka emitovaného pásu ~ 30-50 nm

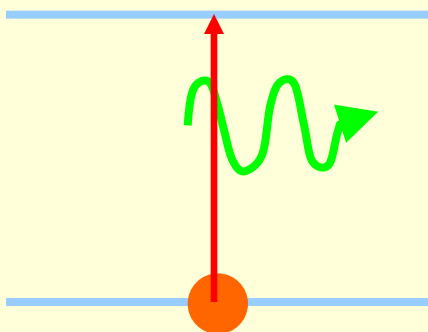
- see e.g.:

M. O'Tool, D. Diamond, Absorbance based light emitting diode optical sensors and sensing devices, *Sensors* 8, 2453-2479, 2008

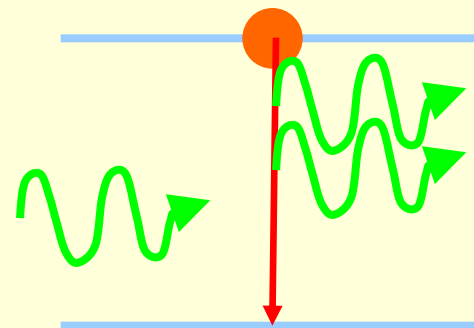


Lasery, laserové diody - LD

Čerpání (elektrické,
optické)



Stimulovaná
emise (LD)

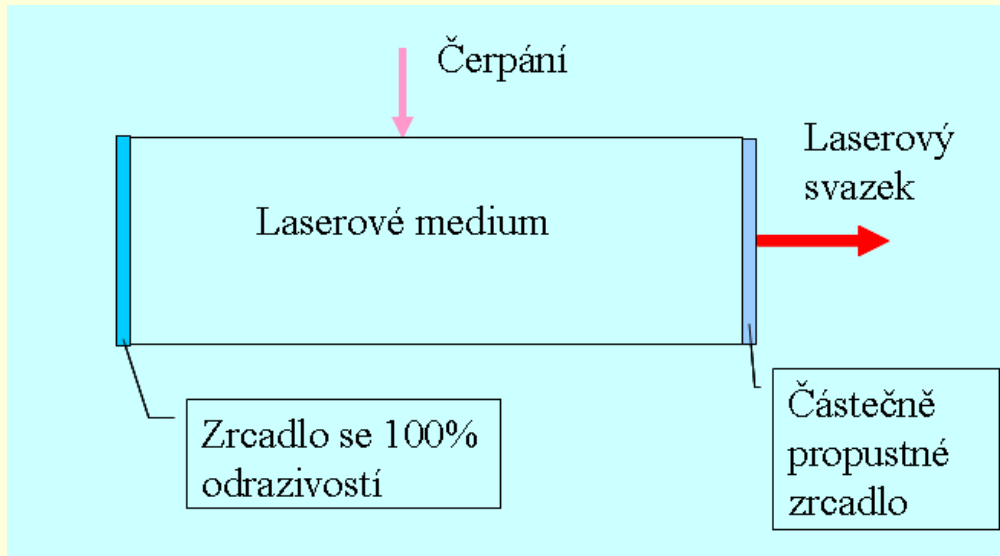


Podmínky pro laserovou akci:

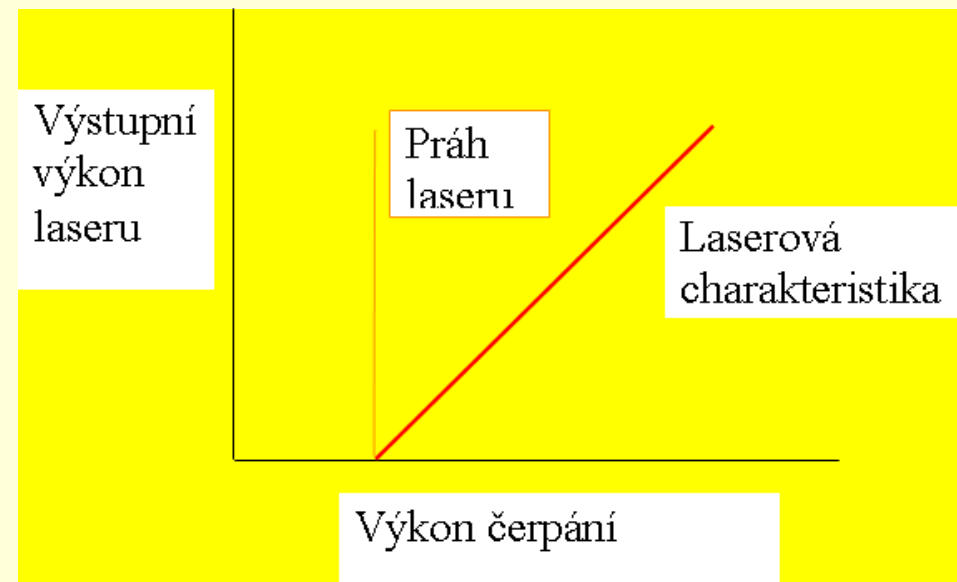
1. Inverzní populace (více elektronů ve vodivostním pásu, než ve valenčním).
2. Zdroj fotonů pro stimulovanou emisi - resonátor.



Laserový resonátor

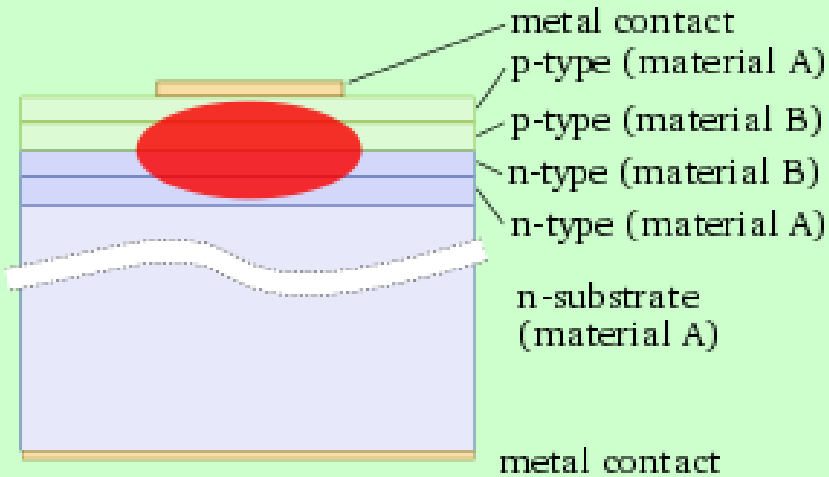


Odraz fotonů od zrcadel resonátoru poskytuje fotony pro stimulovanou emisi. Laserový výstup je možný až po pokrytí ztrát resonátoru, tj. po překročení prahu laseru.



Polovodičové lasery - LD

DH laser



485 nm – excitation of GFP and other fluorescent dyes

760 nm – AlGaInP sensor: O₂

1512 nm – InGaAsP sensor: NH₃

1654 nm – InGaAsP sensor: CH₄

1877 nm – GaSbAs sensor: H₂O

2004 nm – GaSbAs sensor: CO₂

2330 nm – GaSbAs sensor: CO

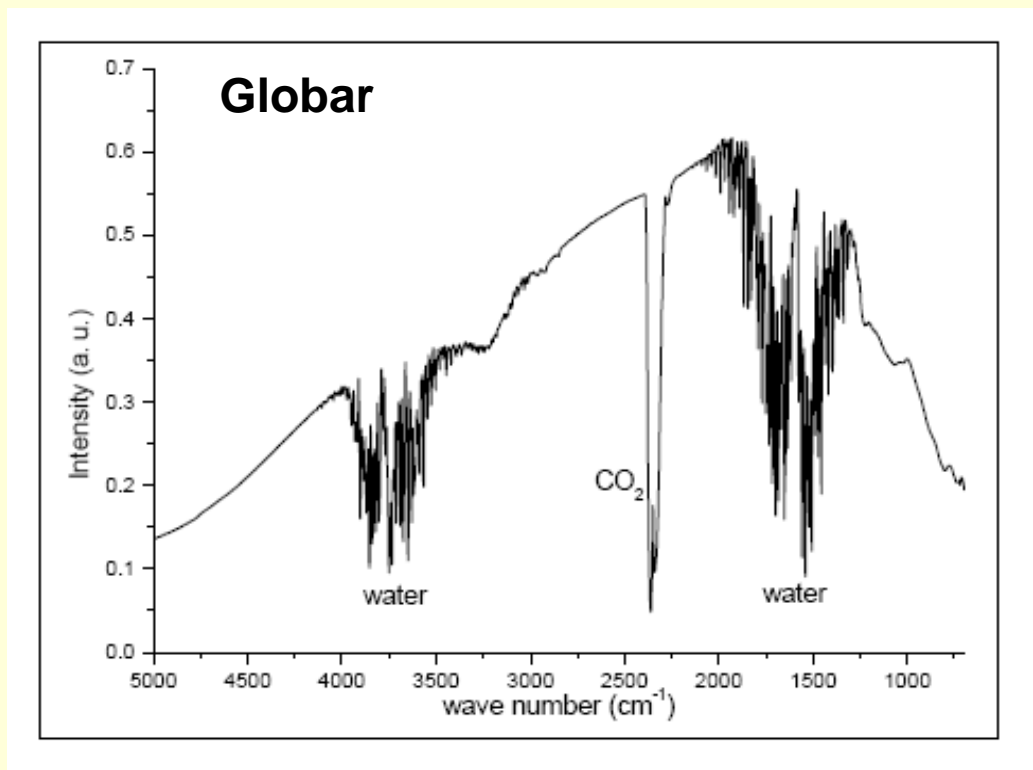
2680 nm – GaSbAs sensor: CO₂

Stimulovaná emise na rozhraní p- a n- polovodiče. Podstatně užší spektrum výstupního svazku než u LED, koherentní záření

- see e.g.: http://en.wikipedia.org/wiki/Laser_diode



Zdroje pro střední IČ oblast (Globalar, vysokotlaká Hg výbojka)



**Globalar: - SIC žhavený asi na 1550 K -
širokopásmový zdroj k němuž je nutný IČ
spektrometr (FTIR) nebo vhodné filtry.**

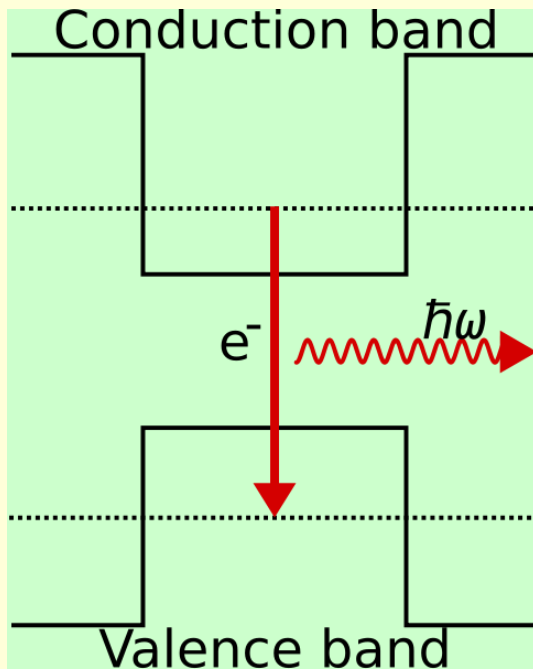


Lasery pro střední IČ oblast

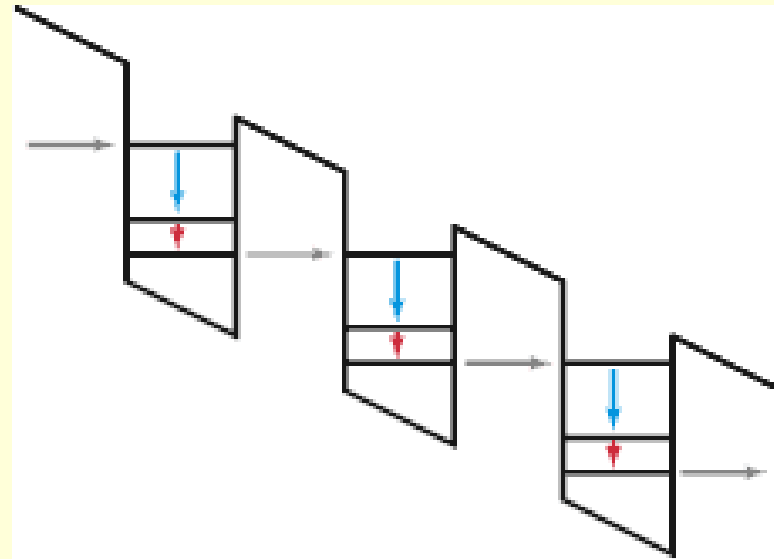
Polovodiče: $\text{Pb}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Te}$ ($\text{Pb}_x\text{Eu}_{1-x}\text{Se}_y\text{Te}_{1-z}$). Zakázaný pás 0.5 eV., funkce pod 200 K (nutné chladiče s kapalným dusíkem). Proto se používají kvantové kaskádové lasery (QCL)

Ne objemové materiály, ale kombinace tenkých vrstev s různými energiemi (kvantové jámy), mezi nimiž mohou elektrony tunelovat

Standardní LD



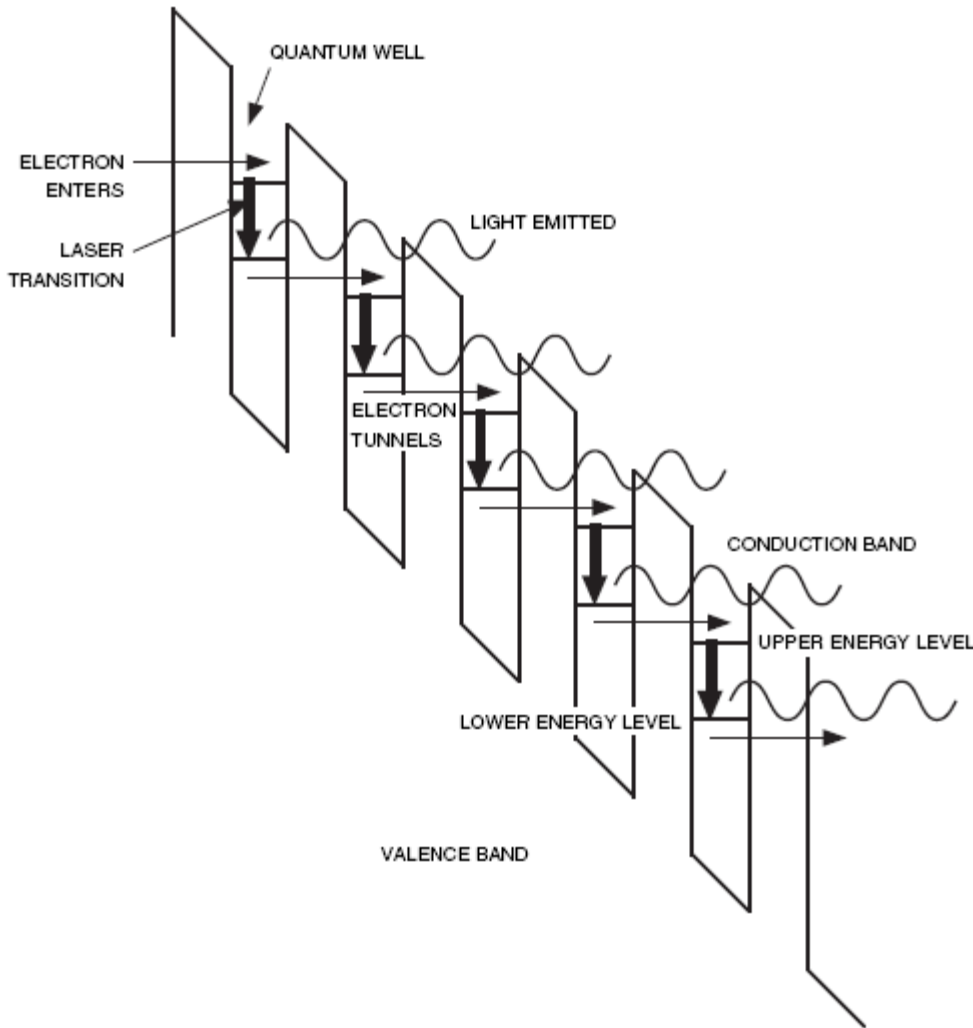
QCL



- zářivý přechod, -- nezářivý přechod,
- tunelování elektronů



Kvantové kaskádové lasery



Široké rozmezí vlnových délek:

InGaAs/AlInAs 3,5-24 μm

Ladění tloušťkou vrstvy

**Vysoké optické výkony
~1W**

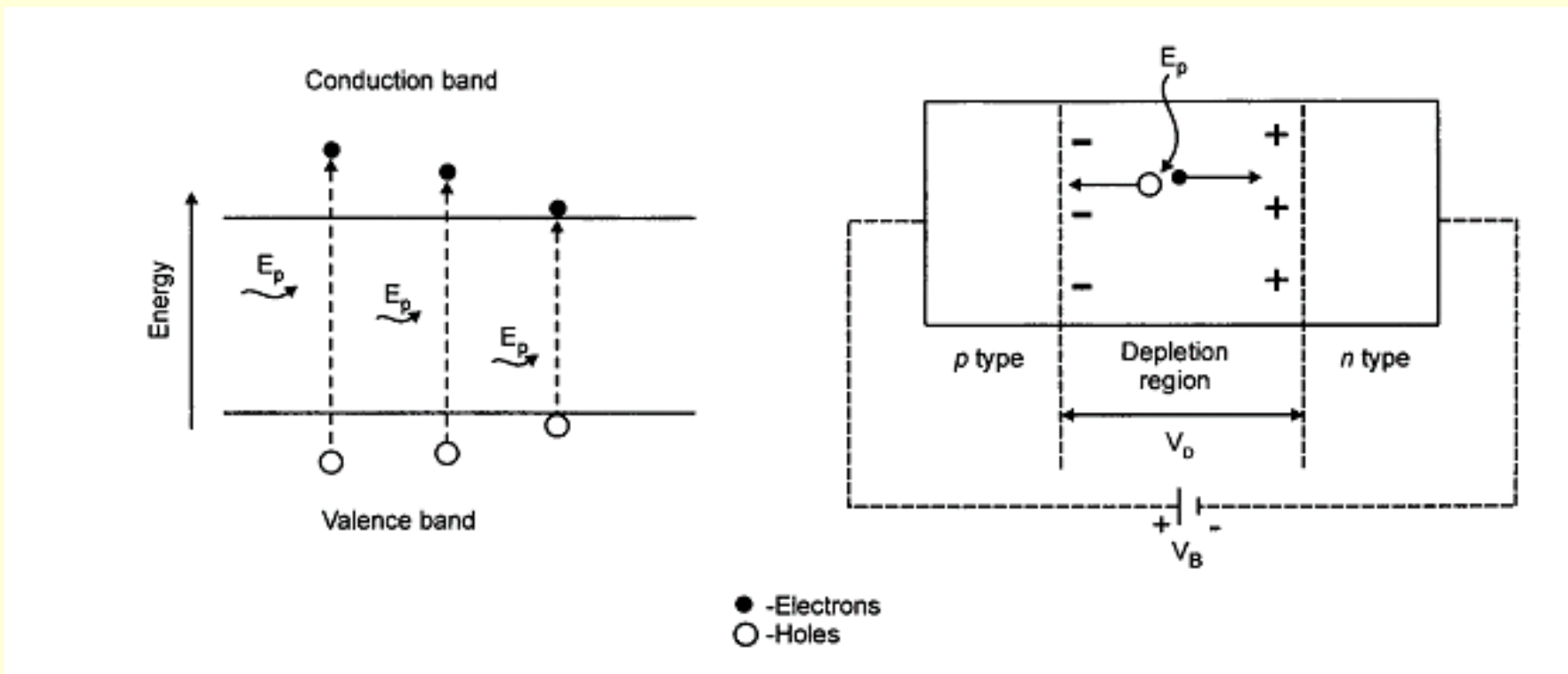
TM polarizace

R.F. Curl et al., Chemical Physics Letters 487 (2010) 1–18

Detektory

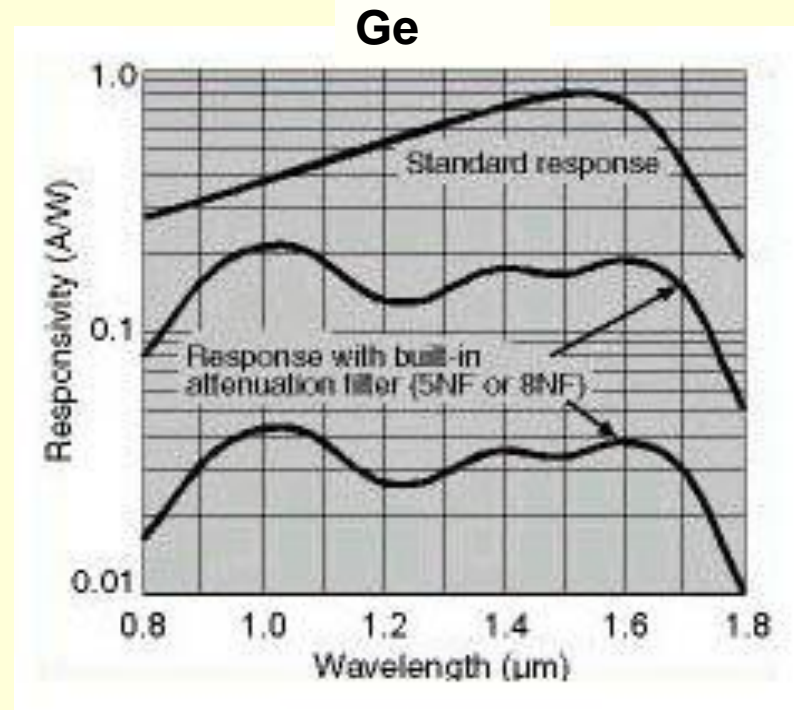
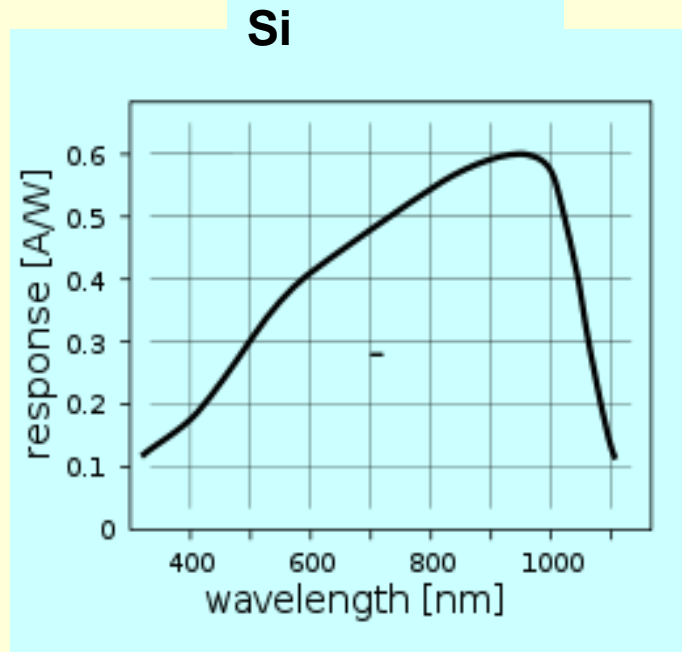
Polovodičové fotodiody (Si, Ge, InGaAs)

Tvorba páru **elektron – díra** při ozáření polovodiče , vliv připojeného vnějšího napětí



