

L A S E R

Krize klasické fyziky na přelomu 19. a 20. století, vznik kvantových představ o interakci optického záření s látkami

Stimulovaná emise

Princip laseru

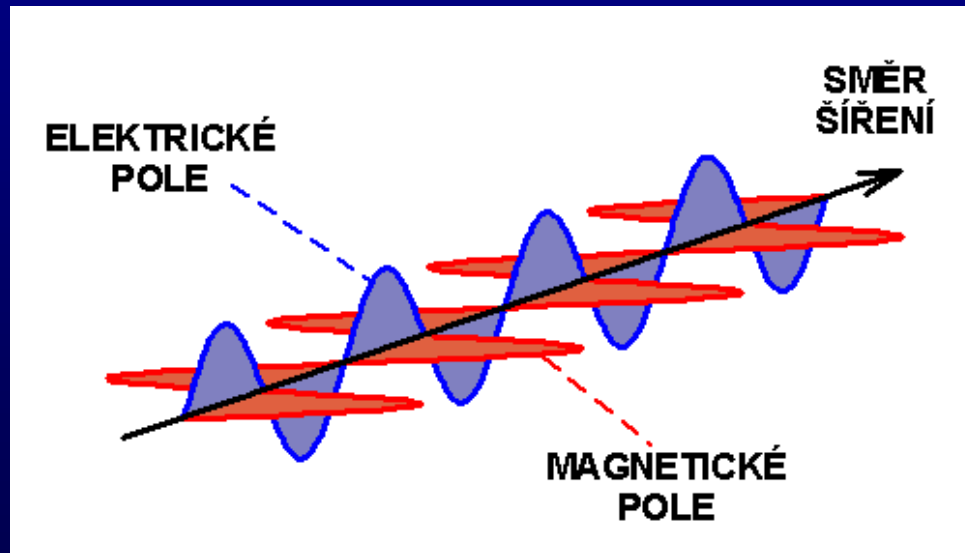
**Specifické vlastnosti laseru jako
zdroje optického záření**

Typy laserů a jejich využití

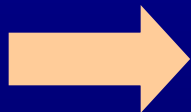
V čem mohou být lasery nebezpečné ?

Od 70. let 19. století:

**Optické záření je
elektromagnetické vlnění
v určitém frekvenčním oboru**



Co je světlo?



Jak světlo vzniká?

Jak působí?

Jak se šíří?

Mechanismus interakce optického záření s látkami (zdánlivě zřejmý)

Optické záření - **proměnné elmag pole**
působí na elektrické náboje Lorentzovou silou,
vyvolává tedy **vynucené oscilace nabitých částí atomů**

Následek: změna vnitřní energie atomu či molekuly;
oscilující náboje emitují elektromagnetické záření

Zjistilo se však, že některé optické jevy související s předáváním energie mezi optickým zářením a látkami nelze pomocí klasické fyziky vysvětlit

Krise klasické fyziky na přelomu 19. a 20. století

Jevy týkající se absorpce či emise optického záření, které klasická fyzika neuměla vysvětlit:

- Spektrální tvar tepelného záření absolutně černého tělesa
- Existence dlouhovlnné hrany fotoelektrického jevu
- Stabilita atomů a jejich čarová emisní a absorpční spektra

Tepelné zdroje

Každé těleso o nenulové absolutní teplotě vysílá elektromagnetické záření

spektrální
hustota záře

emisivita

funkce teploty nezávislá na
povrchu

$$L_{\lambda}(\lambda, T) = \mathcal{E}(\lambda, T) L_{\lambda}^0(\lambda, T)$$

Zář : Množství energie vyzářené za jednotku času
z jednotkové plochy zdroje do jednotkového
prostorového úhlu