Detektory

Fotodiody (Si, Ge, InGaAs) – šum, levné, mechanicky stabilní

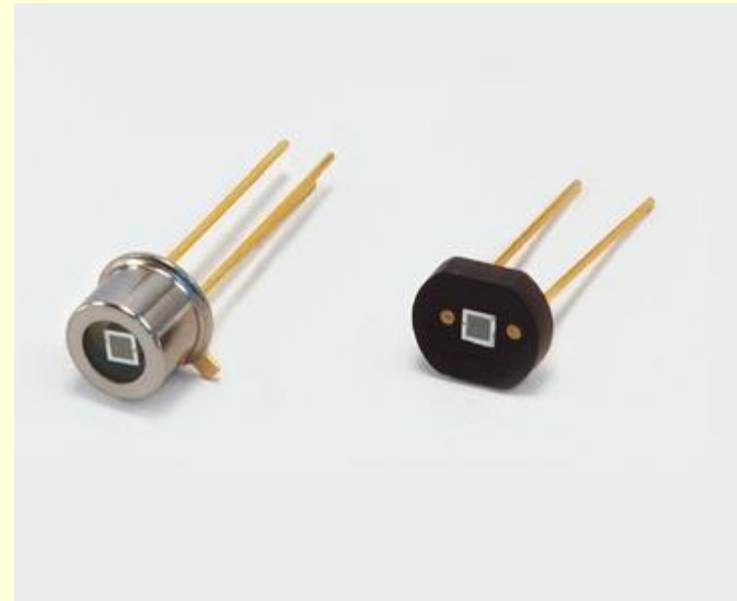
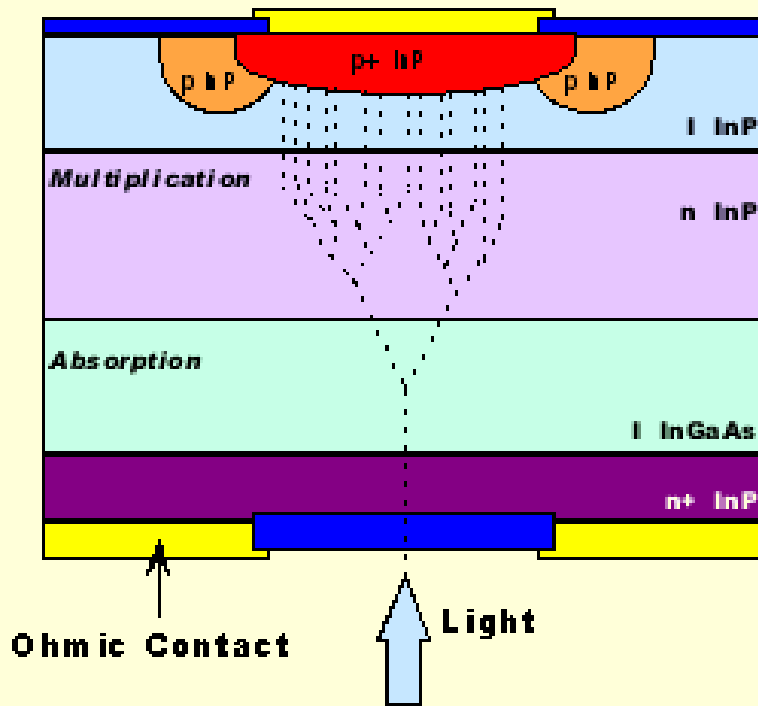


Materiál	Si	Ge	InGaAs
Rozsah λ [nm]	190-1100	400-1700	800-2600



Detektory

Lavinové fotodiody (polovodiče) – menší šum, citlivější než standardní fotodiody – zesílení 100-1000

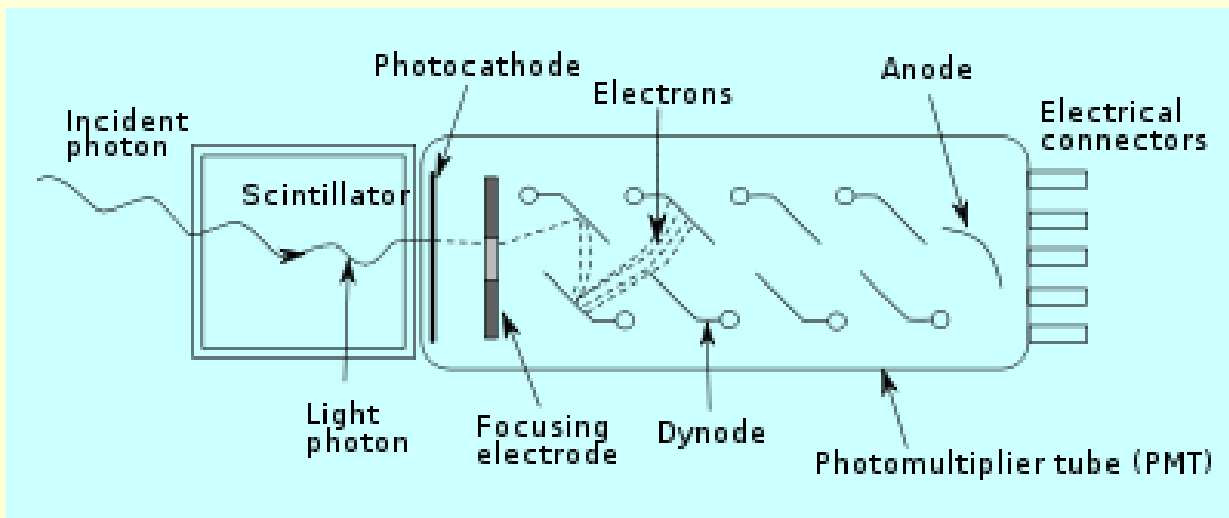


Foton způsobí tvorbu elektron-díra páru. Přiložené napětí (spád $>10^5$ V/cm) urychluje elektrony, které působí ionizaci dalších elektronů - lavinový jev.



Detektory

Fotonásobiče – vysoce citlivé, zesílení až 10^6

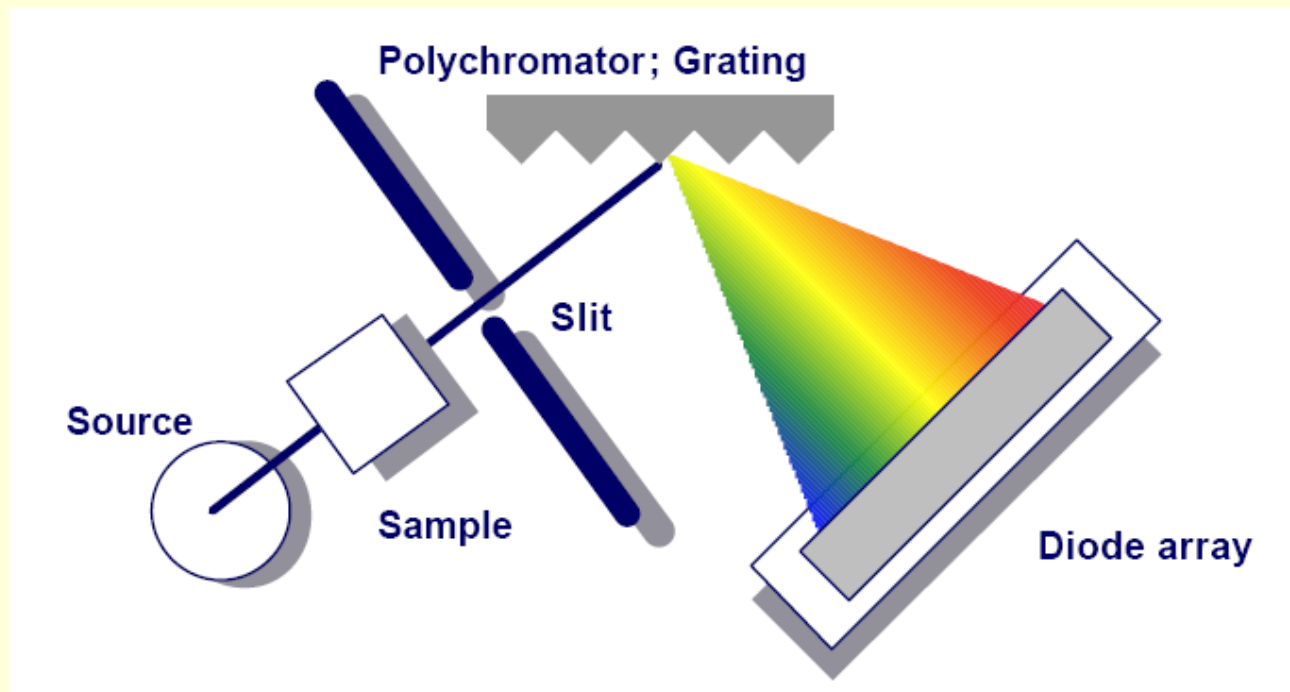


**Fotoelektrický jev
a sekundární
emise elektronů z
dynod**



Detektory

Spektrometry mřížkové s diodovými poli



**Pole fotodiod elektronicky
vyhodnocované**



Spektrometry – VIS, NIR



200-1100 nm/0,3 nm



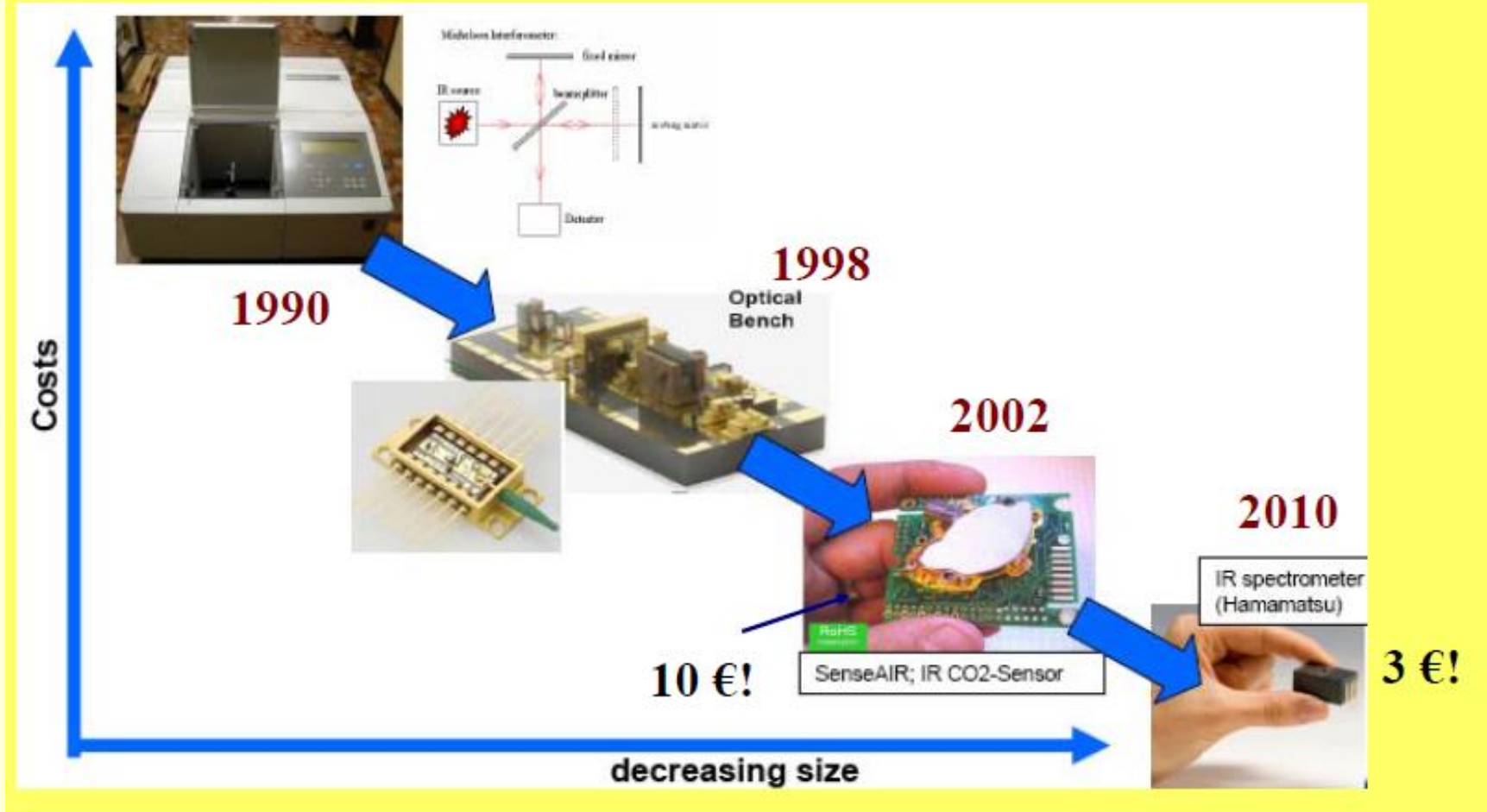
900-2100 nm (typ 256)

**Cenově dostupné, rozměrové malé, vstup
pro optická vlákna, výstup na PC**



Spektrometry – NIR, FTIR

What a progress!



Detektory

Vhodné pro kombinaci s LED : fotodiody, fototransistory, fotoodpory

Vhodné pro IČ oblast

Blízká IČ (NIR), 0.7 - 1.0 μm . – Si fotodetektory

Krátko-vlnná IČ (Short-wave IR), 1.0 - 3 μm ; InGaAs asi do 1.8 μm ; méně citlivé sloučeniny olova do 3 μm

Střední IČ (Mid IR), 3 - 5 μm ; InSb HgCdTe, PbSe

Dlouhovlnná IČ (Long-wave IR): 8 – 12 nebo 7- 14 μm ; HgCdTe a mikrobolometry

- see e.g.:

M. O'Tool, D. Diamond, Absorbance based light emitting diode optical sensors and sensing devices, *Sensors* 8, 2453-2479, 2008



Detekční prvky

Část senzoru, kde dochází k interakci světla a detekované veličiny

Optické vlnovody

- planární vlnovody,
- optická vlákna,
- optické rezonátory (WGM mikrorezonátory)
- optická kónická vlákna - tapery

Objemové optické prvky

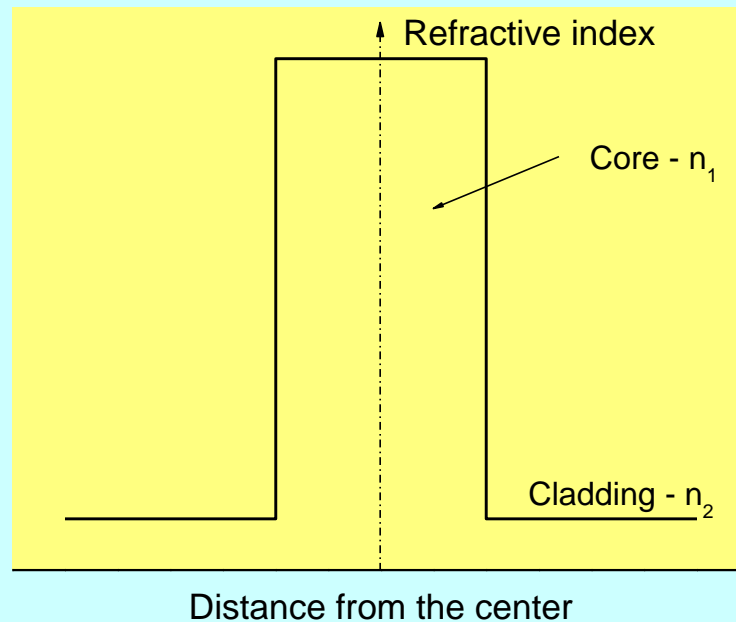
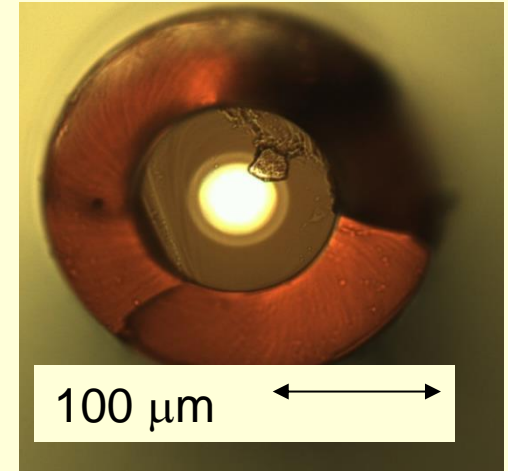
- optické hranoly
- folie, sklíčka



Vlnovody

Struktury vedoucí elektromagnetické nebo zvukové vlny.

Optické vlnovody sestávají z oblasti s vyšším indexem lomu – **jádro (core)** obklopené materiálem s nižším indexem lomu – **optický plášť (cladding)**



Optický vlnovod - Fyzika

- Přesný popis šíření světla ve vlnovodu se získá řešením **Maxwelových rovnic** **elmg. pole** pro materiál bez zdrojů náboje.

Předpoklady

- Materiál bez magnetických vlastností se skalární dielektrickou permitivitou nezávislou na intenzitě světla, harmonické časové změny pole.



Skalární vlnová rovnice (SWE) (válcový vlnovod – optické vlákno)

$$\left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + k_{rn}^2 \right) \begin{pmatrix} E_z \\ H_z \end{pmatrix} = 0$$

$$k_{rn}^2 = n(r, \varphi)^2 k^2 - \beta^2$$

r, φ - válcové souřadnice, n(r, φ) – profil indexu lomu (refractive-index profile), k=2π / λ - vlnový vektor, λ - vlnová délka, β - fázový parameter

V důsledku malých rozměrů vlnovodů jsou dovolené jen některé hodnoty β (vlastní hodnoty)

$$\beta = F(n, \text{rozměrů}, \lambda)$$

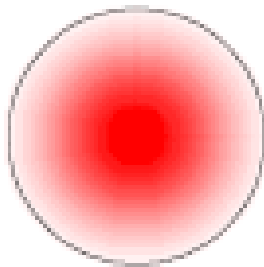


Řešení SWE

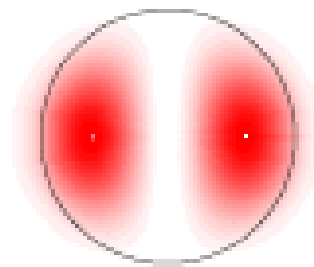
$$E_z, (H_z) = F(r, \varphi, \beta)$$

vlastní funkce („eigenfunctions“) - optické vidy („mode“) pro vlastní hodnoty („eigenvalues“) β .

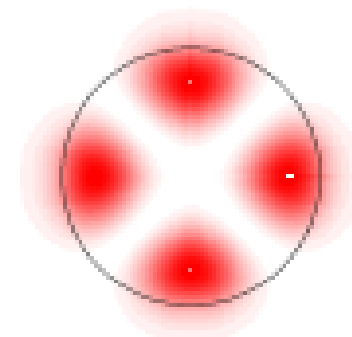
Vidy optického vlákna



LP₀₁



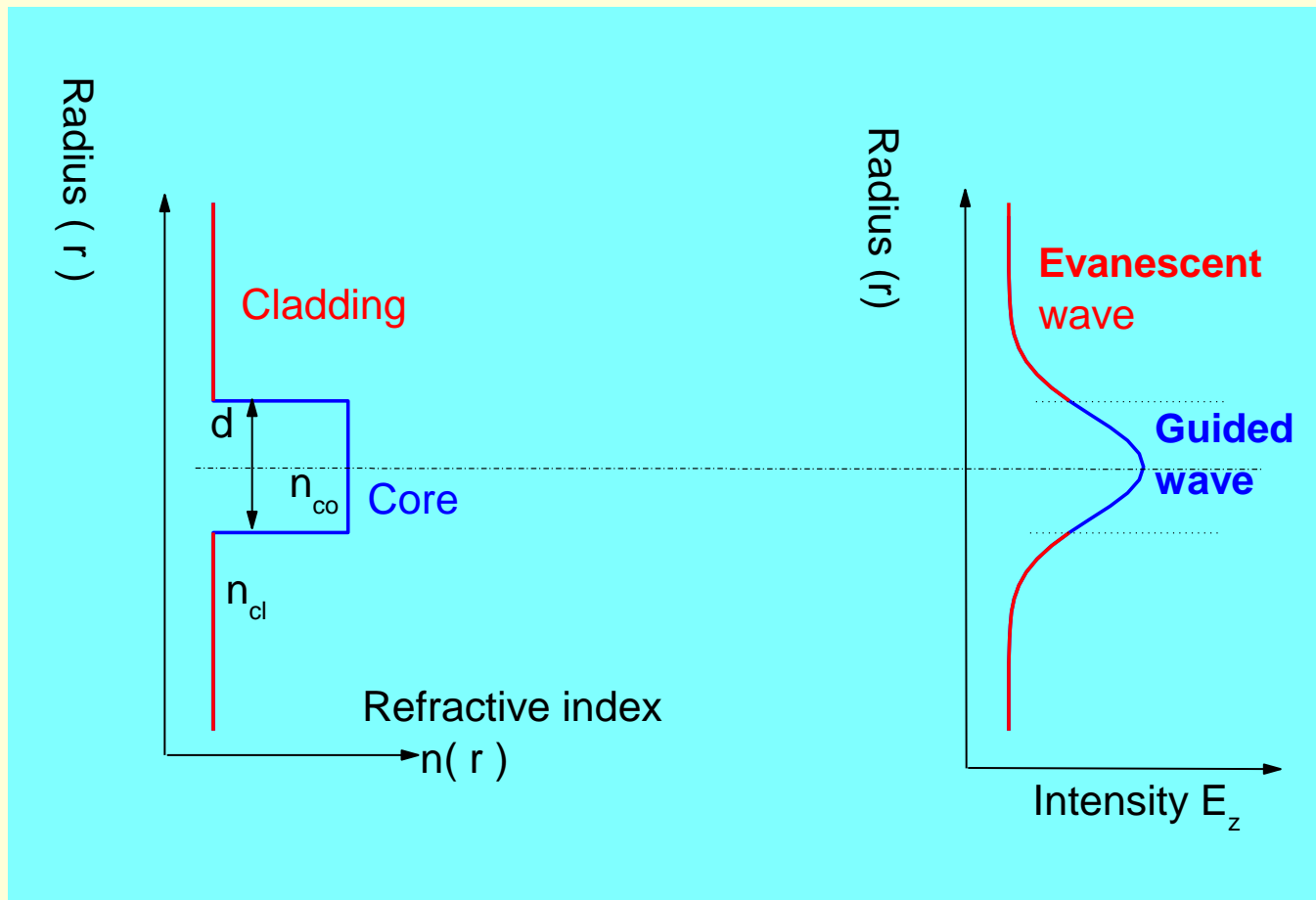
LP₁₁



LP₂₁



Základní vid – Gaussova křivka



Exponenciální pokles amplitudy vlny od hranice jádro/plášť. **Více než 99% výkonu vedeno v jádře**



Řešení SWE

- Konečný počet (N_g)
vedených vidů = vedená vlna + evanescentní vlna
 s konstantami šíření β

$$k n_2 < \beta < k n_1$$
- Vlastní funkce jsou vyjádřeny goniometrickými a exponenciálními funkcemi u planárních vlnovodů a Besselovými funkcemi u vláknových vlnovodů.

- See e.g. :

A.W. Snyder, J.D. Love, „Optical waveguide theory“, Chapman and Hall, 1987



Optické vidy

$$N_g \approx \frac{V^2}{2} = \frac{k^2 a^2}{2} NA^2 = \frac{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 a^2}{2} (n_1^2 - n_2^2)$$

a – poloměr jádra, NA - numerická apertura (definuje limitní úhel pro excitaci vedených vidů),
 V - normalizovaná frekvence

e.g. $a=50 \mu m$, $NA=0.21$, $\lambda=1 \mu m$, $N_g \approx 2200$.

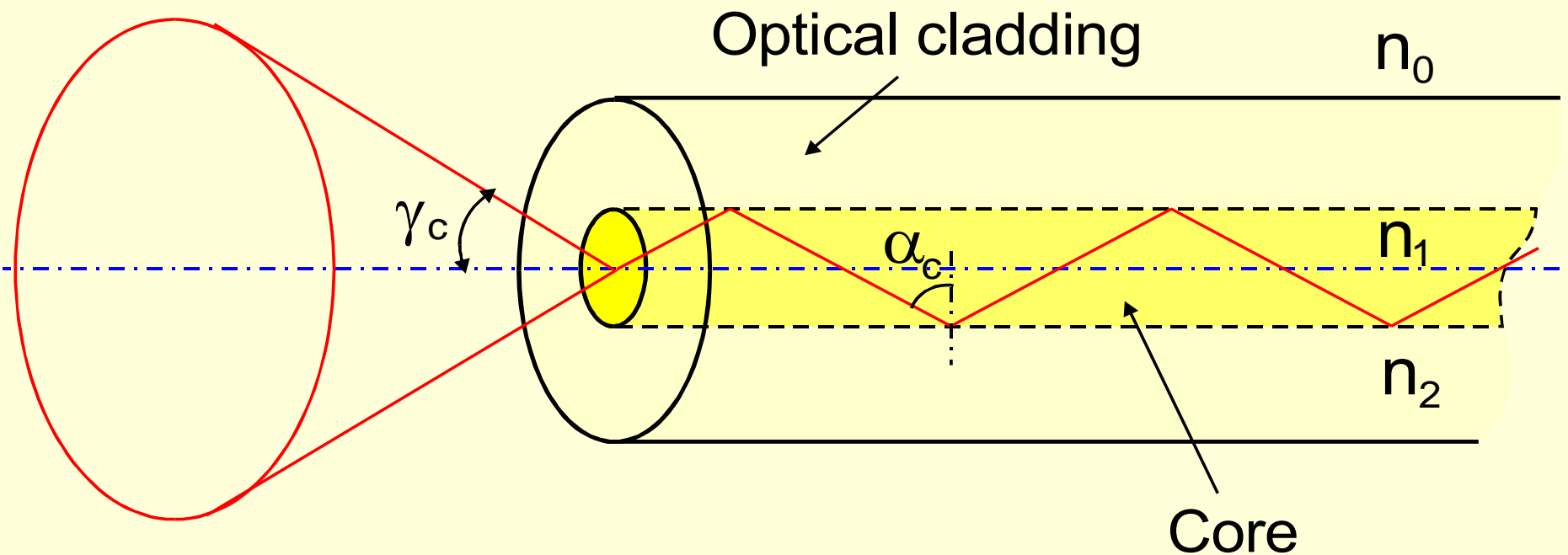
$N_g > 1$ – Mnohavidové vlnovody

$N_g = 1$ – Jednovidové vlnovody



Numerická apertura

maximální úhel pod kterým světlo navázané do jádra vlnovodu je vedeno v jádře.



$$NA = n_0 \sin \gamma_c = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Typické hodnoty NA: 0.10 – 0.5

Paprsková optika

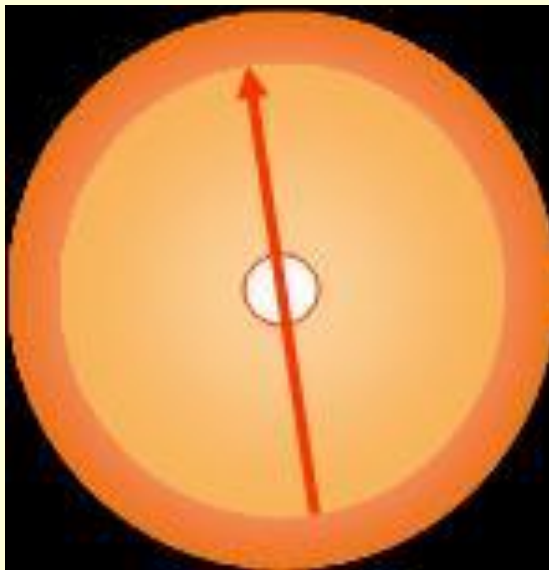
- Pro $N_g \gg 1$ and $a \gg 1$ E_z (*optický vid*) může být aproximován rovinnou vlnou, jejíž šíření je representováno optickým paprskem (mód je representován paprskem).
- V paprskové optice je vedení světla v optickém vlnovodu popsáno **úplným odrazem světla** (total reflection of light) na rozhraní jádro/plášť.



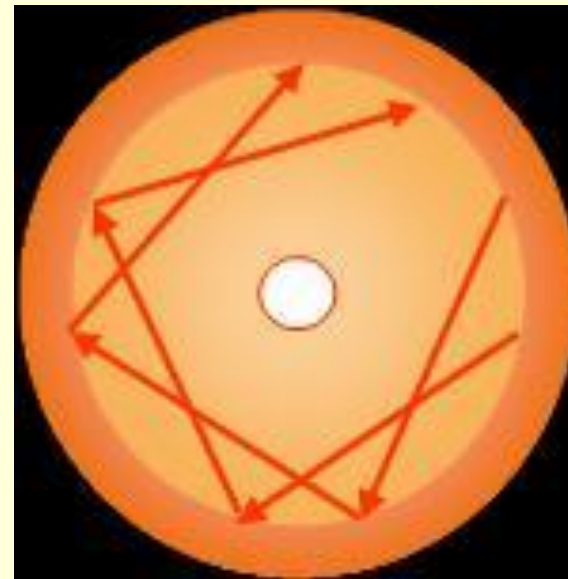
Typy optických paprsků

- Dva typy paprsků – osově (meridional) a kosé (skew); Kosé neprocházejí středem vlnovodu

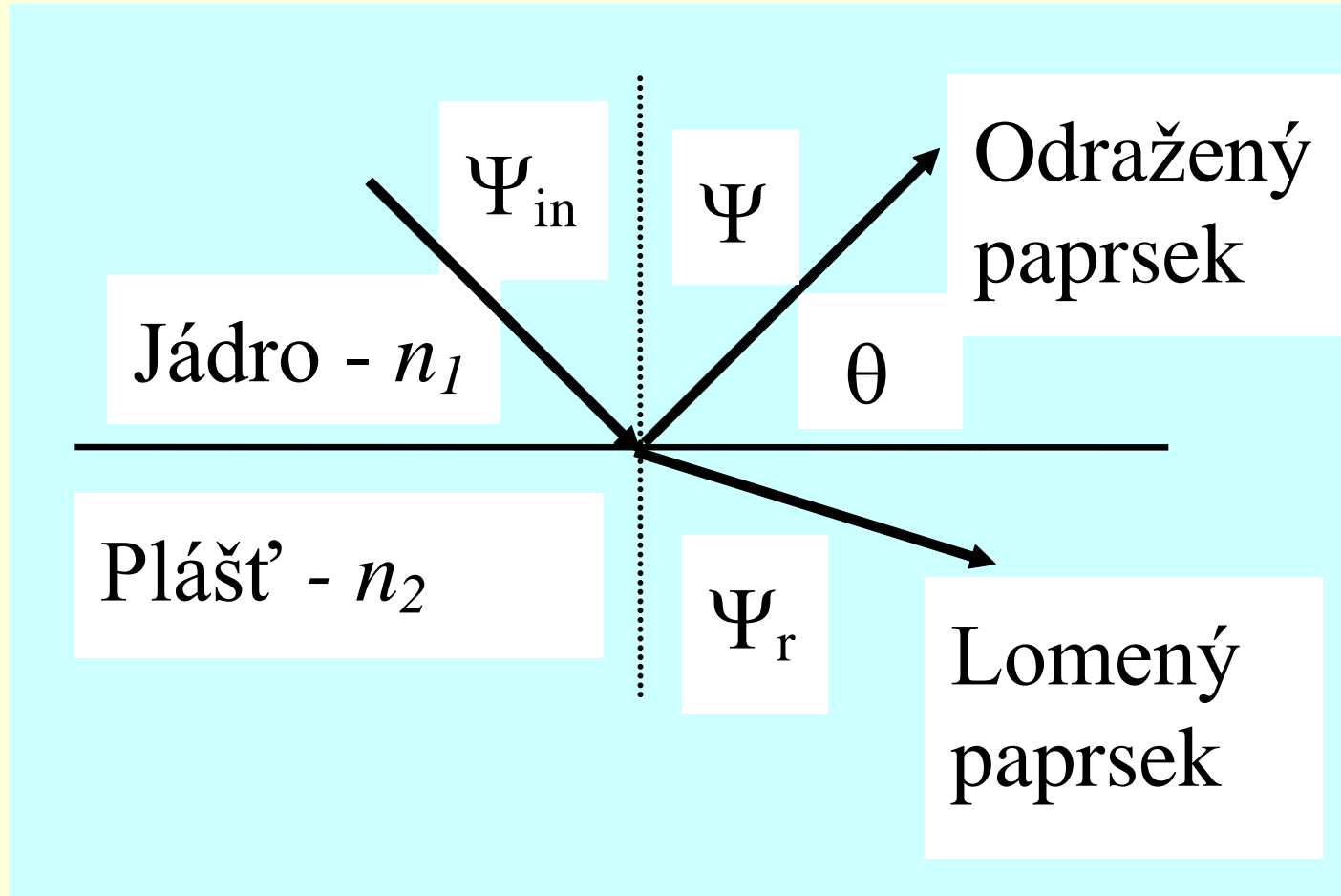
Meridional



Skew



Odraz (lom) světla



$\theta = 90 - \Psi$ – osový úhel („angle of incidence“)



Rovnice paprskové optiky

- Snellovy zákony
- Odraz: $\Psi_{in} = \Psi_r$
- Lom: $n_1 \sin \Psi_{in} = n_2 \sin \Psi_r$

- Úplný odraz – $n_2 < n_1$

$$\Psi_r = 90^\circ \Rightarrow \Psi_{in} = \Psi_c$$

$$n_1 \sin \Psi_c = n_2$$

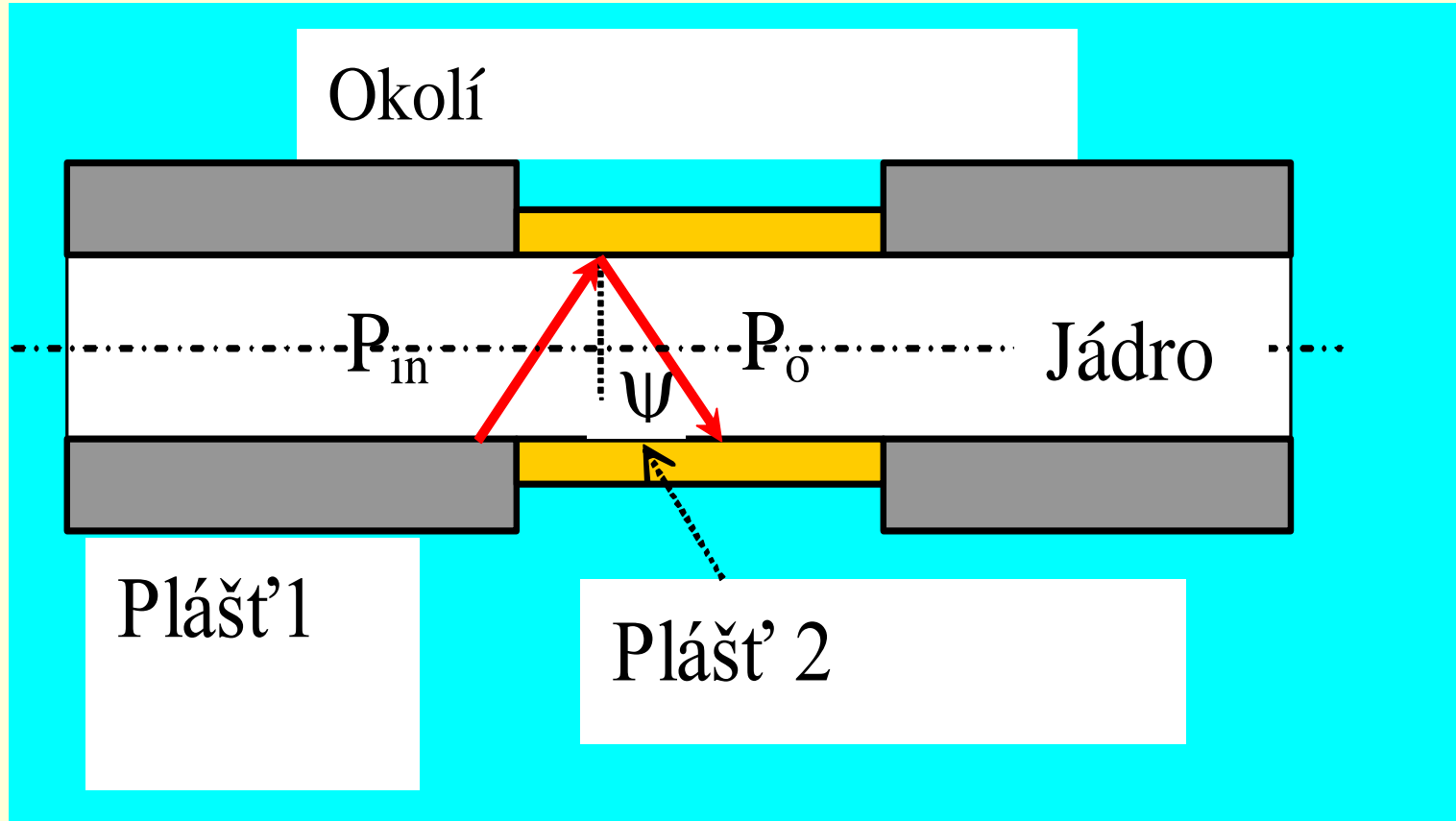
Paprsky s Ψ_{in} mezi 90° a Ψ_c jsou vedeny v jádře úplným (totálním odrazem)

$$\beta_i = n_1 \cos \theta_i$$

- Rozdělení optického výkonu mezi odražený a lomený paprsek určuje **odrazivost R** (energetický koeficient odrazu, reflexní koeficient).



Vedení světla ve vlnovodu – odrazy na rozhraní



$$P_o = P_{in} R$$

$$P = P_{vst} R^N$$

R – Odrazivost $R \leq 1$, N – počet odrazů



Odrazivost R na rozhraní: Fresnelovy vztahy

$$\Gamma^{(TE)} = \frac{\sqrt{1 - \sin^2 \Psi} - \sqrt{1 - \sin^2 \Psi} \frac{\varepsilon_1 \mu_1}{\varepsilon_2 \mu_2} \sqrt{\frac{\varepsilon_2 \mu_1}{\varepsilon_1 \mu_2}}}{\sqrt{1 - \sin^2 \Psi} + \sqrt{1 - \sin^2 \Psi} \frac{\varepsilon_1 \mu_1}{\varepsilon_2 \mu_2} \sqrt{\frac{\varepsilon_2 \mu_1}{\varepsilon_1 \mu_2}}}$$

$$\Gamma^{(TM)} = \frac{\sqrt{1 - \sin^2 \Psi} - \sqrt{1 - \sin^2 \Psi} \frac{\varepsilon_1 \mu_1}{\varepsilon_2 \mu_2} \sqrt{\frac{\varepsilon_1 \mu_2}{\varepsilon_2 \mu_1}}}{\sqrt{1 - \sin^2 \Psi} + \sqrt{1 - \sin^2 \Psi} \frac{\varepsilon_1 \mu_1}{\varepsilon_2 \mu_2} \sqrt{\frac{\varepsilon_1 \mu_2}{\varepsilon_2 \mu_1}}}$$

$\mu_1 = \mu_2$, - magnetická permeabilita (stejná u látek skelných),
 ε - elektrická permitivita

$$n^2 = \varepsilon \mu$$

Γ je intenzitní koeficient odrazu (komplexní číslo). Platí

$$R = |\Gamma|^2$$

Odrazivost závisí na polarizaci světla – U nepolarizovaného světla:

$$R = \frac{1}{2} (R^{TE} + R^{TM})$$



Odraz na rozhraní, vliv ztrát materiálu

Pro prostředí s optickými ztrátami s zavádí index lomu jako komplexní číslo

$$n = n_r + i n_i$$

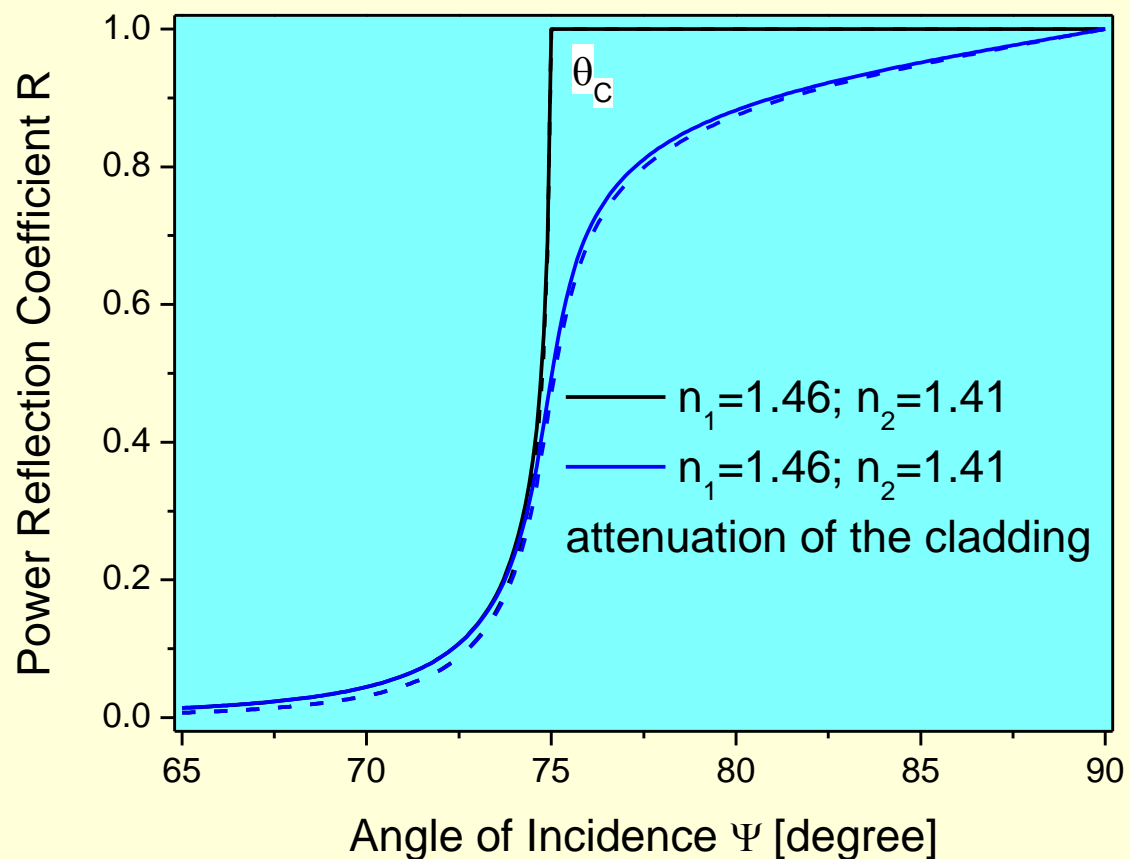
n_r je reálná část indexu lomu

n_i je imaginární část indexu lomu související s optickými ztrátami ε vztahem

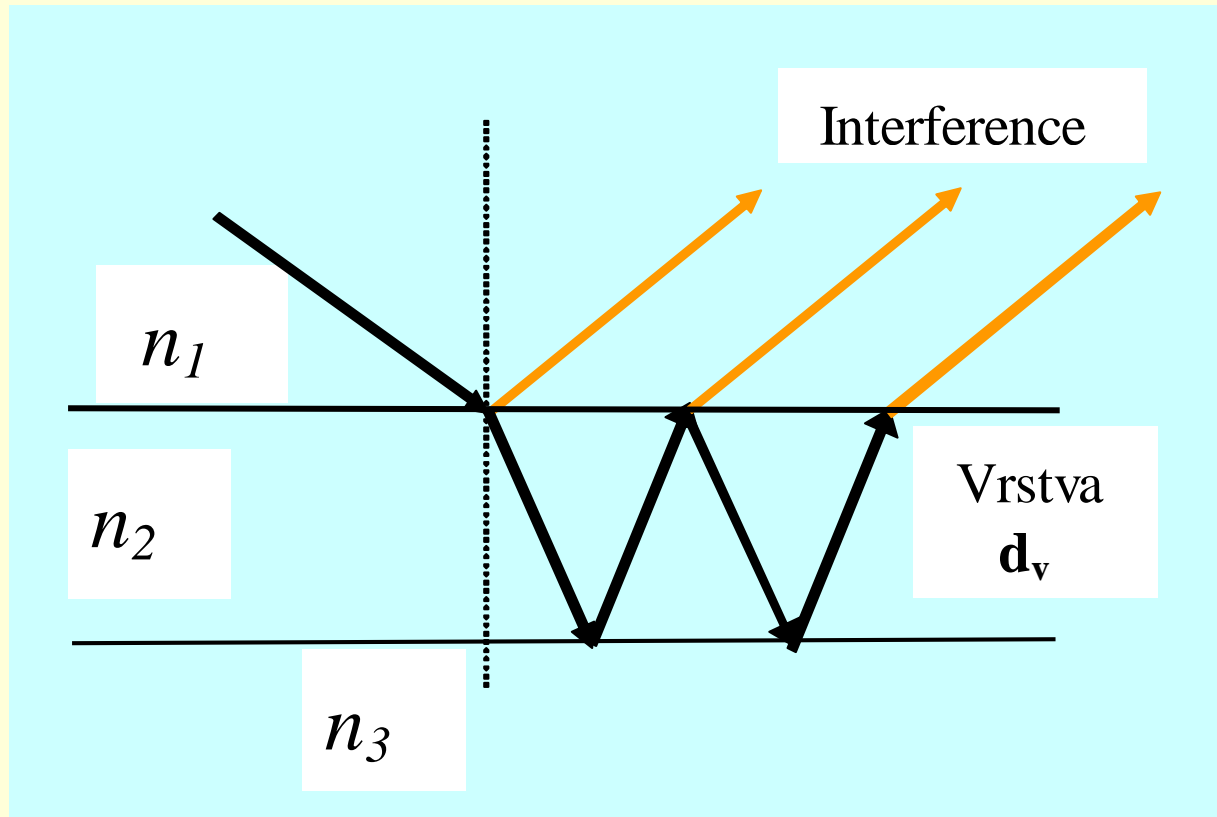
$$\varepsilon = \frac{4\pi}{\lambda} n_i$$



Odrazivost R na rozhraní TE a TM polarizace



Odraz světla na vrstvě



Odrazivost na vrstvě je výsledkem interference světla

Vrstva – tloušťka $\sim \lambda$; Rozhraní – tloušťka $\gg \lambda$



Odraz světla na vrstvě

$$R_{\text{vrstva}} = \frac{R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos\left(\frac{4\pi n_2 d_v}{\lambda}\right)}{1 + R_1 R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos\left(\frac{4\pi n_2 d_v}{\lambda}\right)}$$

Předpoklady: vrstva bez ztrát, kolmý dopad na rozhraní 1-2 ($\Psi=0^\circ$), tloušťka d_v , index lomu n_2 .