Tepelné zdroje

Každé těleso o nenulové absolutní teplotě
vysílá elektromagnetické záření

spektrální
hustota záře

emisivita

funkce teploty nezávislá na
povrchu

$$L_{\lambda}(\lambda, T) = \mathcal{E}(\lambda, T) L_{\lambda}^0(\lambda, T)$$

záření absolutně černého tělesa

Kirchhoffův zákon $\mathcal{E}(\lambda, T) = A(\lambda, T)$

absorptivita

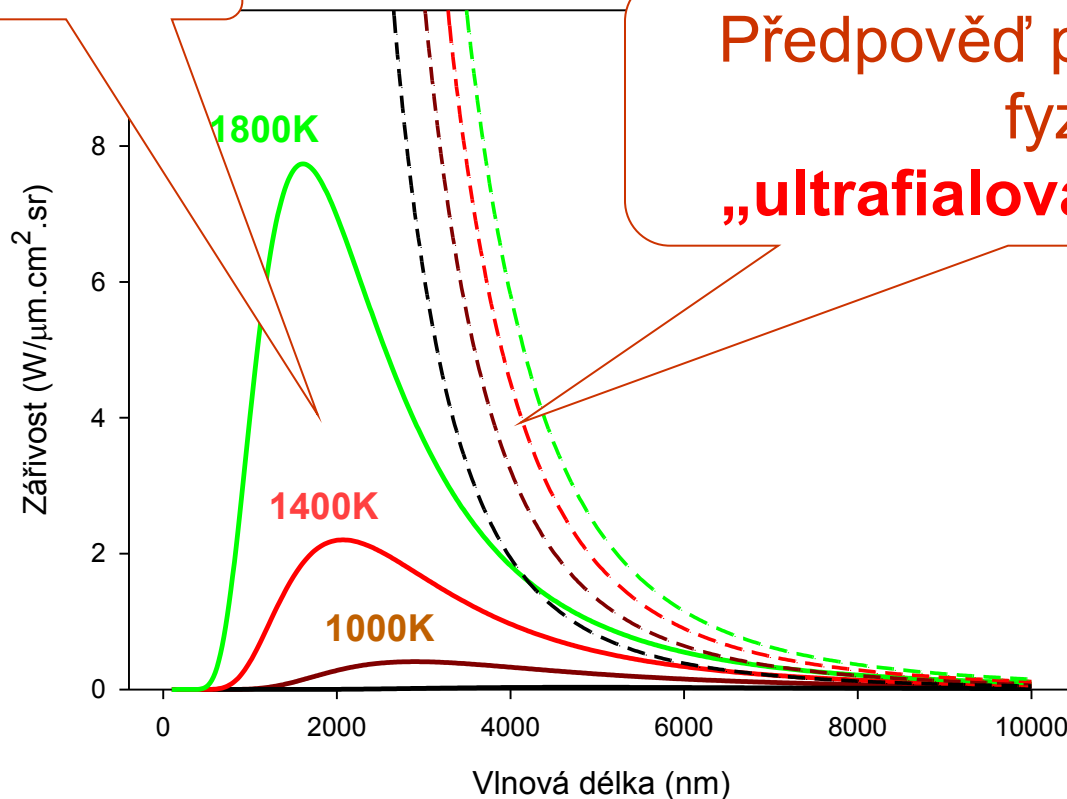
reflektivita

neprůhledné těleso: $A(\lambda, T) = 1 - R(\lambda, T)$

Absolutně černé těleso

Technická realizace: vyhřívaná dutina

Experiment



Předpověď podle klasické fyziky
„ultrafialová katastrofa“



Max Planck:

Planckův vyzařovací zákon

Planckův zákon

$$L_{\lambda}^0(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]}$$

Teoreticky lze odvodit za **předpokladu kvantování energie elektromagnetického záření**

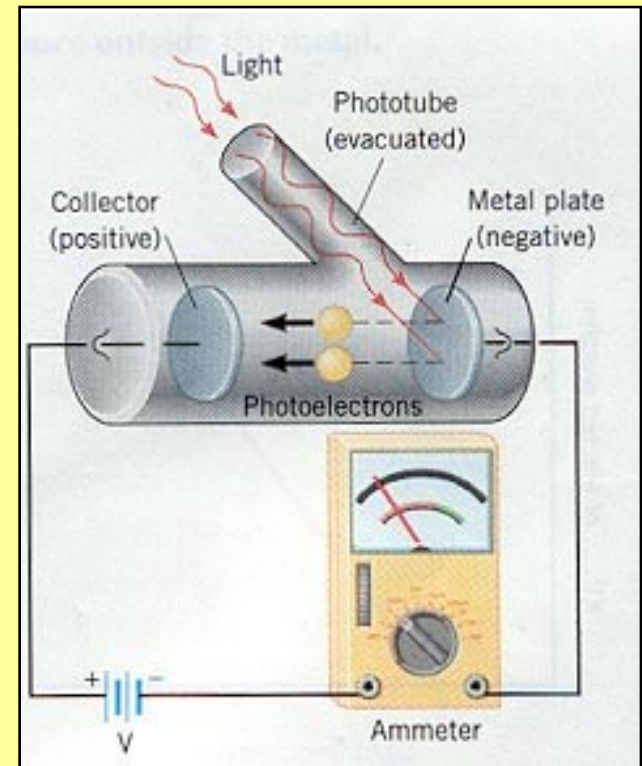
$$\Delta E_{\nu(\nu)} = h\nu \quad ; \quad h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