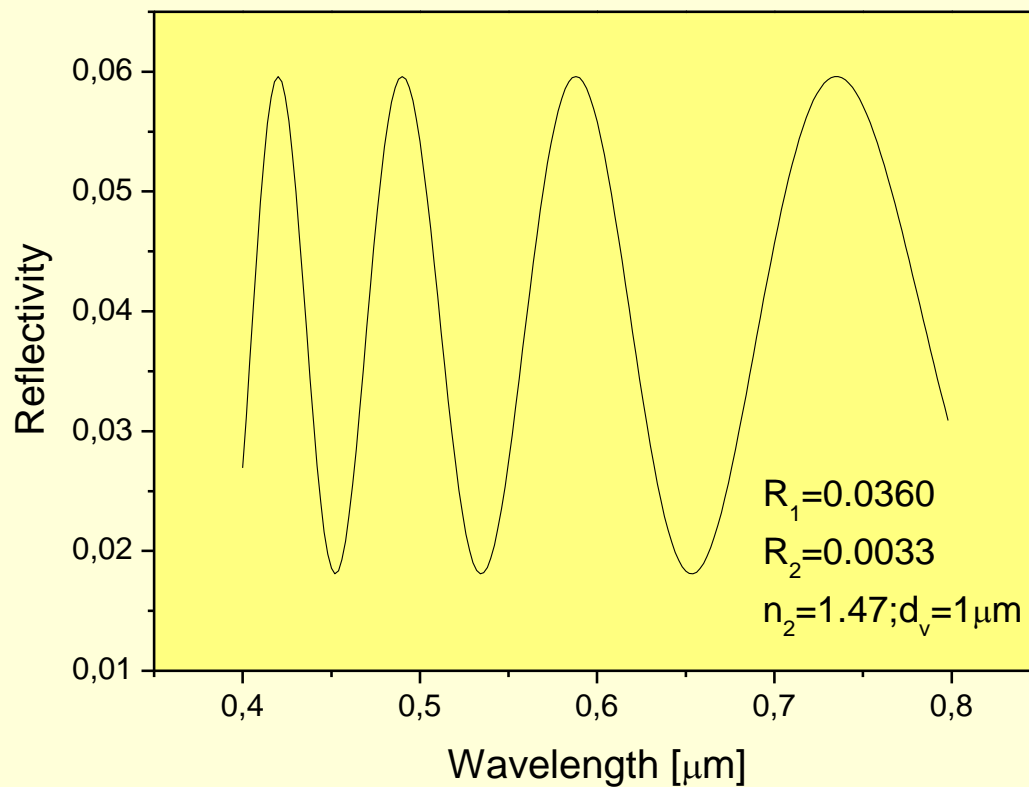
R_1, R_2 – odrazivosti na rozhraních prostředí 1-2 a 2-3..

Pro složitější struktury se používá maticová metoda:

Viz např. A.Thelen, “Design of optical interference coatings”, Ed. McGraw-Hill, 1989, p.5-17.



Odraz světla na vrstvě



Modulace odrazivosti na vrstvě (org. látka na vodě)



Výkon přenesený optickým paprskem

$$P_{iout} = P_{i0} R(\Psi_i, n, \varepsilon)^{N_i}$$

P_{iout} je optický výkon přenesený paprskem i

P_{i0} je optický výkon navázaný do paprsku i

N_i je počet odrazů paprsku i na rozhraní

n reprezentuje indexy lomu na rozhraní jádro plášť, tj. n_1 a n_2

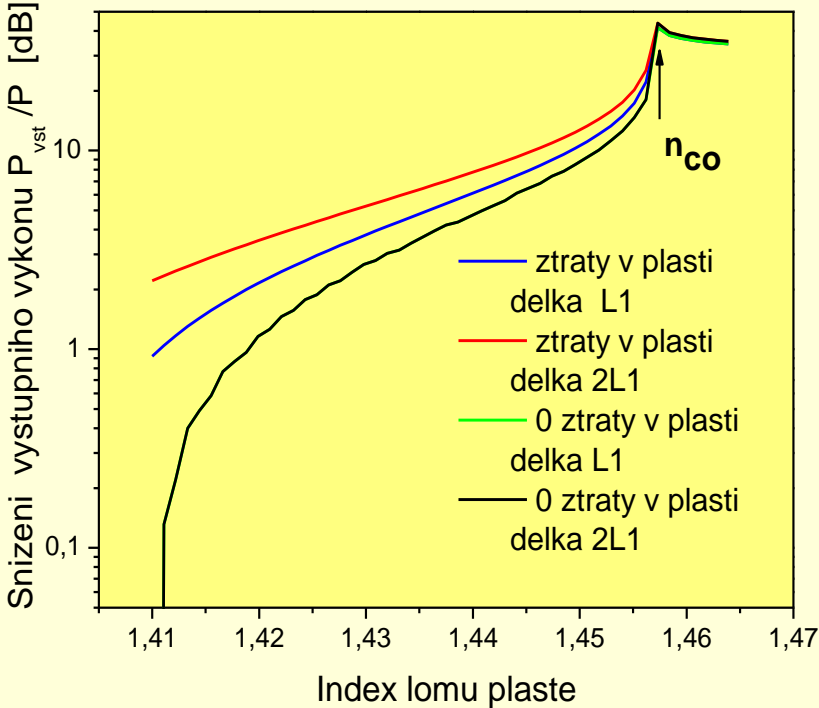
ε je objemový absorpční koeficient v plášti

$$P_{iout} \approx P_{i0} \exp(-\gamma(\Psi_i, n)\varepsilon L)$$

L je délka vlnovodu, γ - podíl světla přeneseného paprskem i v plášti vlnovodu < 1



Křivky přeneseného optického výkonu pro mnohavidový vlnovod

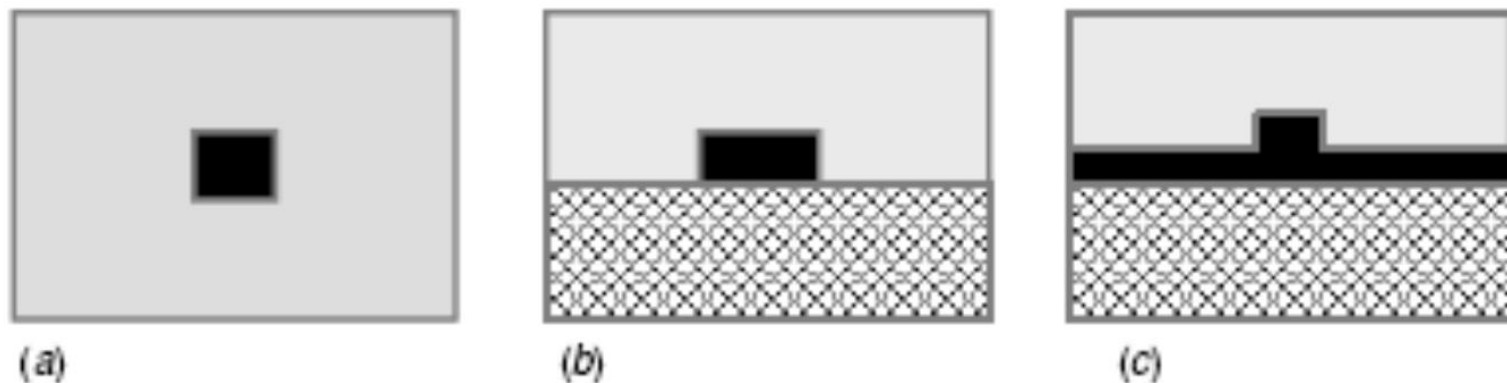


Obrázek platí pro homogenní excitaci, tj. P_{vst} na počátku vlnovodu je stejné pro všechny paprsky a tloušťku pláště $\gg \lambda$

Viz: A.W. Snyder, J.D. Love, Optical waveguide theory, Chapman and Hall, 1987



Planární vlnovody

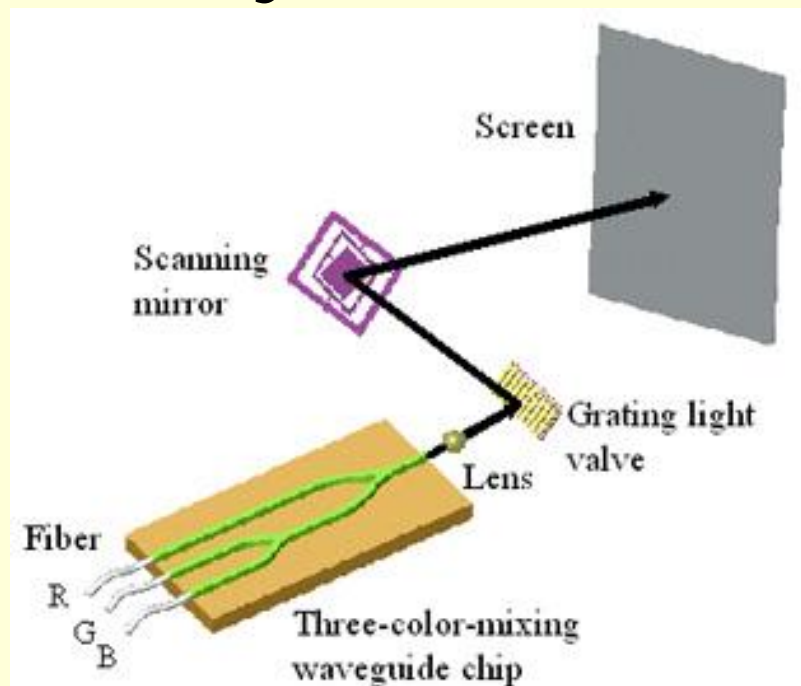
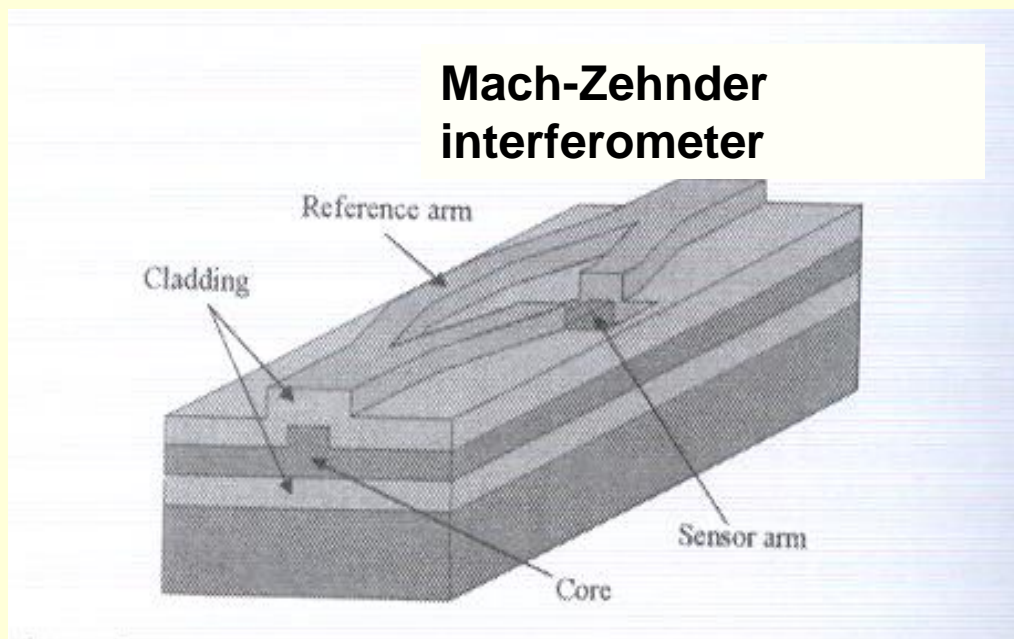


a) Vnořený (embedded); b) kanálkový (raised strip); c) kanálkový (strip)

Připravovány iontovou výměnou ve skle (VŠCHT Praha), metodami přípravy polovodičových struktur z plynné fáze, nanášením tenkých vrstev z roztoku s vytvářením mikrostruktur litografickými metodami



Planární vlnovody

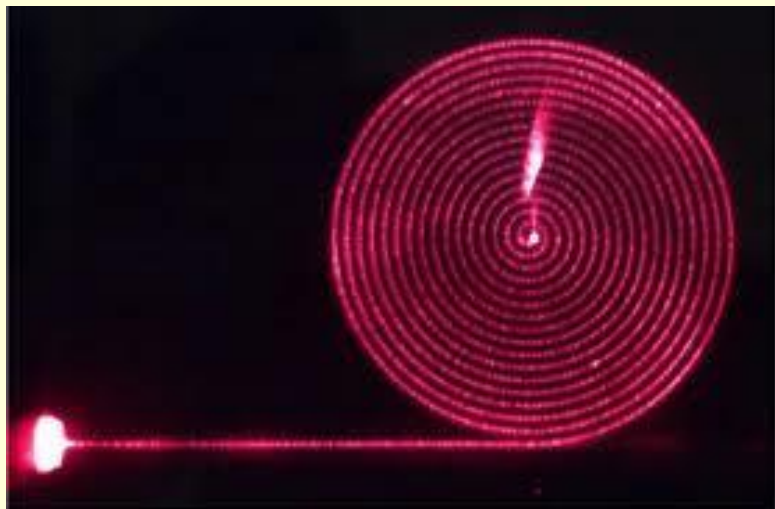


Kombinace svazků

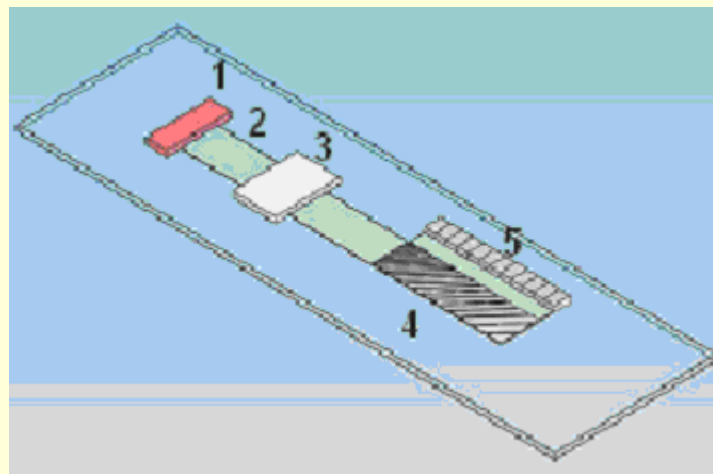
Útlum ~ dB/cm, mechanicky stabilní, ale dražší,
komplikovanější navázání a vyvázání optického signálu



Planární vlnovody



Spirální planární vlnovod

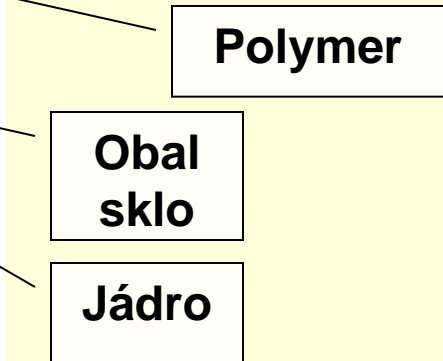
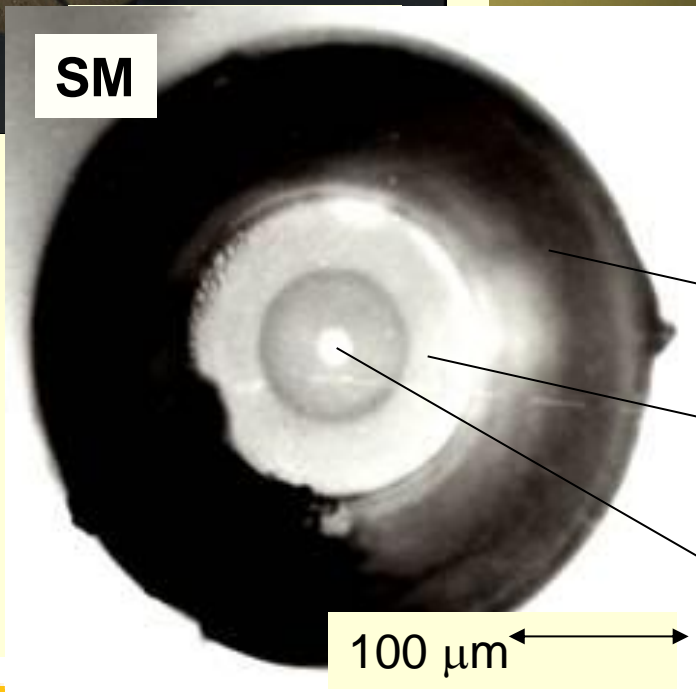
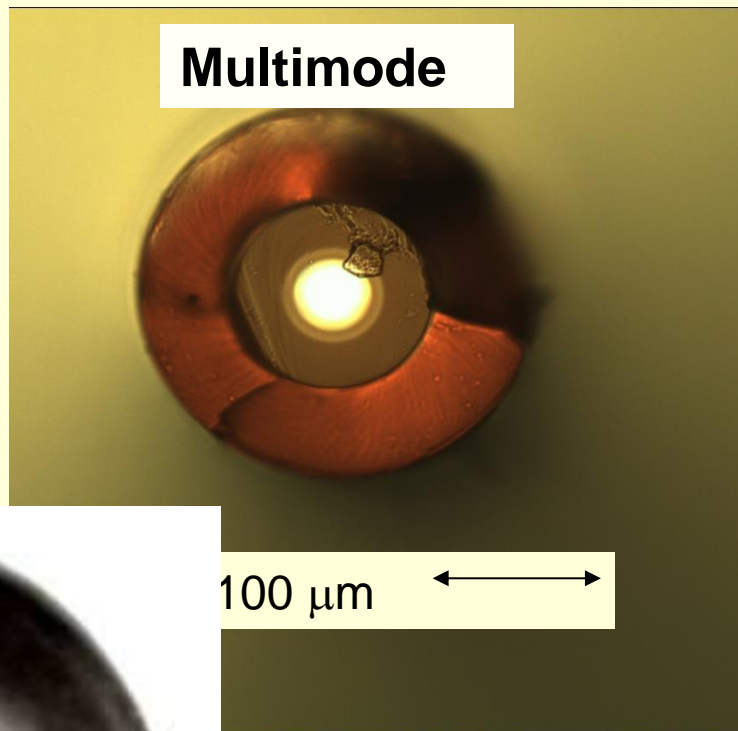
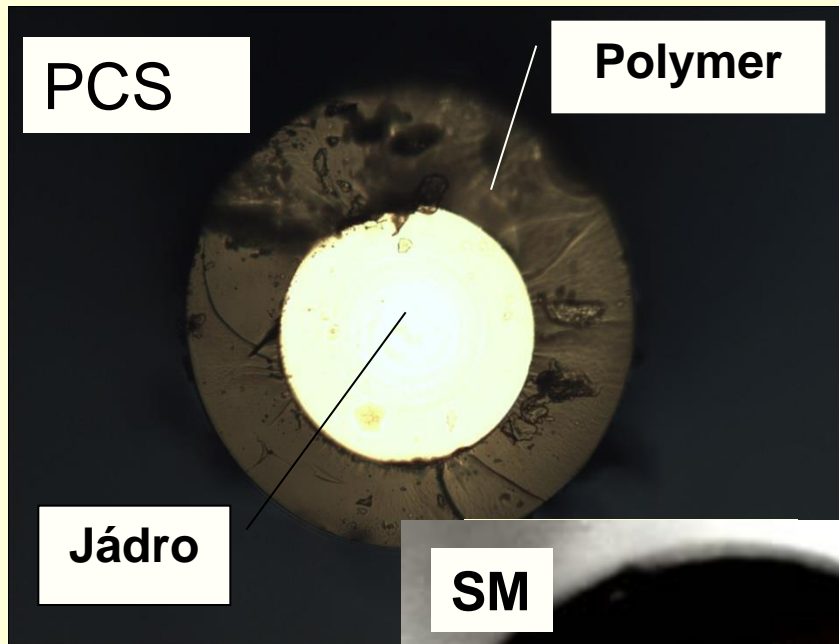


Optical integration- (1) LED; (2) planar waveguide; (3) detection site; (4) spectrometer; (5) optical grating

- For a review on IO-sensors see e.g.:
 Integrated optical sensors for chemical domain, Lambeck P.V.,
Measurement Science Technol. (2006), 17, R93-R116



Optická vlákna

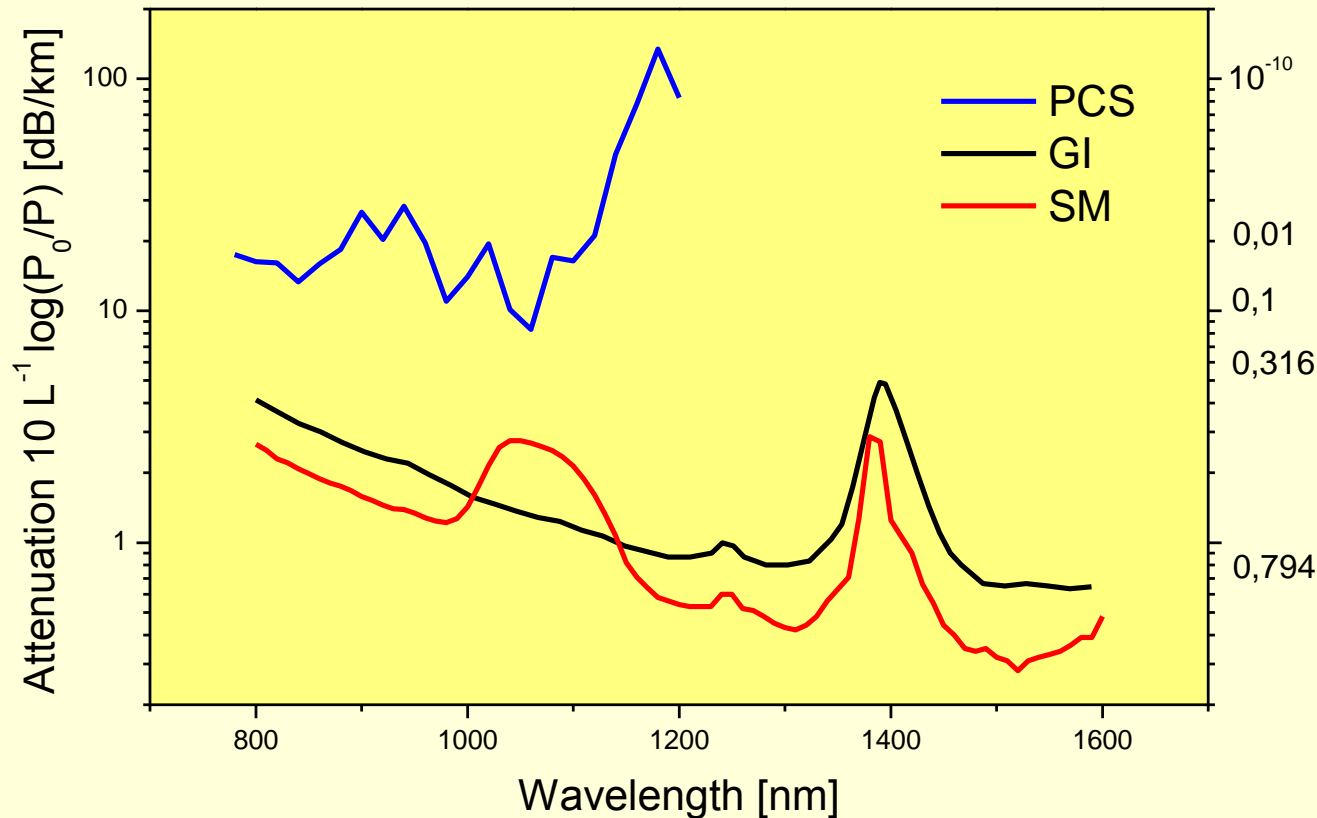


PCS –
Polymer Clad
Silica

SM – Single
Mode



Útlum vláken

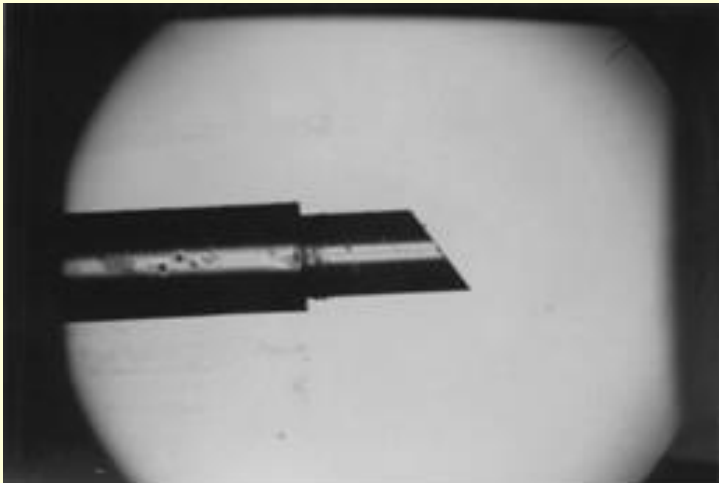


V senzorech obvykle používána PCS vlákna nebo polymerní vlákna se strukturou podobnou PCS vláknům
- laciná, polymer lze jednoduše sejmout a odkrýt tak jádro,