Planckova konstanta

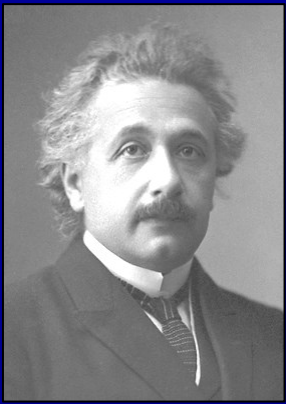
Fotoelektrický jev (vnější fotoefekt)

Foton předá energii vodivostnímu elektronu v kovu a ten je emitován do vakua

Při zvětšování vlnové délky působícího záření po překročení určité hodnoty (závisí na druhu kovu) jev mizí



Dlouhovlnná hrana fotoefektu (nelze klasicky vysvětlit)



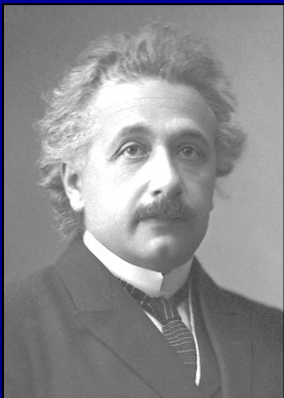
Albert Einstein:

Kvantová povaha neelastické interakce

Elektromagnetické záření může předávat energii pouze po jednotlivých kvantech:

$$E_{\text{elektron}} = h\nu - A \quad ; \quad E_{\text{elektron}} > 0 \Rightarrow \nu > A/h$$

výstupní práce



Albert Einstein:

Kvantová povaha neelastické interakce

Elektromagnetické záření může předávat energii pouze po jednotlivých kvantech:

$$E_{elektron} = h\nu - A \quad ; \quad E_{elektron} > 0 \Rightarrow \nu > A/h$$

výstupní práce

Foton

Kvantum elektromagnetického záření (kvazičástice)

energie $E_f = h\nu = \hbar\omega \quad ; \quad \hbar = h/2\pi$

rychlost c

hmotnost $E_f = h\nu = m_f c^2 \Rightarrow m_f = \frac{h\nu}{c^2}$

hybnost $p_f = m_f c = \frac{h\nu}{c}$

Vyzařování atomů

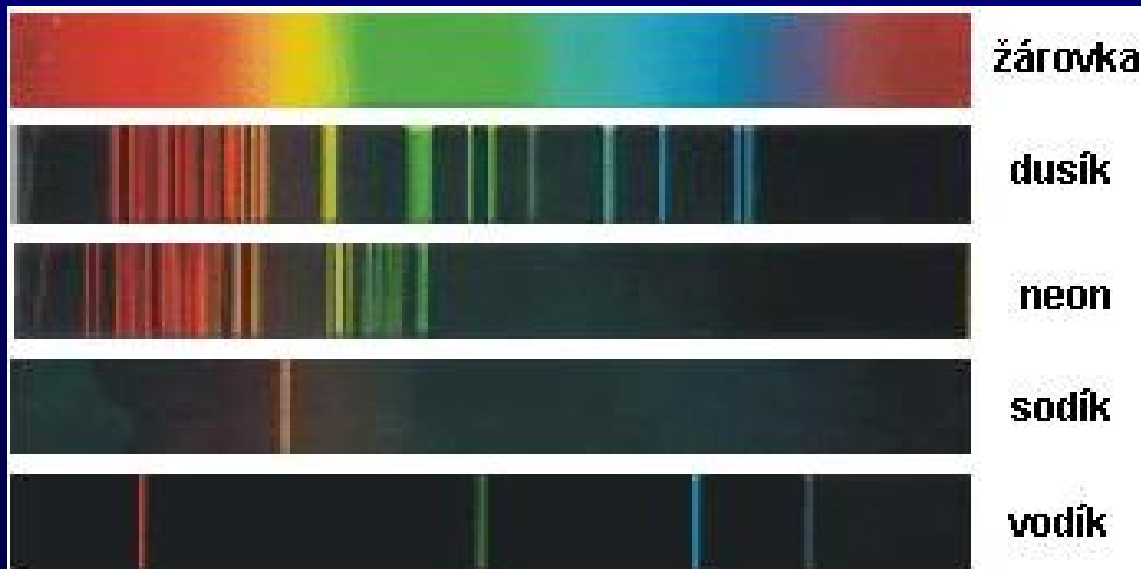
Každý náboj s nenulovým zrychlením se stává zdrojem elektromagnetického záření

Thompsonův model – elektrony v klidu, při rozkmitání vyzařují.