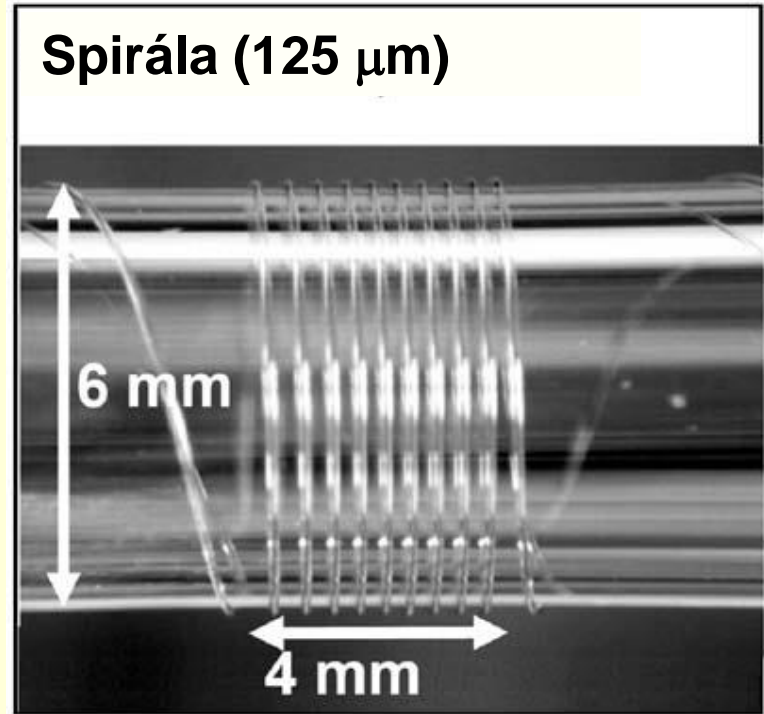


Optická vlákna zbroušená a navinutá

Šikmé vlákno



Spirála (125 μm)



- For a review on fiber-optic sensors see e.g.:
Fiber-Optic Sensors, D. A. Jackson; J. D. C. Jones, *Journal of Modern Optics*, 1362-3044, Volume 33, Issue 12, 1986, Pages 1469 – 1503

Optická vlákna pro senzory - materiál

- **200 – 2000 nm**
 - vlákna křemenná nebo dopovaného křemene ($n_1 = 1,46-1,48$); telekomunikační vlákna PCS, (SM, mnohavidová vlákna jen ve speciálních případech)
 - Vlákna z optických skel (např. Schott F2, $n_1 = 1,5$)
 - Vlákna polymerní (PMMA, $n_1 = 1,6$) větší flexibilita než u vláken skleněných, nižší cena, menší chemická odolnost, vyšší útlum než u PCS
- **2000 – 10000 nm**
 - Vlákna chalkogenidová (AsS, AsSe) , fluoridová (fluoridy Zr, Al, La, Ga), ale zejména z halogenidů stříbra (AgCl, AgBr) – větší útlum, vyšší cena

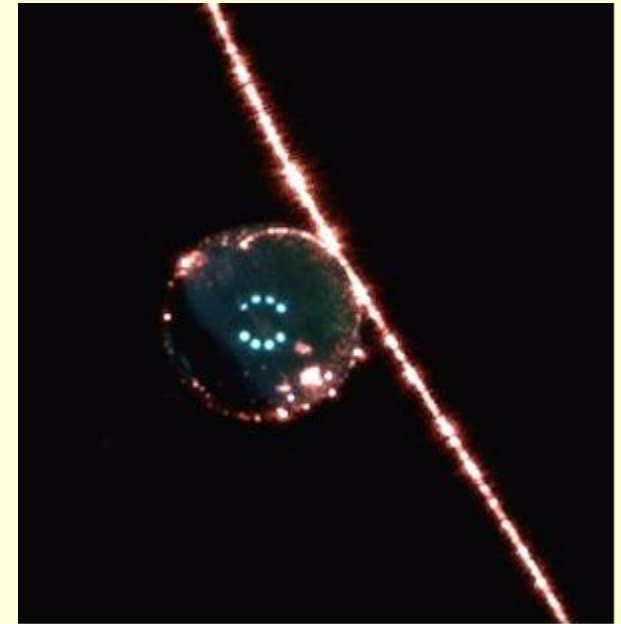
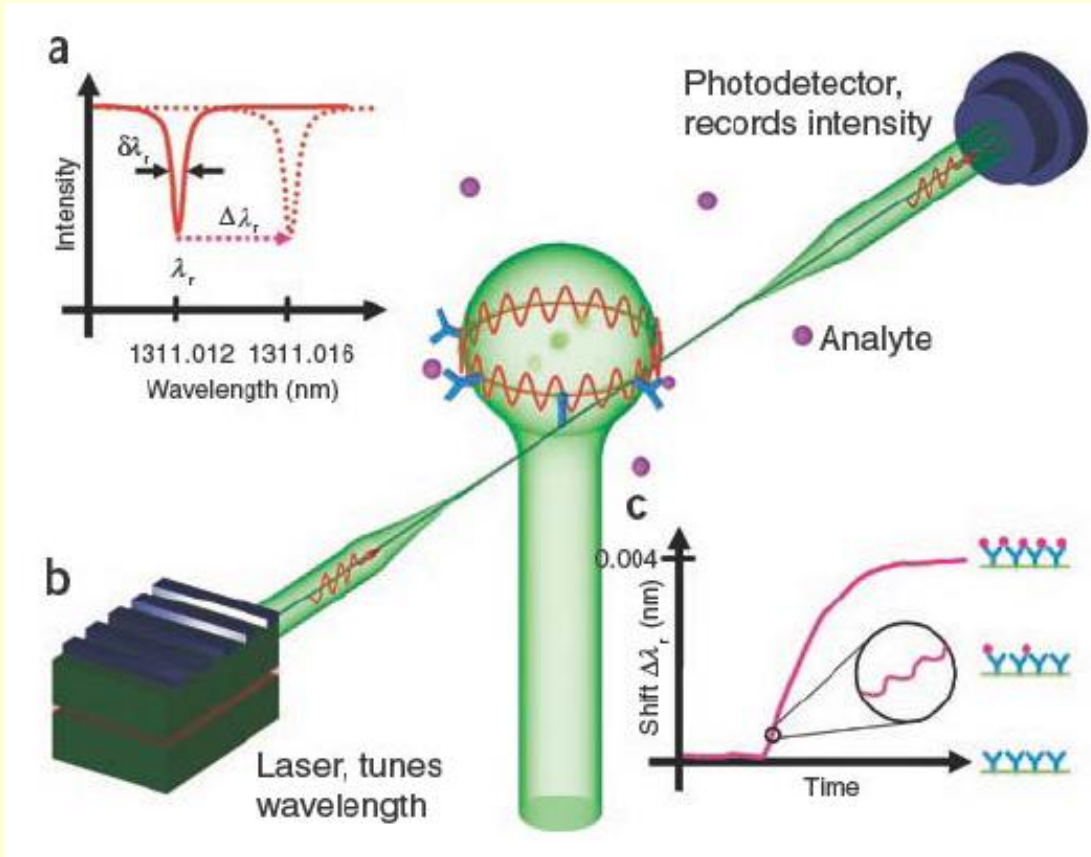


Optická vlákna

- Dostupná lépe než planární vlnovody – vlákna telekomunikační, tj. PCS, jednovidová i mnohavidová vlákna, vlákna polymerní
- Útlumy jsou nižší než u planárních vlnovodů (dB/km pro vlákna oproti dB/cm).
- Obvykle i ceny jsou nižší
- Mechanická stabilita vláken může být nižší než u planárních vlnovodů v důsledků malých průměrů



WGM mikroresonátory

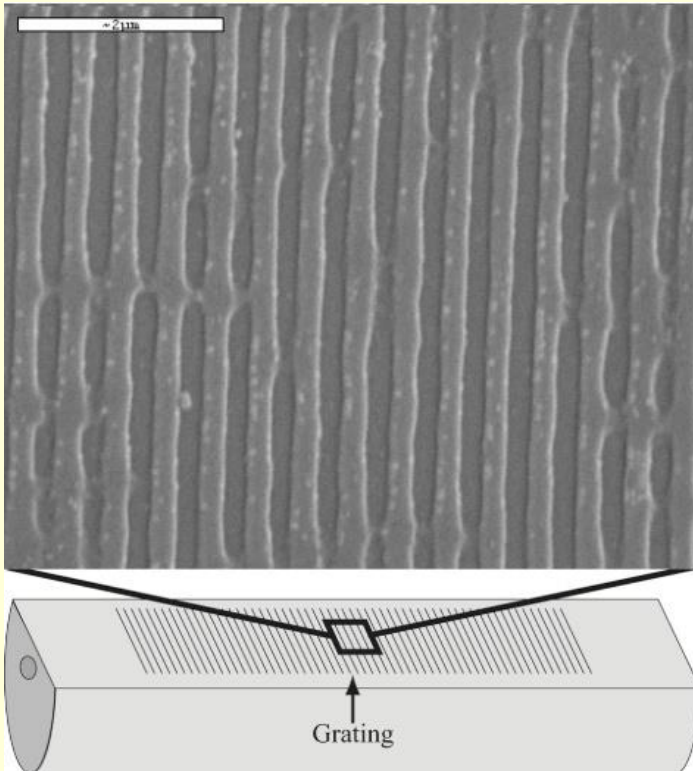


WGM – whispering gallery mode (mody šeptající galerie)

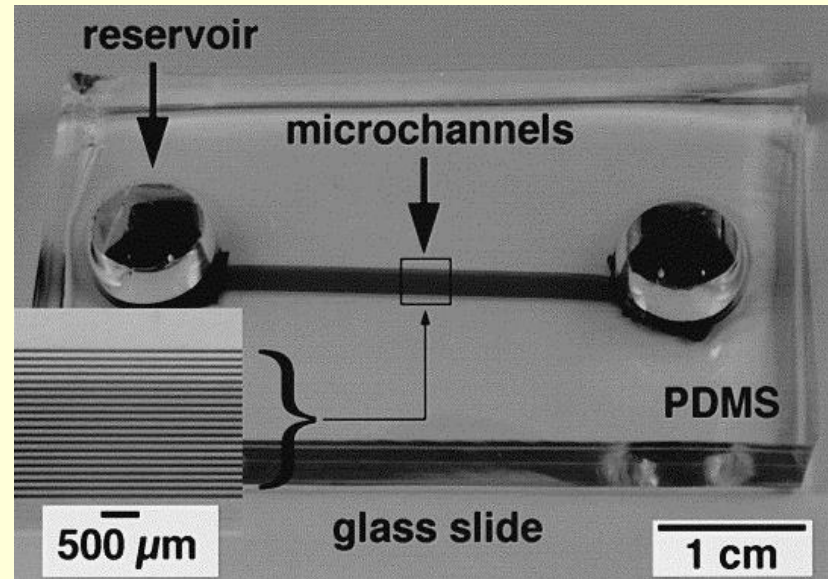


SPECIALNI DETEKČNÍ PRVKY

Optické mřížky



**Braggovská mřížka
v D vláknu**

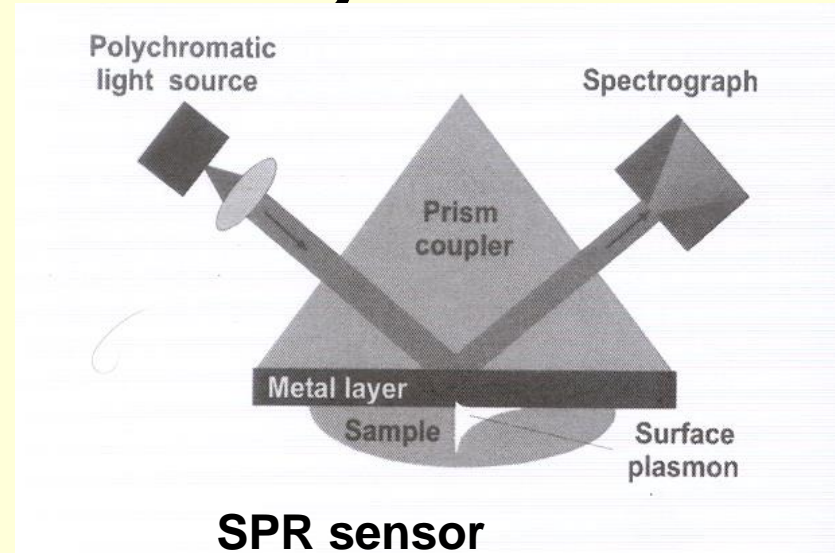
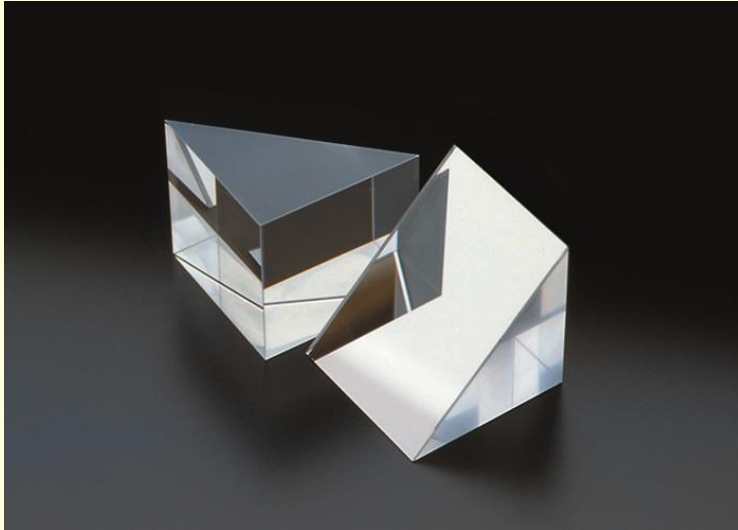


**Difrakční mřížka tvořená
mikrokanálky v PDMS**

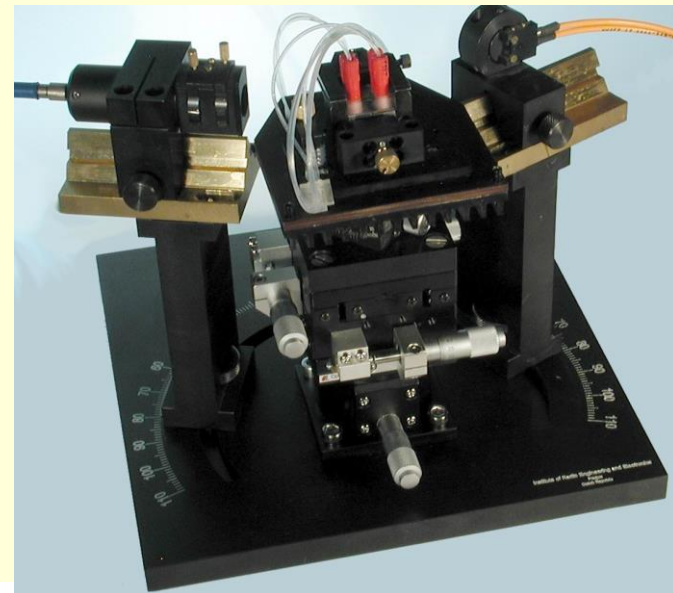


OBJEMOVÉ DETEKČNÍ PRVKY

Optické hranoly

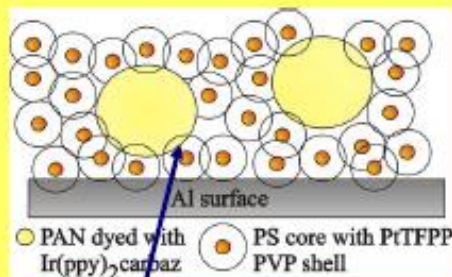


**Optická excitace
oscilací volných
elektronů v kovové
vrstvě (Au, Ag, Cu, Al).**

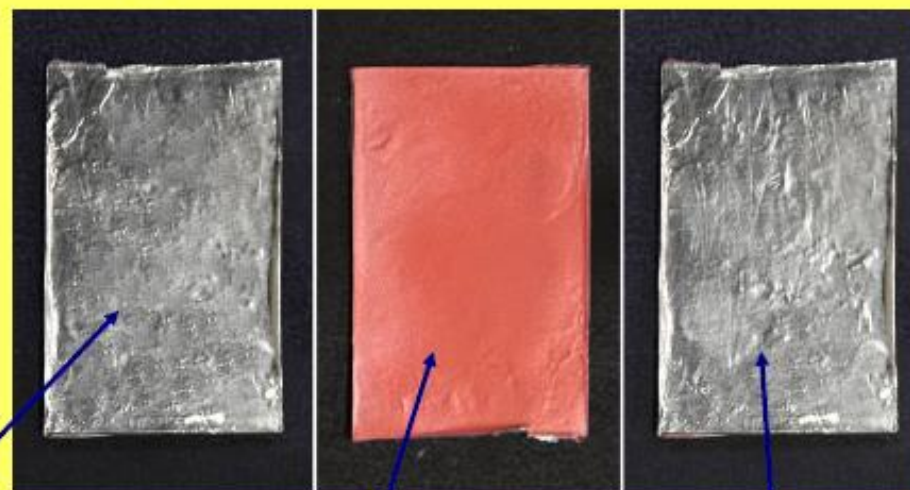


Optické folie

Water-based sprayable paints for simultaneous sensing pressure and temperature on aircrafts



Paint for pressure and T



blank surface

surface covered with red paint

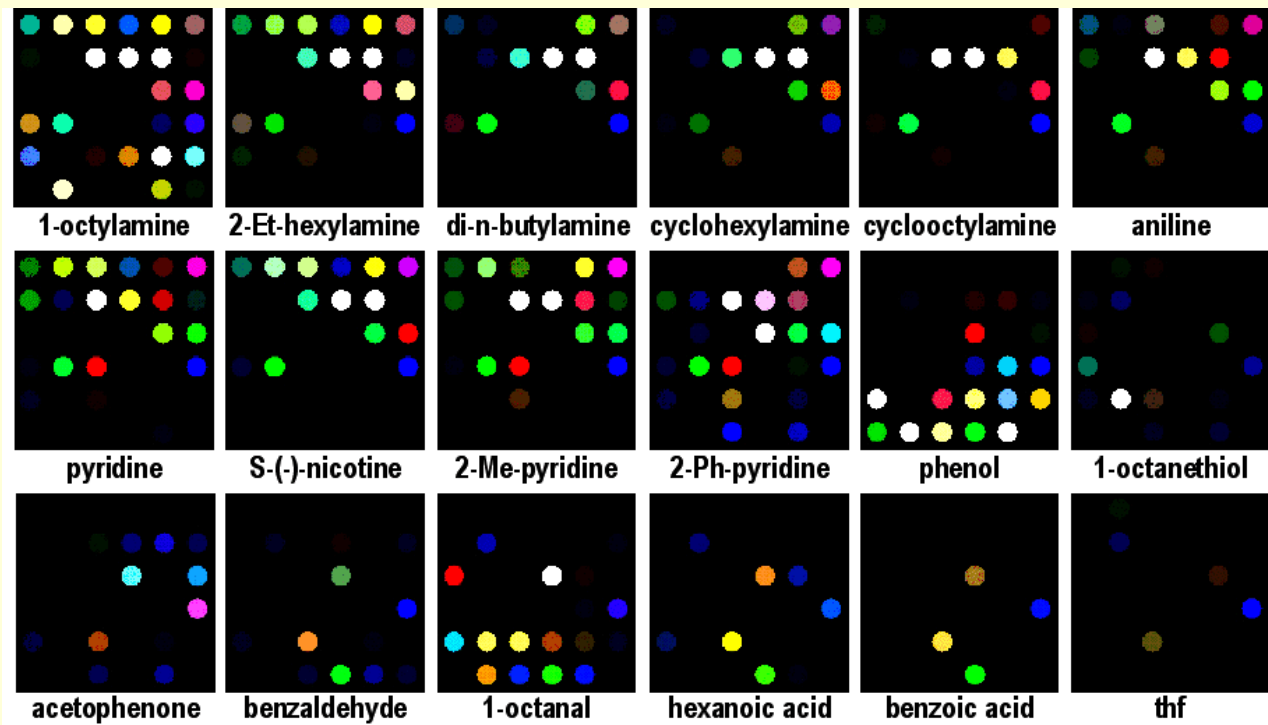
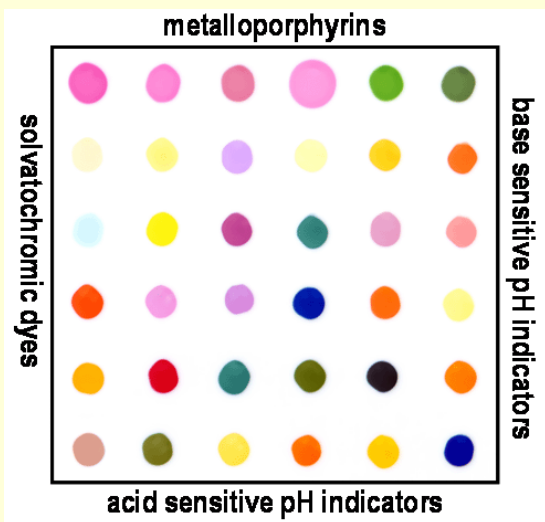
paint removed with water

L. H. Fischer, S. M. Borisov, I. Klimant, O. S. Wolfbeis,
Analyst, (2010), in press). DOI: 10.1039/B927255K (highlight article)

OBJEMOVÉ DETEKČNÍ PRVKY



Mikroskopická skla



Obvykle fluorescenční indikátory

Vyhodnocení mikroskopické, nebo pomocí svazku vláken

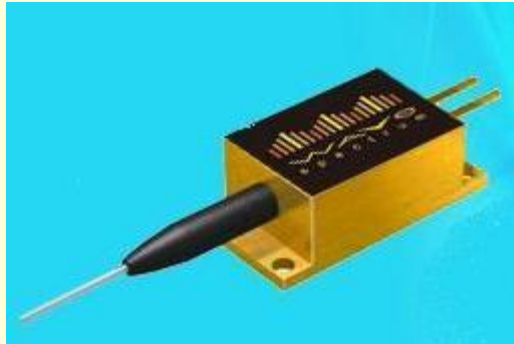


DOPLŇKOVÉ OPTICKÉ PRVKY

Spojování: konektory, konektorovaná vlákna



Navazování světla: vlnovody, LED, LD



Optické změny v detekčním místě senzoru

Detekované látky

Index lomu

Plyny – $n \sim 1$

Voda - $n \sim 1,33$; Etanol - $n \sim 1,37$

Silikonové polymery, fluorované akryláty $n \sim 1,4$

Křemenné sklo – $n \sim 1,46$

Toluen - $n \sim 1,5$

PMMA - $n \sim 1,49$, PVC – $n \sim 1,54-1,56$

Optické sklo F2 – $n \sim 1,51$

Histidin – $n=1,7$

$$R_M = \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \frac{M}{\rho}$$

R_M – molární refrakce, M – molární hmotnost, ρ - hustota



Změny indexu lomu

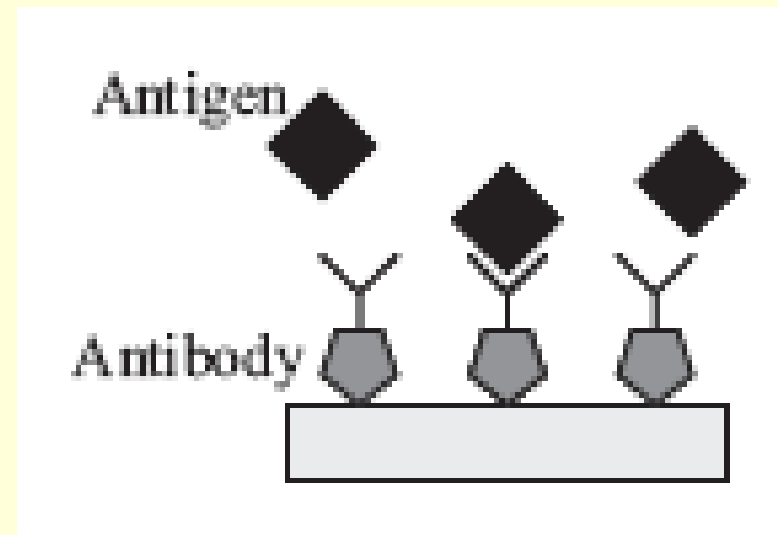
Detekované látky ve směsi nebo látky s porozitou P_v

$$n^2 = \sum_{i=1}^{\text{latky}} x_i n_i^2 \quad n^2 = n_s^2 (1 - P_v) + P_v$$

Změna indexu lomu –
nespecifická \Rightarrow převodník

Detekce n použita např. v
optických „label free“
imunosenzorech interakci
protilátky (antibody) s analytem

See e.g. M.N. Velasco Garcia, „Optical biosensors for probing at the cellular level“,
Seminars in Cell & Developmental Biology 20
(2009) 27–33



Optické změny v detekčním místě

Detekované látky

Absorpční koeficient

(CH ~ 1600-1700 nm, NH ~ 1500 nm, OH ~ 1400 nm
kombinace základních IČ frekvencí 2900-3600 cm⁻¹)

Pro senzory, obvykle platí modifikovaný Lambertův-Beerův zákon pro absorbanci A

$$A = \gamma L \sum_{i=1}^{latky} \varepsilon_i c_i$$

γ může být pro evanescentní senzory < 0.01

Použito např. pro detekci mateřských buněk pomocí kónických optických vláken – taperů nebo v UV imunosenzorech

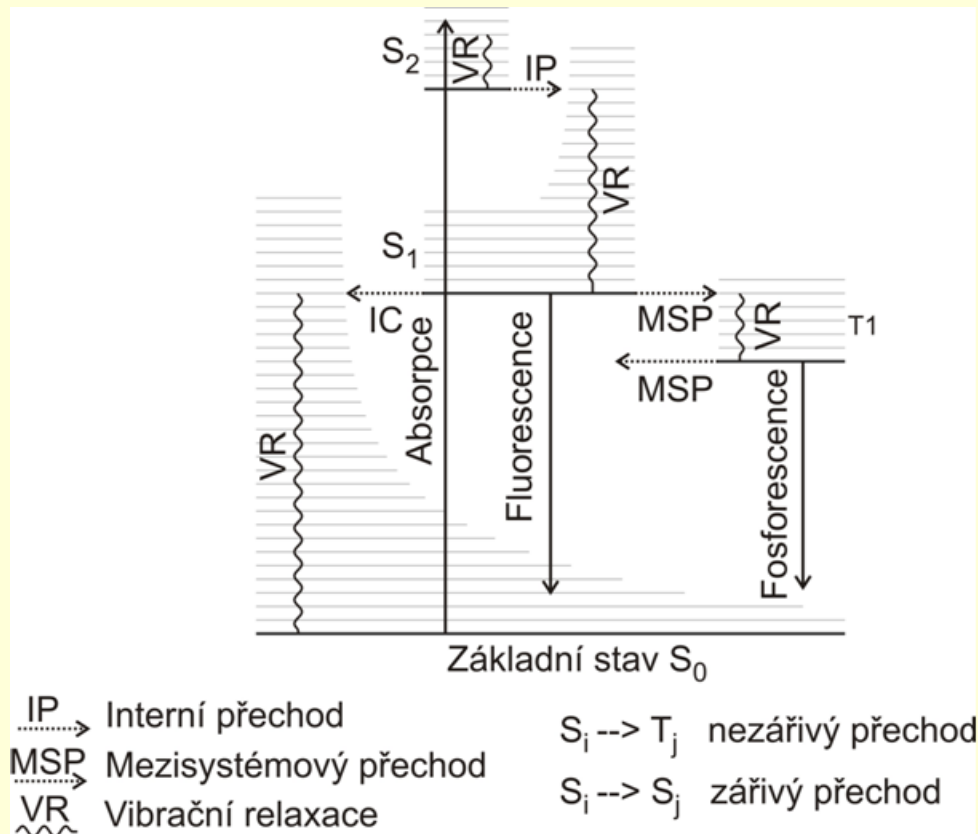
See e.g.: A. Leung et al. *Sensors and Actuators B* 125 (2007) 688–703



Optické změny v detekčním místě

Detekované látky

Luminiscence -
fluorescence nebo
fosforescence



Fluorescenční přechod: beze změny spinu, dovolený a rychlý – doznívání (doba života $\sim \mu\text{s} - \text{ns}$)

Fosforescenční přechod: se změnou spinu, zakázaný a pomalý – doznívání $\sim \text{s} - \text{ms}$



Luminiscence

$$P \approx P_0 \varepsilon(\lambda) Q c L$$

$\varepsilon(\lambda)$ – absorpční koeficient $\sim 10^5$ l/mol/cm Q –kvantová účinnost <1 , c-koncentrace luminoforu

Podle způsobu excitace: elektroluminiscence, photoluminiscence, bioluminiscence, chemoluminiscence

Bioluminiscence excitována např. při enzymatické reakci

luciferin + kyslík \rightarrow světlo (žlutozelené-červené),

Katalyzátor enzym luciferáza.

Chemoluminiscence např. pro luminol-peroxid při katalýze Fe (Cu) solemi.

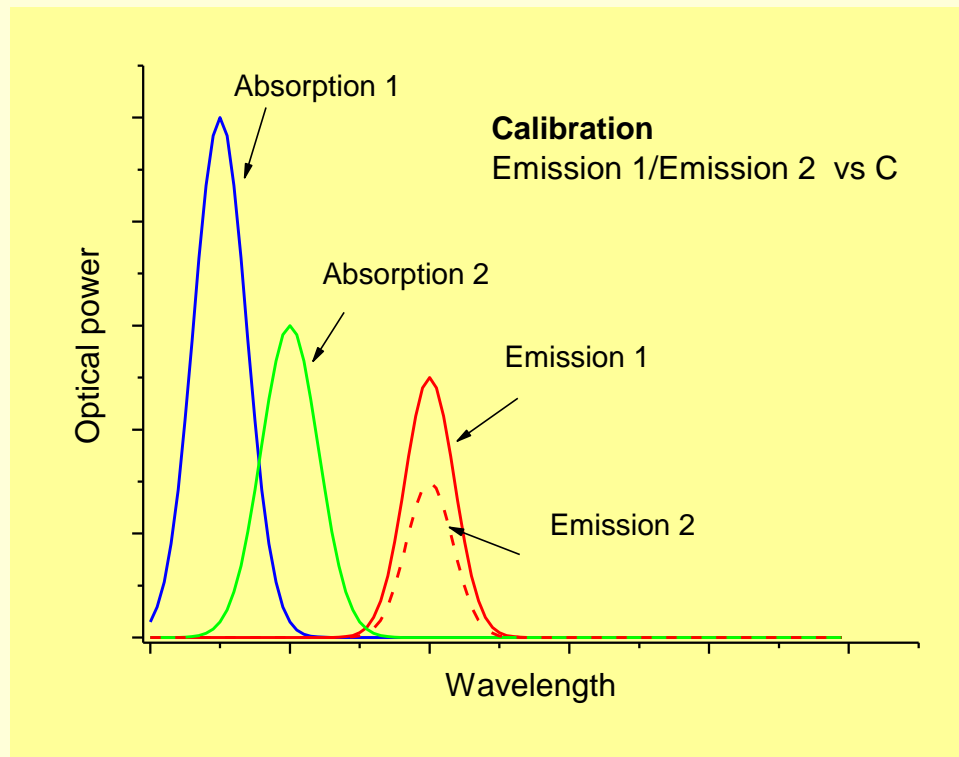
See e.g.: C.L. Morgan et al. Clinical Chemistry 42, No. 2, 1996



Luminiscence

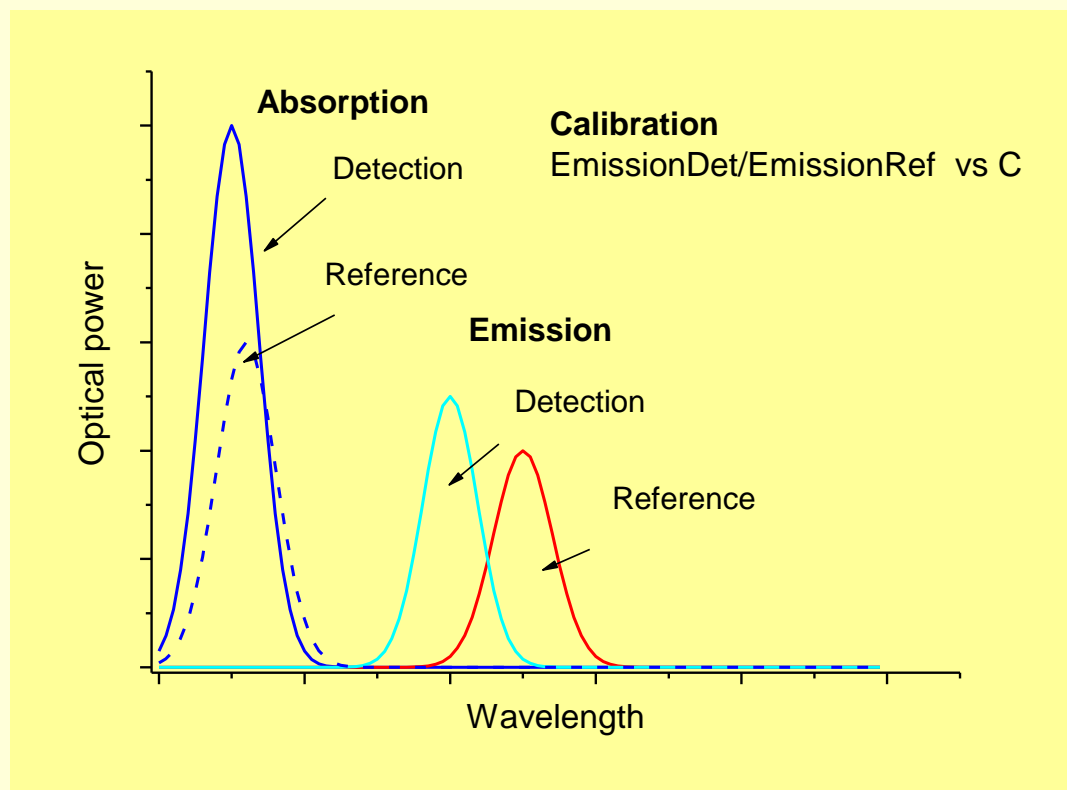
Intenzita luminiscence P je často časově nestabilní,
 proto se používají referenční (poměrové) metody:

1. Excitace při dvou vlnových délkách, detekce emise při jedné vlnové délce (např. při pH detekci)



Luminiscence

2. Přídavek referenčního převodníku, jehož luminiscence se nemění s koncentrací analytu a má přítom absorpci blízkou detekčnímu převodníku

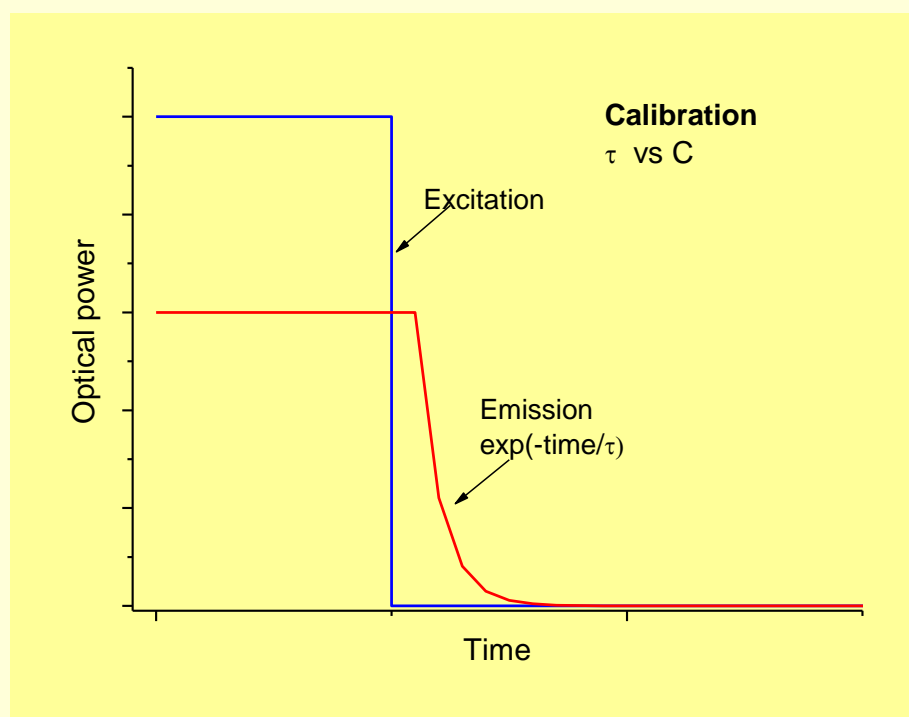


Dual Lifetime Referenced Fluorometry for the Determination of Doxo-rubicin in Urine.
 F. Martínez Ferreras, O. S. Wolfbeis, H. H. Gorris, *Anal. Chim. Acta* (2012), 729, 62-66.



Luminiscence

3. Měření doby života luminiscence τ . Ta je na fluktuacích prakticky nezávislá. Některé látky (kyslík, oxid uhličitý) luminiscenci mohou zhášet



Sternova-Volmerova rovnice

$$\frac{\tau_0}{\tau} = 1 + K_{SV} [Q]$$

Q je koncentrace zhášející látky (Quencher)

http://www.jh-inst.cas.cz/~fluorescence/support/Lectures/UFCH_fluor04.pps



Detekční membrány

Princip působení

- *Nastavují index lomu v detekčním místě*
- *Zvyšují koncentraci detekovaných chemikálií v detekčním místě (určují rozdělovací koeficient K_p analytu v objemové fázi a v detekčním místě)*

$$K_p = \frac{C_{site}}{C_{external}}$$



Detekční membrány

$K_p \rightarrow \infty$ (pro detekovanou látku)

$K_p \rightarrow 0$ (ostatní látky ve vzorku)

Zachycují opticko-chemické převodníky v detekčním místě (absorpční, fluorescenční indikátory), které interagují s detekovanými látkami, čímž se mění objemový absorpční koeficient a index lomu.



Xerogelové detekční membrány

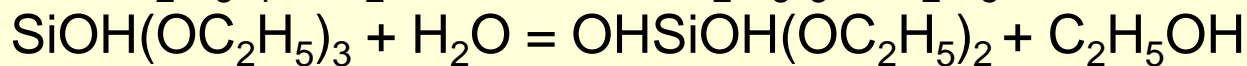
Příprava

Sol-gel metoda vycházející z alkoxidů

Sol = koloidní roztok (částice, řetězce) v rozpouštědle (alkoholy, voda). **Gel** = trojrozměrná mřížka s rozpouštědlem mezi řetězci

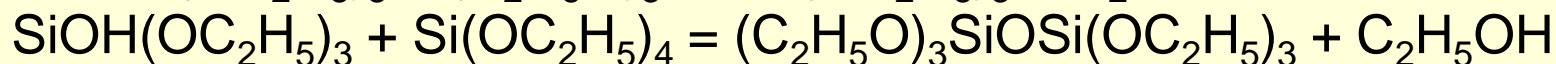
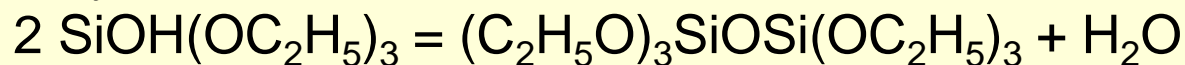
A) Příprava solů - řetězců z výchozích alkoxidů (tetraethoxysilan - TEOS, methyltriethoxysilan - MTES, fenyltriethoxysilanu – PTES, tetraisopropoxidu titanu), rozpouštědla (alkoholy), katalyzátoru (HCl, amoniak), modifikátoru (2-methoxyehanol, cetylamoniumbromid (CTAB)).

Hydrolysa:



Tvorba 2 a více OH skupin žádoucí jen u objemových materiálů, ne u tenkých vrstev – závisí na R_w = moly vody/moly alkoxidu.

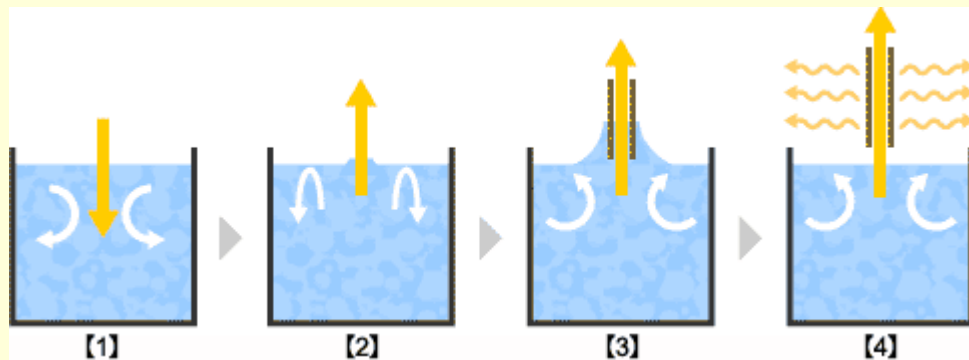
Polykondensace



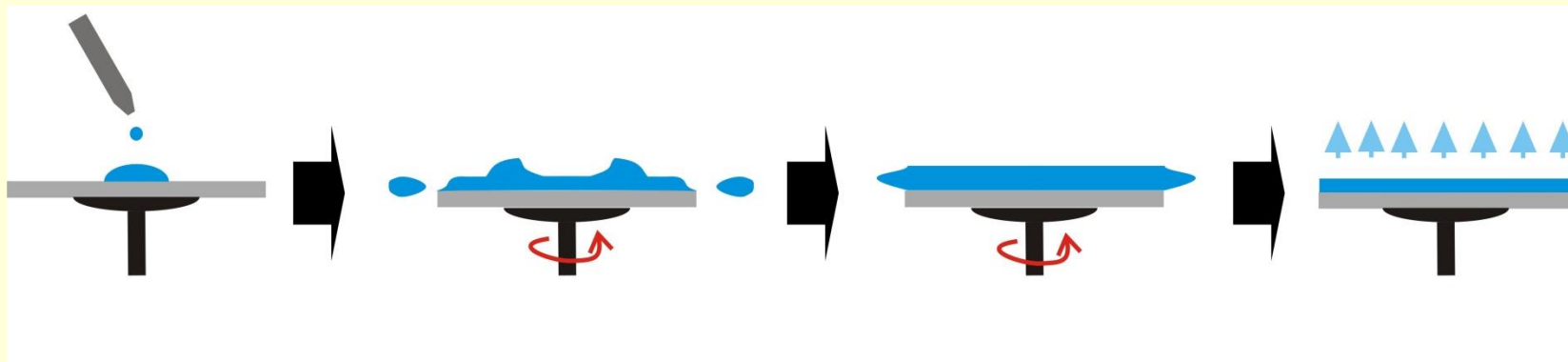
Xerogelové detekční membrány

B) Nanesení solů na substráty → Vrstva gelu

Dip-coating (namáčení): $H \sim U^k$; $k \sim 0.5 - 0.66$; Tloušťka $H \uparrow \leftrightarrow$ Rychlost $U \uparrow$



Spin-coating (za rotace) : $H \sim \Omega^{-k}$; $k \sim 0.5 - 1$; Tloušťka $\downarrow \leftrightarrow$ Otáčky \uparrow



Xerogelové detekční membrány

C) Sušení gelové vrstvy za tvorby pórzní vrstvy (xerogel) – Obvykle do 100 °C.