Popřen objevem atomového jádra.

Rutherfordův (planetární) model atomu – elektrony obíhají po eliptických drahách kolem jádra.

Podle klasické teorie elektromagnetického pole však za méně než 10^{-10} s předá elektron veškerou kinetickou energii generovanému elmag. záření!



Vyzařování atomů

Každý náboj s nenulovým zrychlením se stává zdrojem elektromagnetického záření

Thompsonův model – elektrony v klidu, při rozkmitání vyzařují.

Popřen objevem atomového jádra.

Rutherfordův (planetární) model atomu – elektrony obíhají po eliptických drahách kolem jádra.

Podle klasické teorie elektromagnetického pole však za méně než 10^{-10} s předá elektron veškerou kinetickou energii generovanému elmag. záření!

Niels Bohr:



Existují stavy atomů a molekul, kdy nevydávají elektromagnetické záření a tedy si zachovávají vnitřní energii. Tyto stavy se nazývají **stacionární**.

Může docházet ke skokové změně stacionárního stavu, kdy se energetická bilance vyrovná absorpcí nebo emisí fotonu – **optické přechody**.

Stacionární stavy atomů a molekul a přechody mezi nimi

stacionární stavy:

- základní stav
- excitované stavy

přechody:

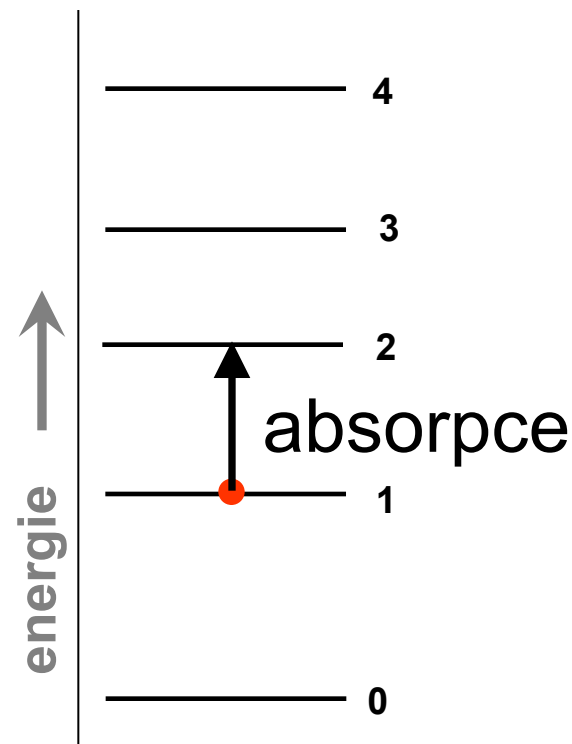
zářivé X nezářivé

zářivé přechody

absorpční x emisní

$$h\nu_{ab} = \pm(E_a - E_b)$$

Lokalizovaný systém
nabitých částic
(atom, molekula)



Stacionární stavy atomů a molekul a přechody mezi nimi

stacionární stavy:

- základní stav
- excitované stavy

přechody:

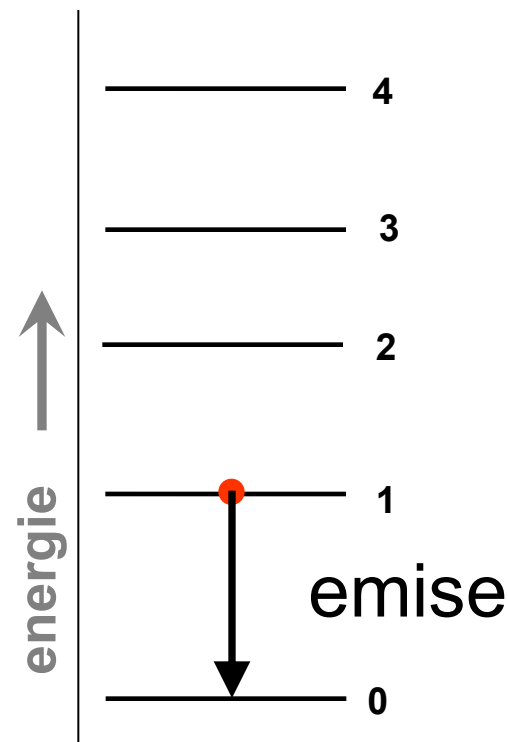
zářivé X nezářivé

zářivé přechody

absorpční x emisní

$$h\nu_{ab} = \pm(E_a - E_b)$$

Lokalizovaný systém
nabitých částic
(atom, molekula)