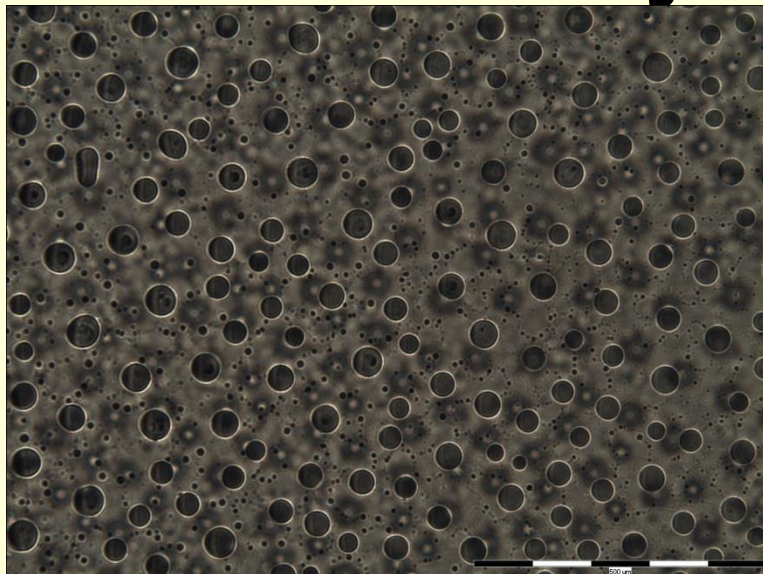
Výsledné vrstvy – mikroporézní (<2 nm)-mesoporézní (2-50 nm) s hydrofobními (lyofóbními), hydrofilními vlastnostmi

https://cdr.lib.unc.edu/indexablecontent?id=uuid:3ead4934-c1c5-4440-a4e1-d04c1add967e&ds=DATA_FILE (biosensors)

Handbook of sol-gel science and technology 1-3, Ed. S. Sakka, 2005

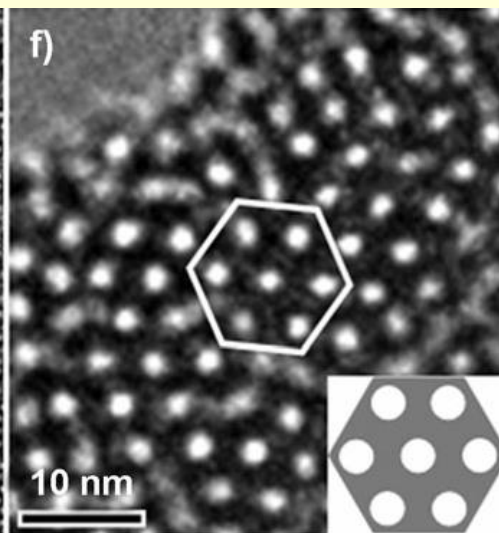
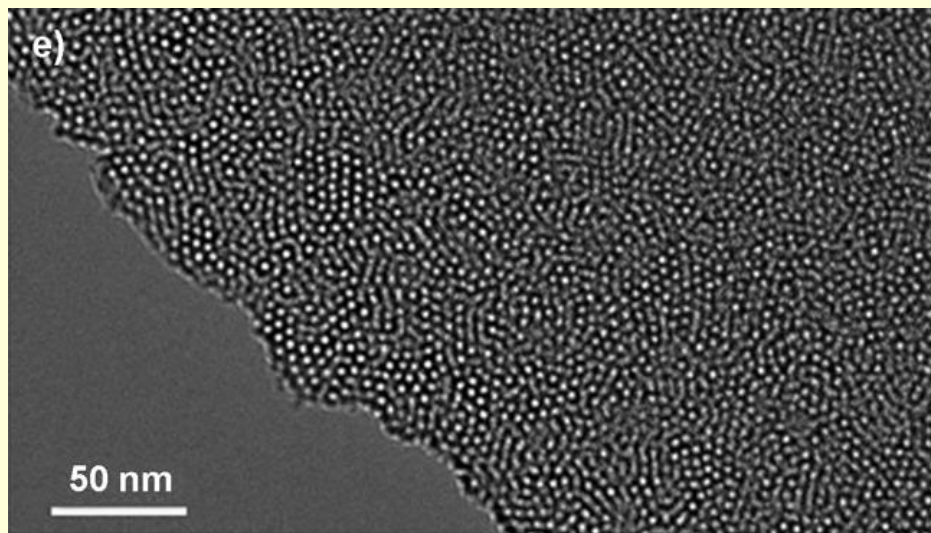


Příklady vrstev na sklech



TEOS + PTES (1:1)

$$R_w = 5$$

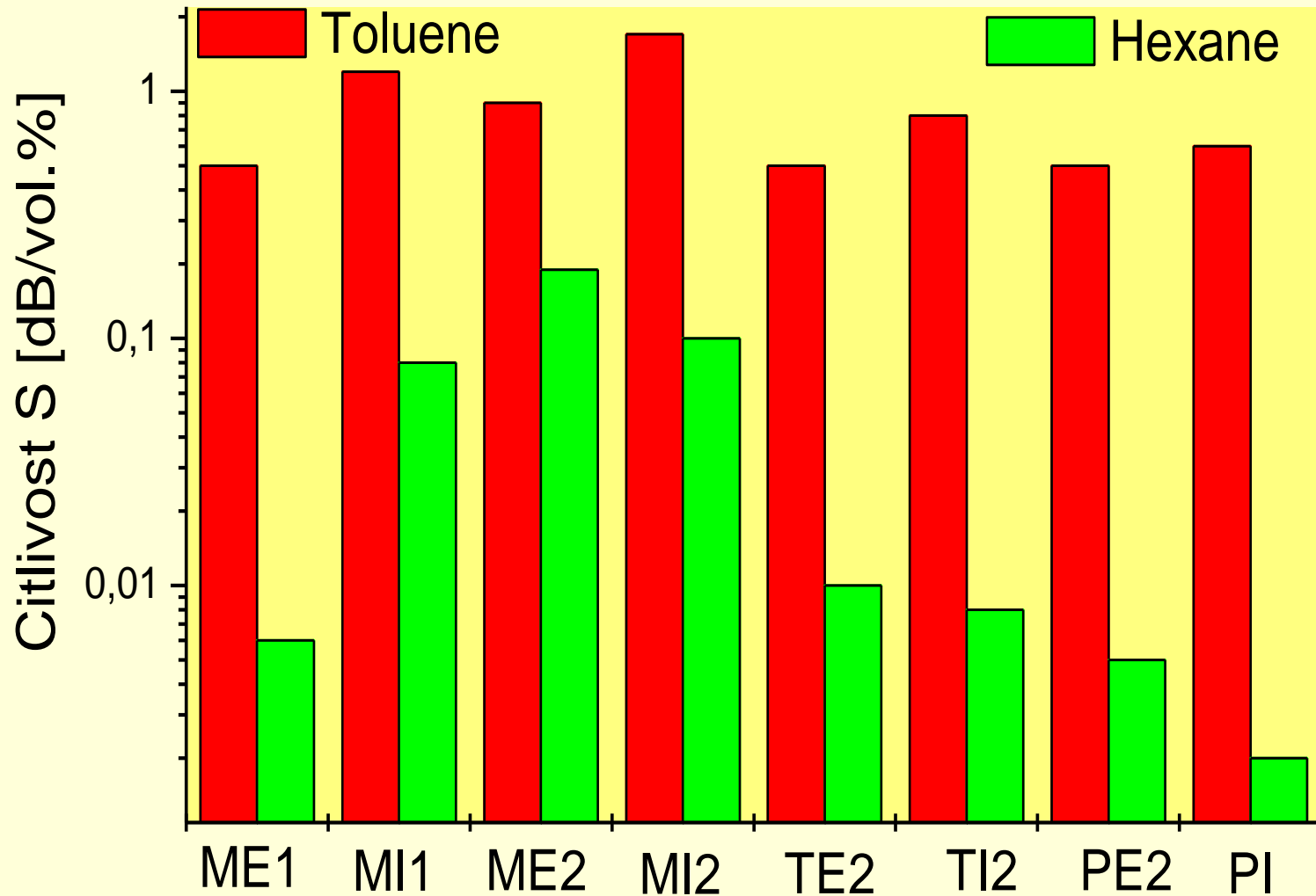


TEOS,
CTAB,
ethanol,
čpavek

Z. Teng et al. *Ang. Chemie* 51, 2173-2177 (2012)



Modifikace citlivosti k uhlovodíkům (g)



M – methyltriethoxysilan, T-tetraethoxysilan, P-phenyltriethoxysilan,
E-ethanol, I-isopropanol; 1- $R_w = \text{voda/alkoxid}=4,6$; 2 – $R_w=3,0$



Polymerní detekční membrány

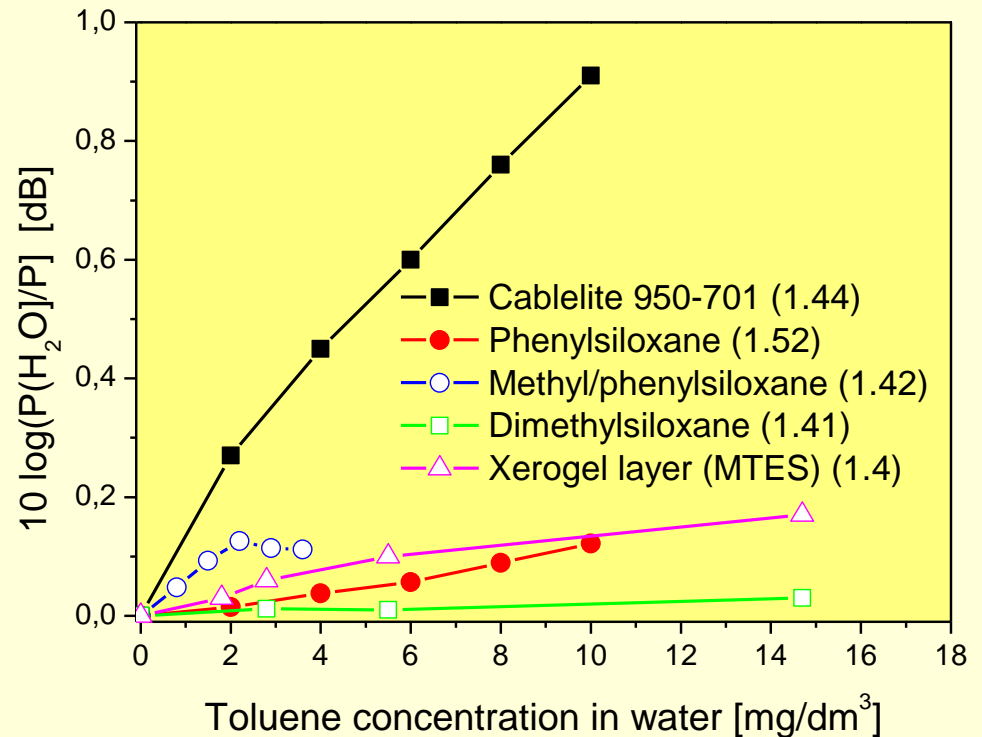
Připravovány – polymerací monomerů (teplo, UV)

Polysiloxanové polymery
(tepelné tvrzení)

PVC (tepelné tvrzení)

ORMOCER®s -
Organicky modifikované
siloxany (UV tvrzení)

Membrány na křemenu, citlivost
k toluenu ve vodě



Membrány připravovány metodou namáčení vláken do roztoku polymeru nebo metodou za rotace planárního vlnovodu



Membrány v biosensorech

Zejména pro immobilizaci biopřevodníků – enzymů, protilátek, nukleových kyselin (DNA, RNA)

- *různé typy polymerních membrán (PVA)*
- *gely (silikagel, xerogel)*

Omezení: nutné pH 6 – 7 při přípravě membrán, jinak může dojít ke zničení biopřevodníku (denaturace). Ethanol a methanol rovněž proteiny denatrují.

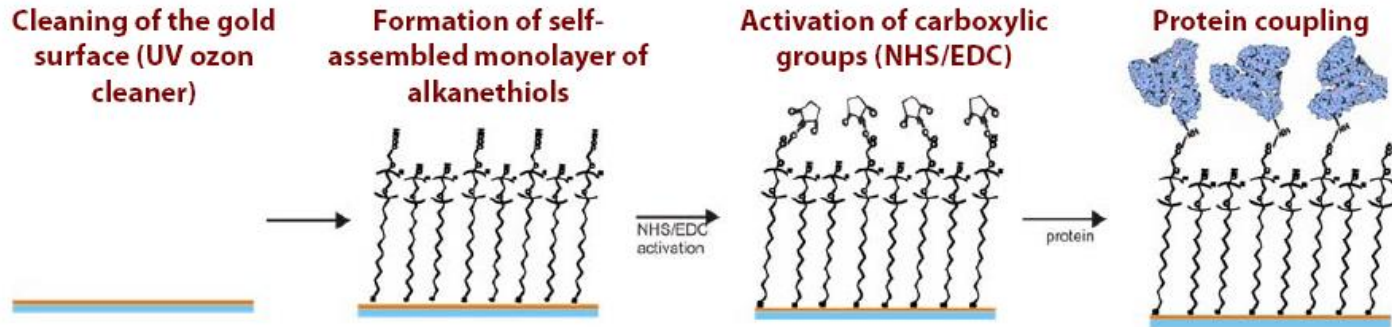
Další typy membrán musí umožnit

- *kovalentní navázání*
- *adsorpce (elektrostatické nebo hydrofobní interakce)*
- *afinitní interakce prostřednictvím proteinů A a G*

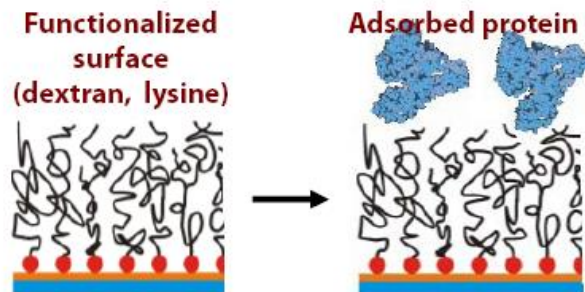


Membrány v biosensorech (použitelné i pro kovové povrchy)

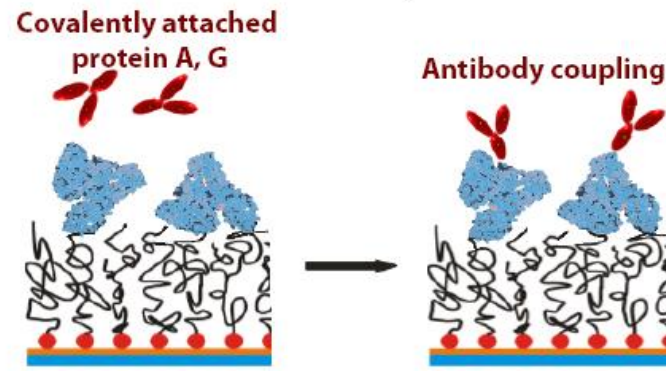
I. Covalent attachment via self-assembled monolayer (SAM)



II. Physical adsorption



III. Attachment via protein A, G



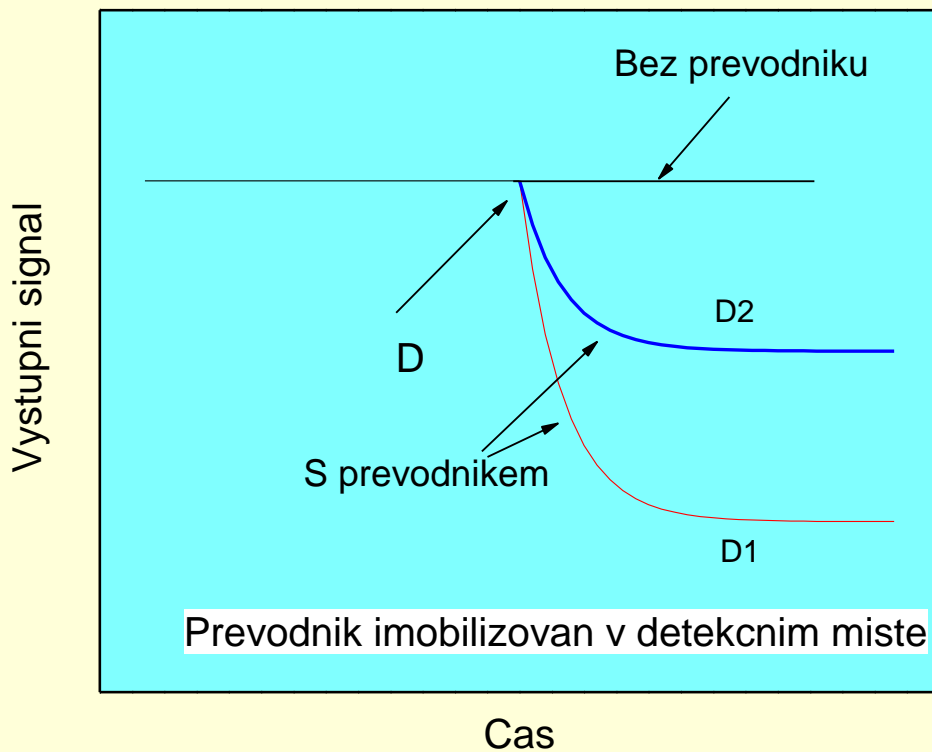
NHS - *N*-hydroxysuccinimide, EDC - *N*-(3-dimethylaminopropyl)-*N'*-ethylcarbodiimide

Protein A – povrchový protein z buněčných stěn (56 kDa), váže protilátky IgG

Protein G – povrchový protein z buněčných stěn (58 nebo 65 kDa), pro vazbu IgG



OPTICKÉ PŘEVODNÍKY



Optické změny v detekčním místě jsou zesíleny interakcí detekované veličiny D s optickým převodníkem

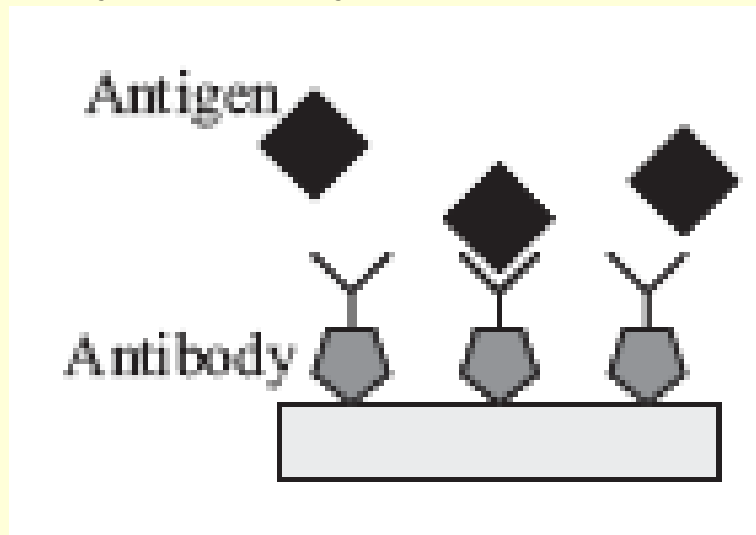


Opto-chemické převodníky

Index lomu

Imunopřevodníky = biopřevodníky

Využívají imunitní (afinitní) reakce protilátek (antibody) ke specifickému zachycení analyzovaných látek (antigen) → změna n



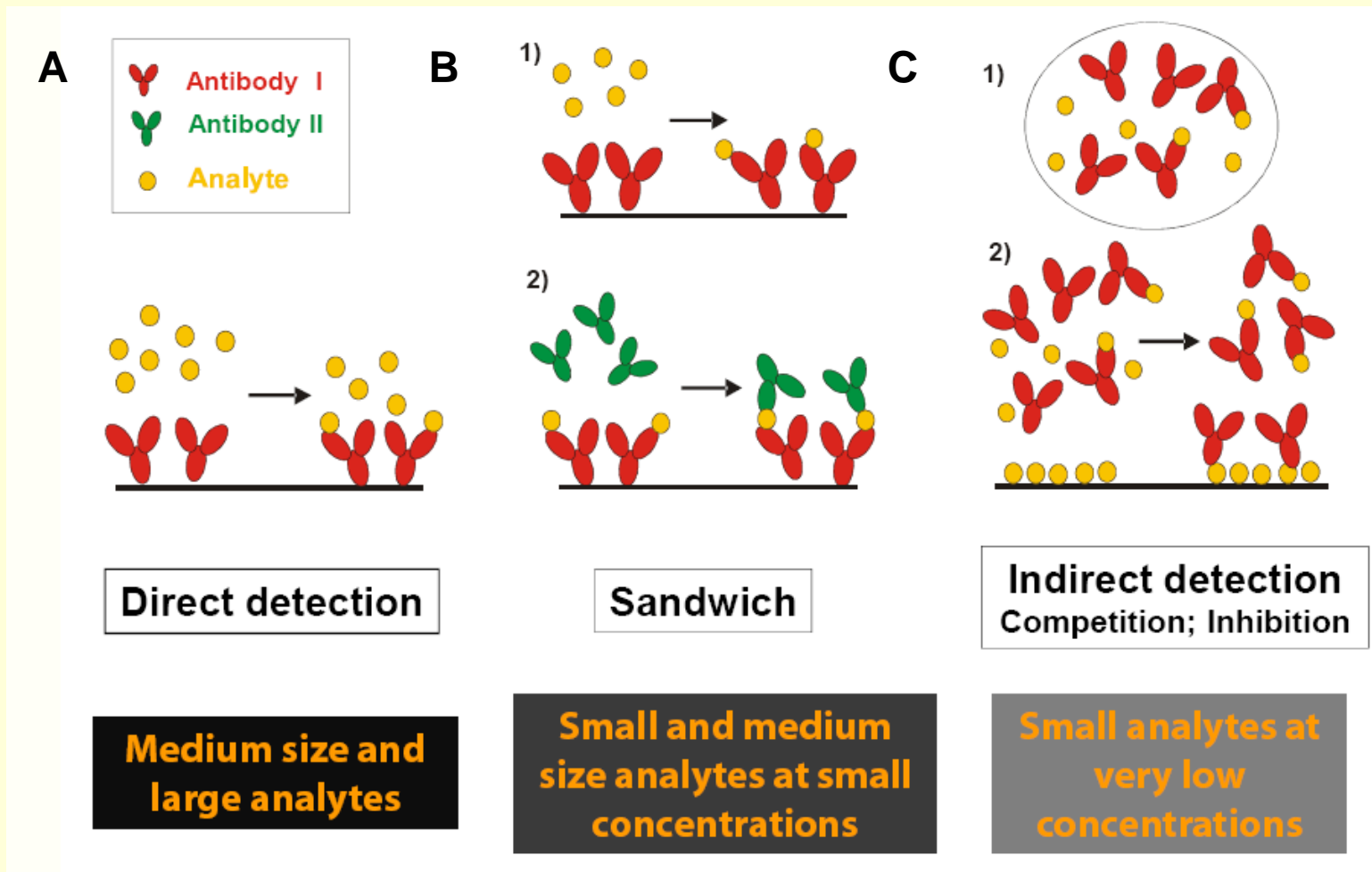
Gamaglobuliny Ig
5 druhů – G,M,A,E,D

IgG

See e.g.: D.W.G. Morrison et al., „Clinical application of micro- and nanoscale biosensors“, Biomedical Nanostructures, Ed. K.E. Gonsalves, C.L. Laurencin, C.R. Halberstadt, L.S. Nair, 433-453, Ch. 17, 2008



Imunopřevodníky – „label-free“ změna indexu lomu



A - přímé, B – sendvičové, C – inhibiční, konkurenční



Biopřevodníky

Vyžadují fyziologické podmínky (pH, rozpouštědlo, teplota) jinak denaturace

K řízení pH

PBS- „phosphate buffered saline“ pH=7,4

(g/l – 8,01-NaCl, 0,20 KCl, 1,78 Na₂HPO₄ 2H₂O, 0,27 KH₂PO₄)

V imunosensorech je dále používán

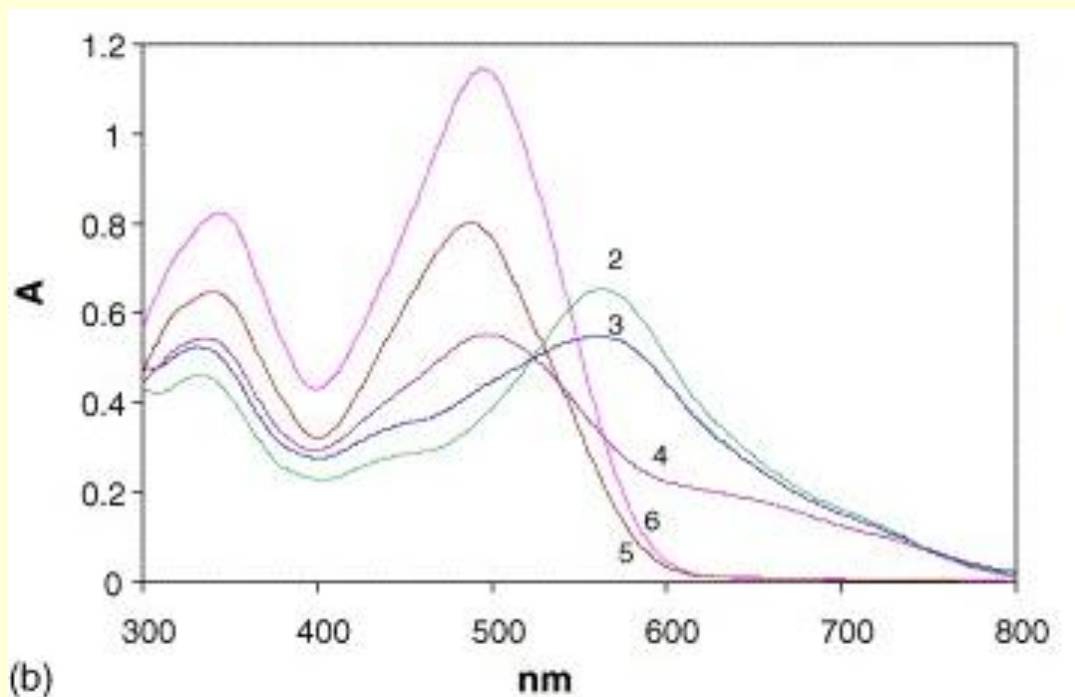
BSA – „Bovine serum albumin“ – v imunosensorech pro zvýšení signálu



Opto-chemické převodníky

Absorpční koeficient

pH indikátory: $\text{BInd} + \text{H}_3\text{O}^+ \rightarrow \text{AInd} + \text{H}_2\text{O}$



below pH 3.0

above pH 5.2

3.0

↔

5.2

Absorpční spektra „Congo red“ pro různé pH

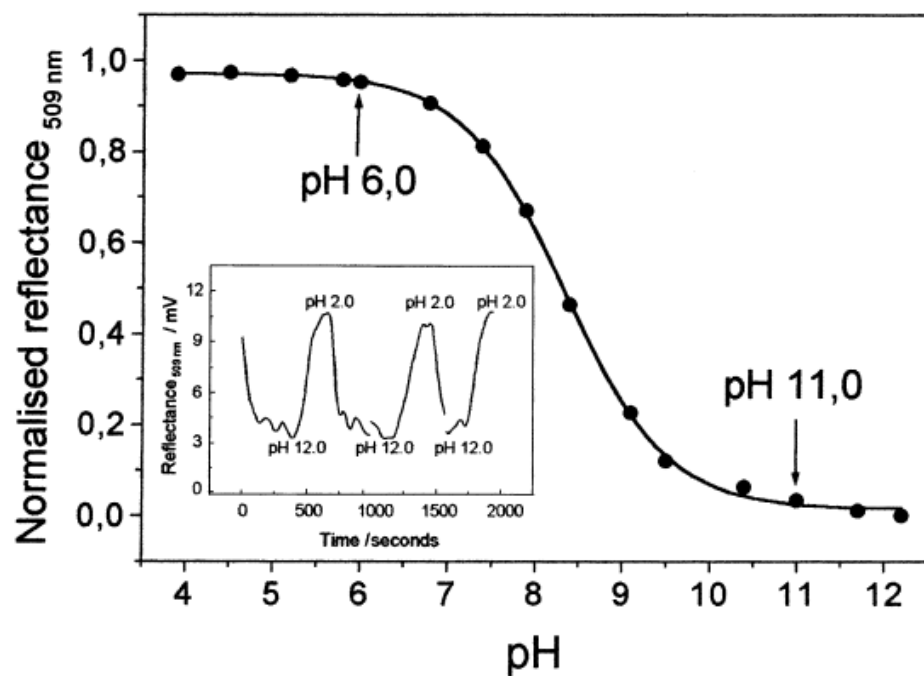
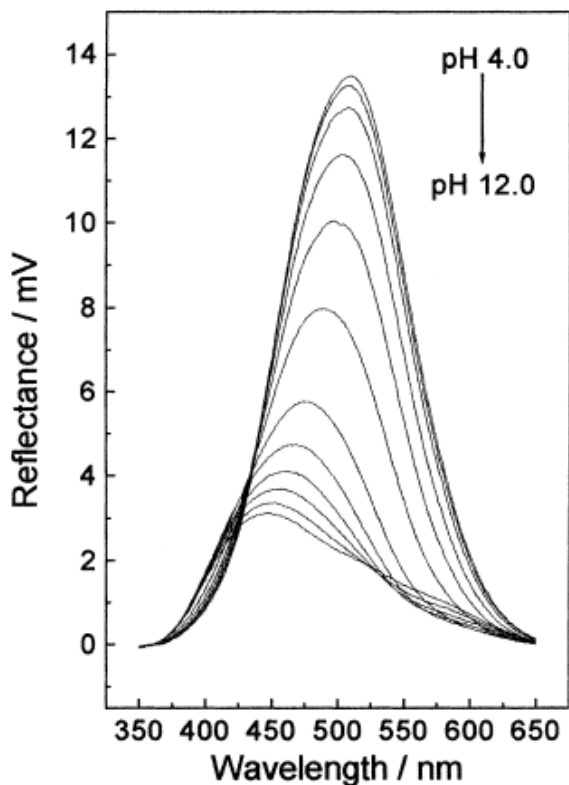
P. Hashemi et al., *Sens. Act. B115*, 49-53 (2006)



Opto-chemické převodníky

Absorpční koeficient

pH indikátory: polyanilin v pórézním skle



P. T. Sotomayor et al., Sens. Act B74, 157-162 (2001)



pH indikátory - vlastnosti

Common name	Chemical name	pH range (pka)	Color in Acid	Color in Alkaline
Bromo-phenol blue	tetrabromophenol-sulphone-phthalein	3.0-4.6 (4.1)	yellow	blue
Methyl yellow	Dimethylamino-azo-benzene	2.9-4.0 (3.3)	red	yellow
Methyl orange	Dimethylamino-benzene sodium sulphonate	3.1-4.4 (3.7)	red	orange
Congo red	Diphenyl-bis-azo-1-naphthylamino-4-sulphonic acid	3.0-5.0	blue	red
Bromo-cresol green	Tetrabromo-m-cresol-sulphone-phthalein	3.8-5.4 (4.7)	yellow	blue
Methyl red	o-Carboxybenzene-azodimethyl-aniline	4.2-6.3 (5.0)	red	yellow
Chlorophenol red	Dichloro-phenol-sulphone-phthalein	4.8-6.4 (6.1)	yellow	red
4-Nitrophenol	4-Nitrophenol	5.6-7.6 (7.1)	colorless	yellow
Bromocresol purple	Dibromo-o-cresol-sulphone-phthalein	5.2-6.8 (6.1)	yellow	purple
Bromo-thymol blue	Dibromo-thymol-sulphone-phthalein	6.0-7.6 (7.1)	yellow	blue
Phenol red	Phenol-sulphone-phthalein	6.8-8.4 (7.8)	yellow	red
Cresol red	1-Cresolsulphone-phthalein	7.2-8.8 (8.2)	yellow	red
Thymol blue	Thymol-sulphone-phthalein	8.0-9.6 (8.9)	yellow	blue
Phenolphthalein	Phenolphthalein	8.3-10.0 (9.6)	colorless	red



Biopřevodníky - enzymy

Enzymy = biokatalyzátory

Substrát (analyt) \rightarrow ^{enzym} Produkt

Substrát = glukóza, fruktoza, pesticidy,
močovina

Produkt může mít vhodné optické vlastnosti
nebo je nutné přidat další převodník



Opto-chemické a biopřevodníky

Absorpční koeficient (pH detekce u biopřevodníků enzymů)

Enzymatické převodníky a pH převodník

Cholinesteráza + methyl červeň

Acetylcholin + voda → cholin + kyselina octová

Detekce organofosforových látek pro vojenství a zemědělství.

Cholinesteráza zachycena na silikagelu, acetylcholin a pH indikátor v ampulce.

Nervově paralytická látka inhibuje cholinesterázu ⇒ žádná změna pH.



Průkazník CHP71



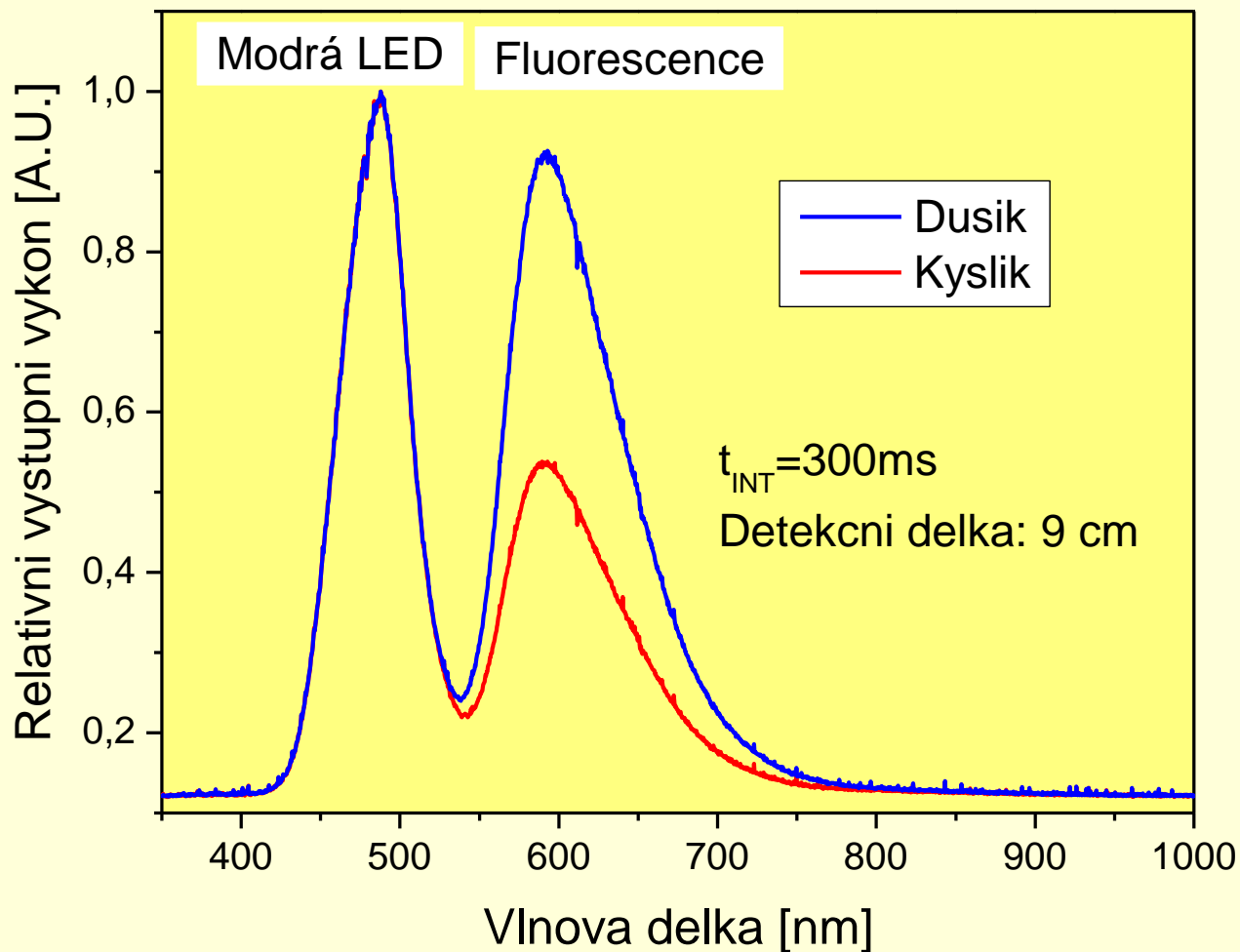
Luminiscenční převodníky

- Ru komplexy s fluorescencí zhašenou kyslíkem
- Fluorescenční pH indikátory pro biologii a medicinu – BCECF, HPTS
- Fluorescenční značky na IgG, enzymech, DNA řetězcích



Fluorescenční detekce kyslíku

Kyslík \leftrightarrow Ru(phen)₂Cl₂ \Rightarrow zhášení fluorescence



Optická detekce glukosy



Reakce glukosy s kyslíkem v přítomnosti enzymu glukooxidázy (katalyzátor)



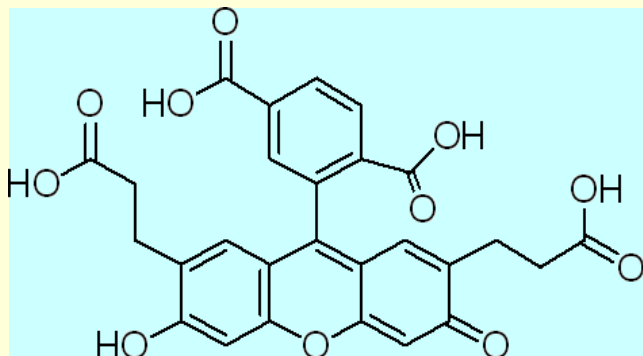
1. Spotřeba kyslíku se detekuje pomocí fluorescence Ru komplexů
2. Vznik peroxidu vodíku lze detekovat pomocí chemiluminiscence luminolu



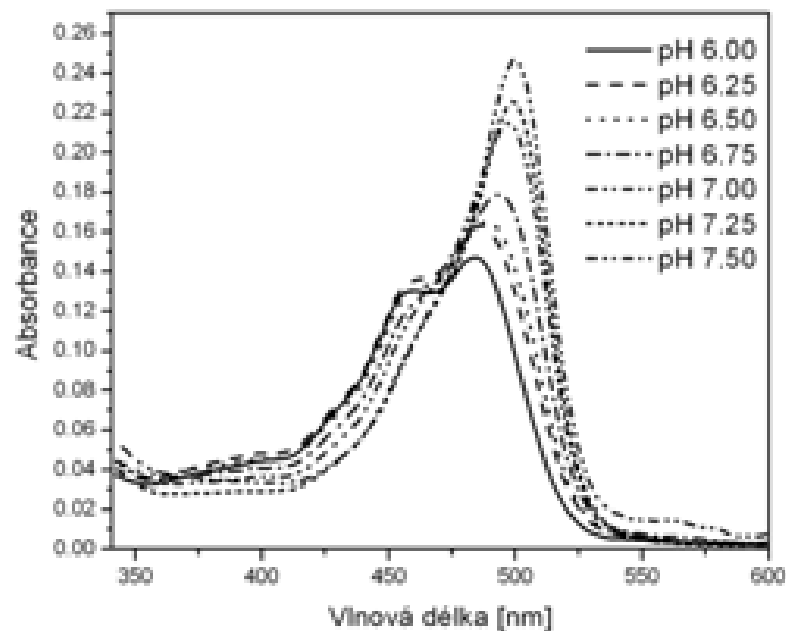
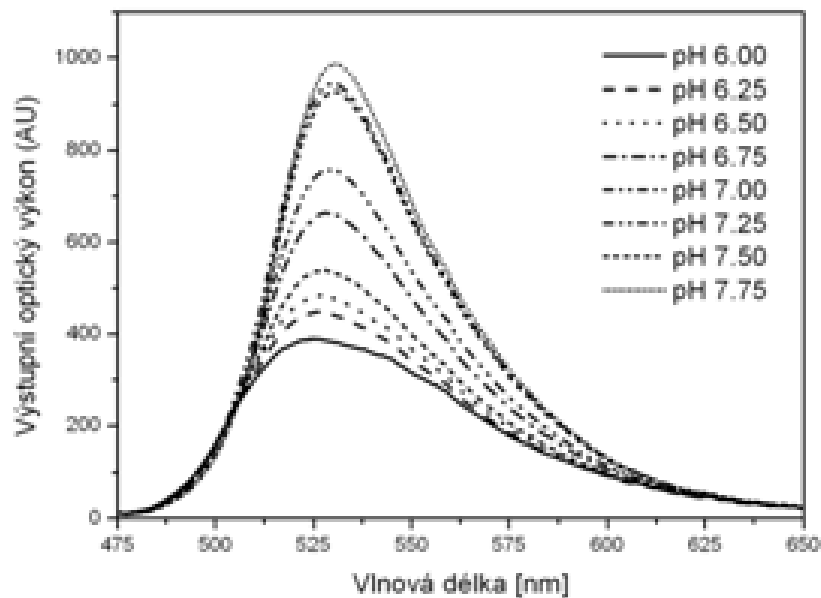
Fluorescenční detekce pH -biosenzory

2',7'-Bis(2-carbonylethyl)-5(6)-
carboxyfluorescein

BCECF (Aldrich 14560)



Emise

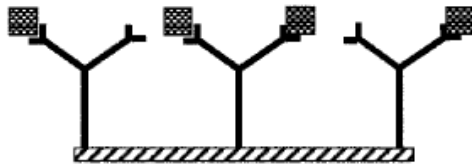


Excitace 473 nm,
Reference 430 nm

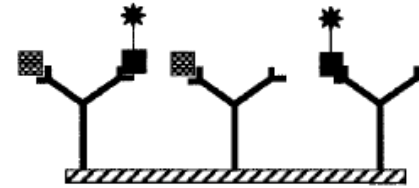


Imunopřevodníky s fluorescenčními značkami

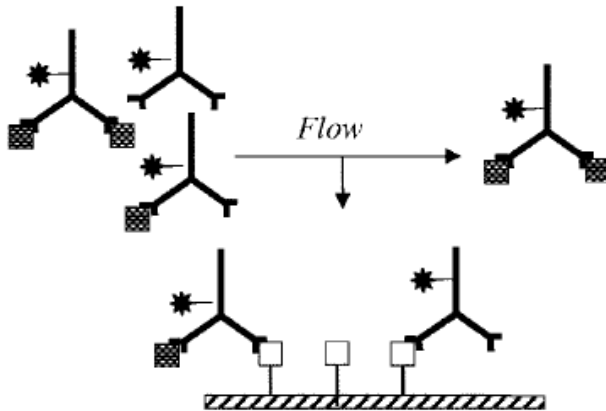
(A) DIRECT ASSAY



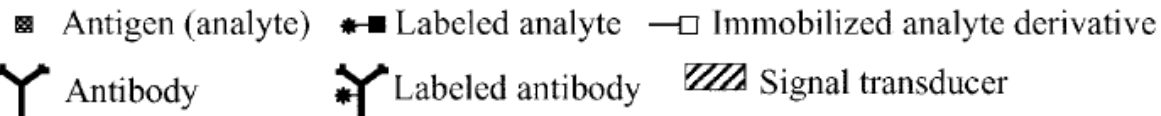
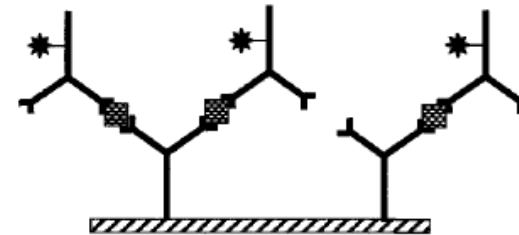
(B) COMPETITIVE ASSAY



(C) BINDING INHIBITION ASSAY



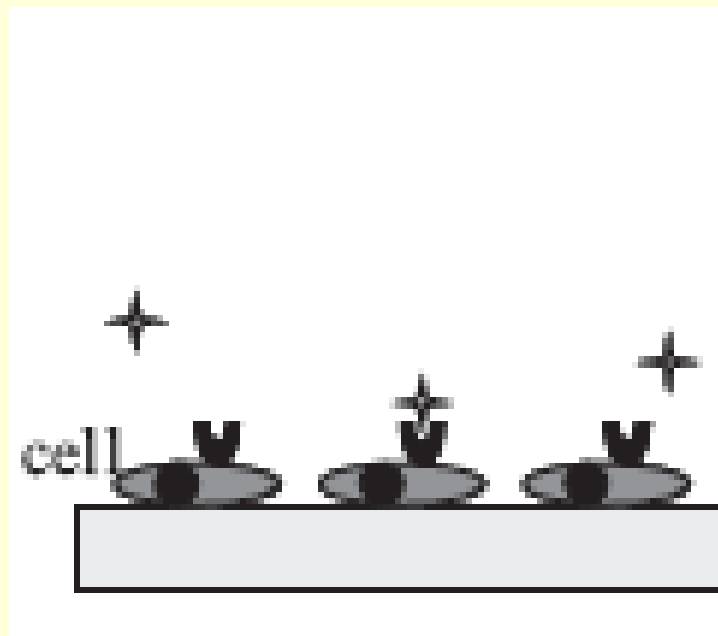
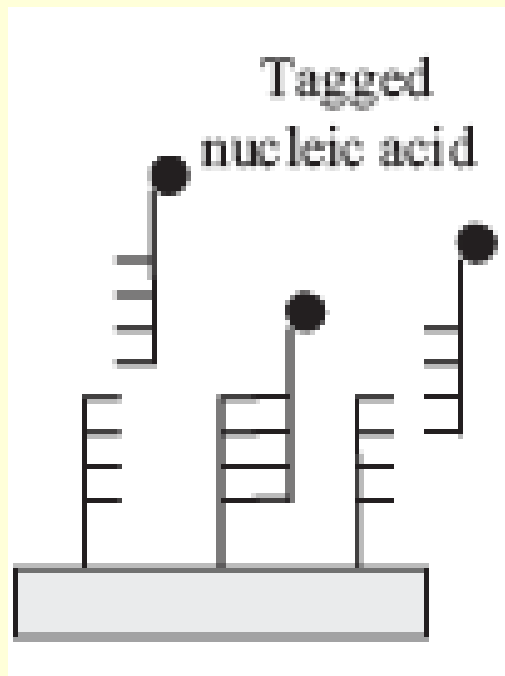
(D) SANDWICH ASSAY



A – přímé (bez značky) , B – konkurenční,
C – inhibiční, D - sendvičové



DNA řetězce, buňky



Navázání doplňkových řetězců DNA s fluorescenčními značkami – detekce poruch DNA

Bioluminescence geneticky modifikované Escherichia coli,



Příklady enzymatických převodníků

Analyt	Enzym	Matrice	Detekován	Převodník
Glukóza	Glukosaoxidáza	Akrylamid	Kyslík	Ru(phen) ₂ Cl ₂
Bilirubin	Bilirubinoxidáza	Akrylamid	Kyslík	Ru(phen) ₂ Cl ₂
Cholesterol	Cholesteroxidáza	Grafit	Kyslík	Ru(phen) ₂ Cl ₂
Penicilin	Penicilináza/penicilin G amidáza	Polyvinyl alkohol	pH	Aminofluorescein
Močovina	Ureáza	Polyvinyl alkohol	pH	Aminofluorescein
Cholin	Cholinoxidáza	PVA gel	H ₂ O ₂	Luminol

M.D. Marazuela et al., Anal Bioanal Chem (2002) 372 :664–682



Příklady imunopřevodníků (měření fluorescence)

Analyt	Značka	Uspořádání
Kokain	Protilátka značená Cy5	Konkurenční
Alkaloidy koky	Antigen značený fluoresceinem	Konkurenční
Benzo(a)pyren (rakovina)	-	Přímé (325 nm)
Protein C (tromboza)	Protilátka značená Cy5	Sendvič
Dimer D (seps)	Protilátka značená Cy5	Sendvič
Salmonella spp.	Protilátka značená fluoresceinem	Sendvič
Enterotoxin B	Protilátka značená Cy5	Sendvič

Cy5 (Cy3) kyaninová barviva λ_a do 550 nm, $\lambda_e \sim 570$ nm.

Fluorescein (obvykle fluorescein isokyanát) excitace ~ 490 nm, emise ~ 520 nm.