Základy teorie absorpčních a emisních přechodů

Albert Einstein:

absorpce

$$\frac{d P_{1 \rightarrow 2}}{d t} = B_{12} w_{12}$$

prostorová hustota
energie elmag. pole

emise

$$\frac{d P_{2 \rightarrow 1}}{d t} = B_{12} w_{12} + A_{12}$$

spontánní

stimulovaná

● = electron

_____ 1

_____●_____ 0

_____●_____

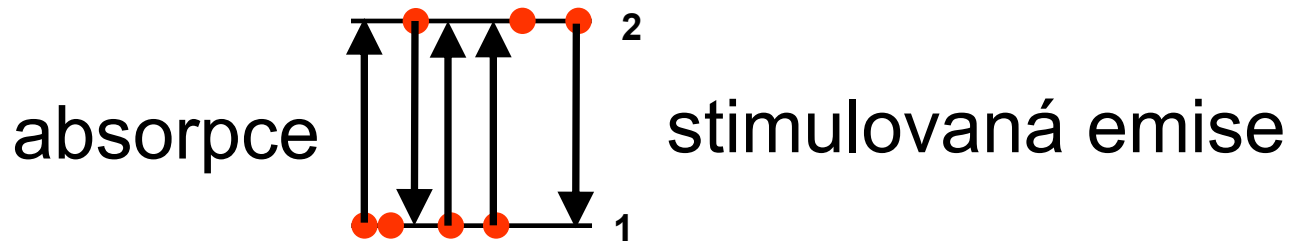
Poměry mezi stimulovanou emisí a absorpcí

$$\frac{d P_{1 \rightarrow 2}}{d t} = B_{12} w_{12}$$

$$\frac{d P_{2 \rightarrow 1}}{d t} = B_{12} w_{12} + A_{12}$$

Mnoho atomů, molekul,

**Nelze rozlišit mezi původními fotony
a fotony pocházejícími ze stimulované
emise**



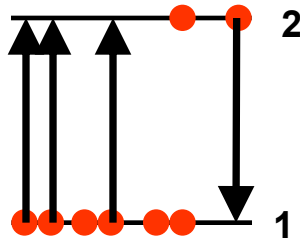
Poměry mezi stimulovanou emisí a absorpcí

$$\frac{d P_{1 \rightarrow 2}}{d t} = B_{12} w_{12}$$

$$\frac{d P_{2 \rightarrow 1}}{d t} = B_{12} w_{12} + A_{12}$$

Mnoho atomů, molekul,

**Termodynamická
rovnováha**



absorpce >> stimulovaná emise

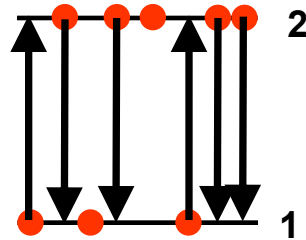
Poměry mezi stimulovanou emisí a absorpcí

$$\frac{d P_{1 \rightarrow 2}}{d t} = B_{12} w_{12}$$

$$\frac{d P_{2 \rightarrow 1}}{d t} = B_{12} w_{12} + A_{12}$$

Mnoho atomů, molekul,

**Inverzní populace
stavů 1 a 2**

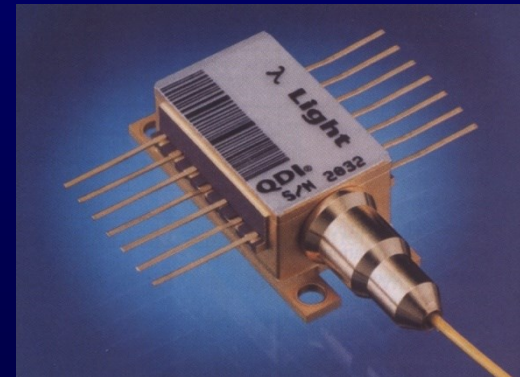


absorpce < stimulovaná emise

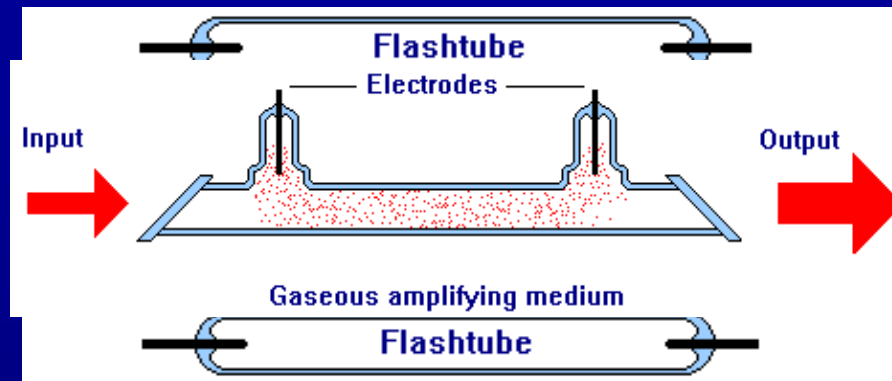
L A S E R

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

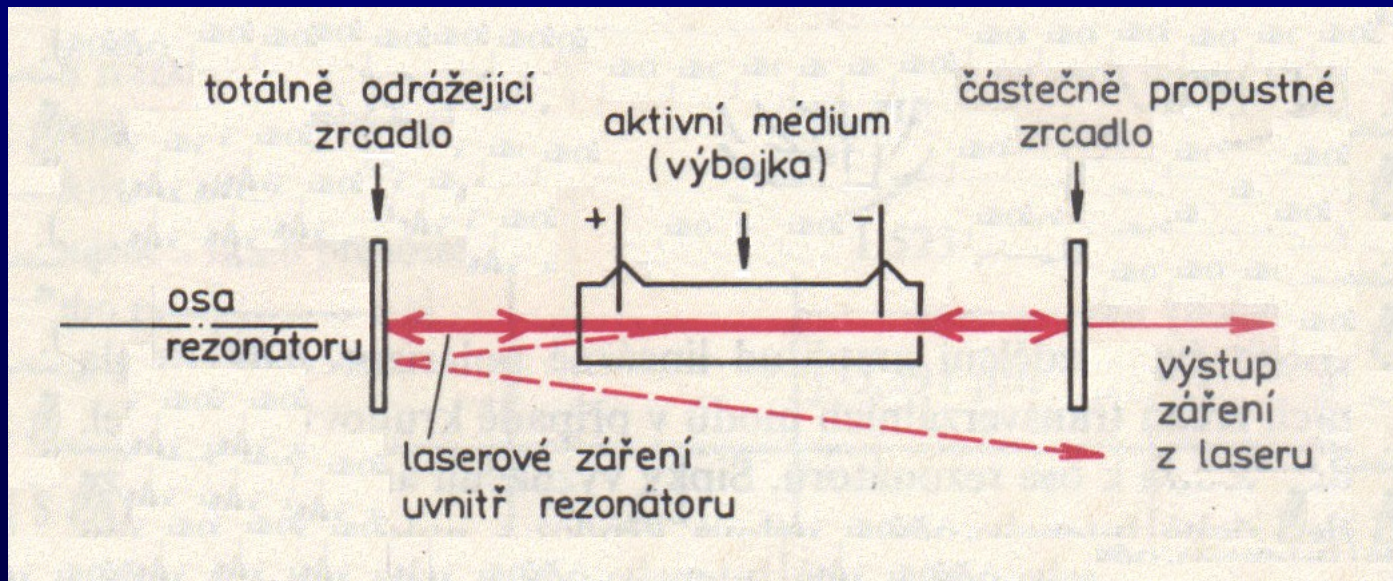
Laser ... generátor optického záření
Generátor = zesilovač + zpětná vazba



Zesílení stimulovanou emisí v aktivním médiu



Zavedení optické zpětné vazby - *rezonátor*



Vlastnosti laserového záření

směrovost

koherence

časový režim

polarizace

Typy laserů

hlavní rozdělení podle aktivního media

plynové

pevnolátkové, (polovodičové)

kapalinové

He-Ne laser

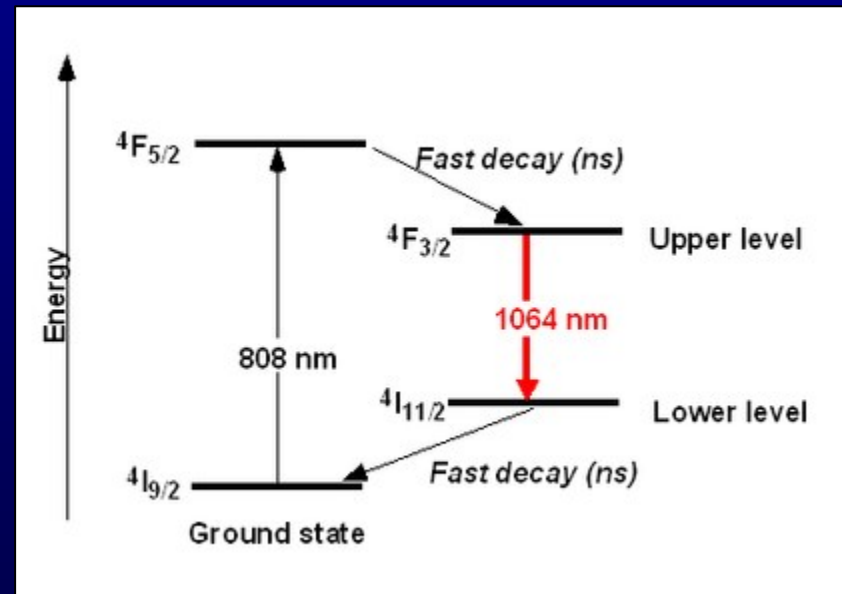
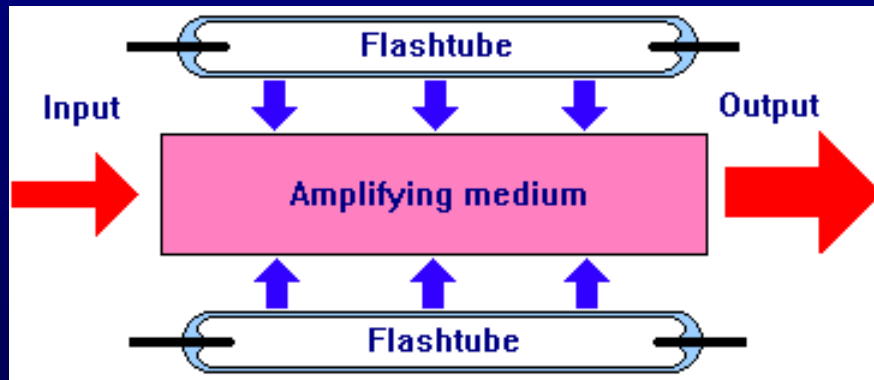
plynový, na neutrálních atomech

kontinuální, pevná vlnová délka viditelná (obvykle 633nm)
mechanismus přenosu excitační energie od He k Ne



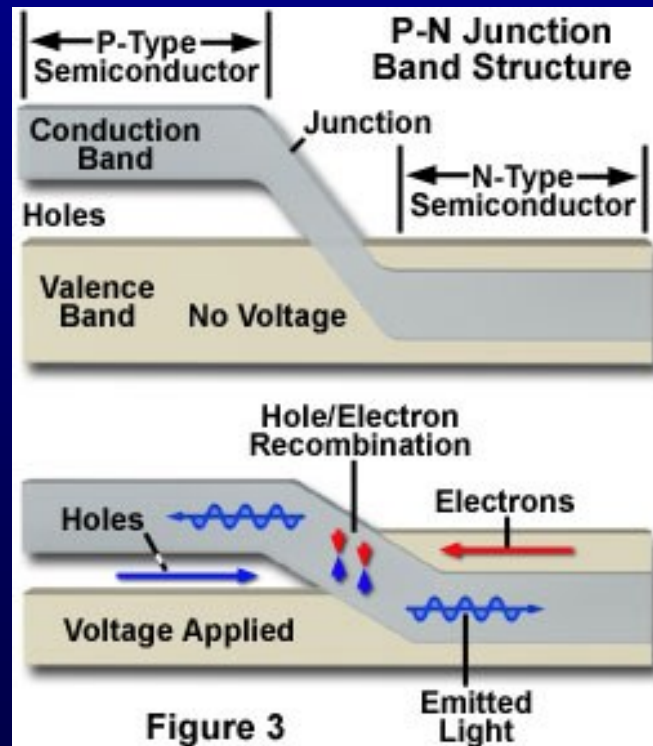
Nd:YAG laser pevnotátkový

příměs v krystalu, přenos energie na příměs
optické čerpání – výbojka, LED, polovodičový laser
pevná vlnová délka
pulsní, ale může být i kontinuální
blízká infračervená oblast



GaAs laser polovodičový

zářivá rekombinace elektronů a děr na P-N přechodu
fixní vlnová délka, nejčastěji v červené nebo blízké infračervené oblasti
vysoká účinnost, levný, malé rozměry
horší kvalita záření (divergence, módy)



Využití laserů

Optické snímače, optický záznam

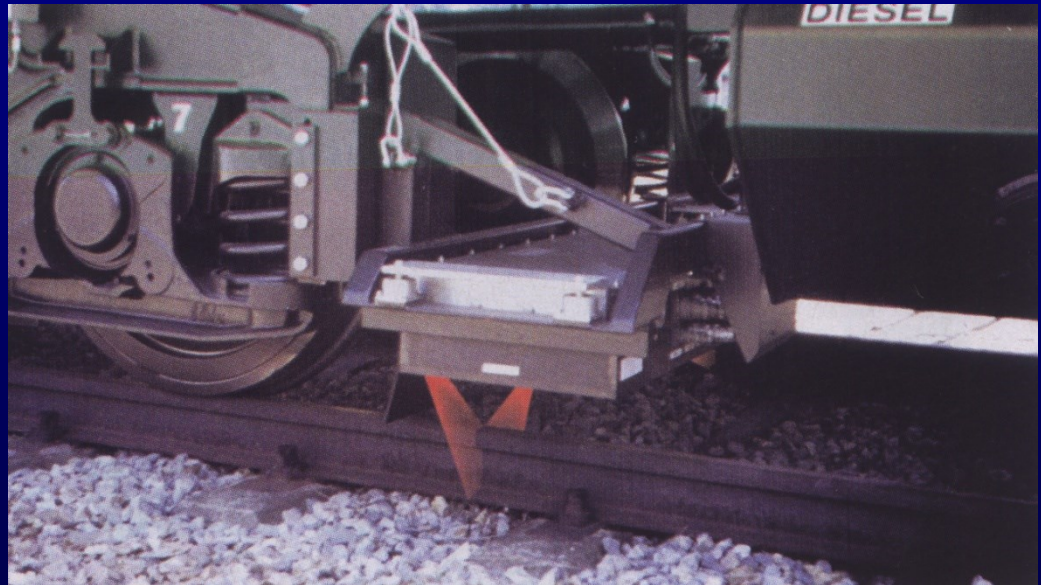
Snímače čárových kódů



CD disky

Laserové tiskárny

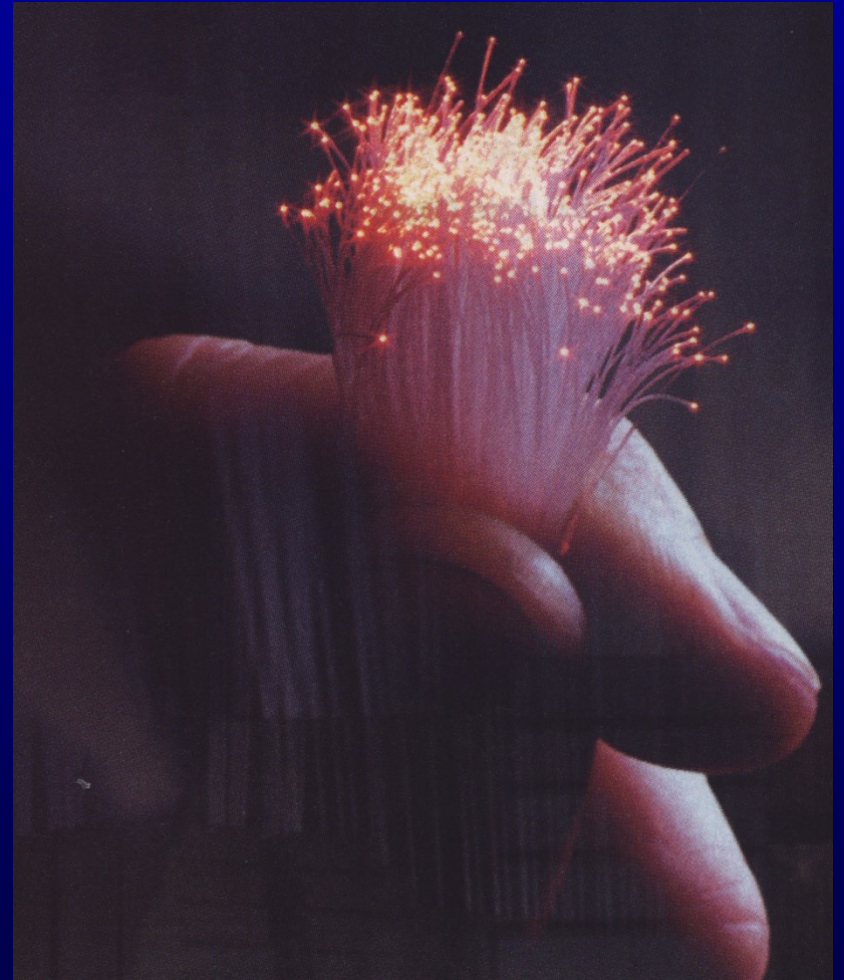
Optická čidla a sondy



Komunikace

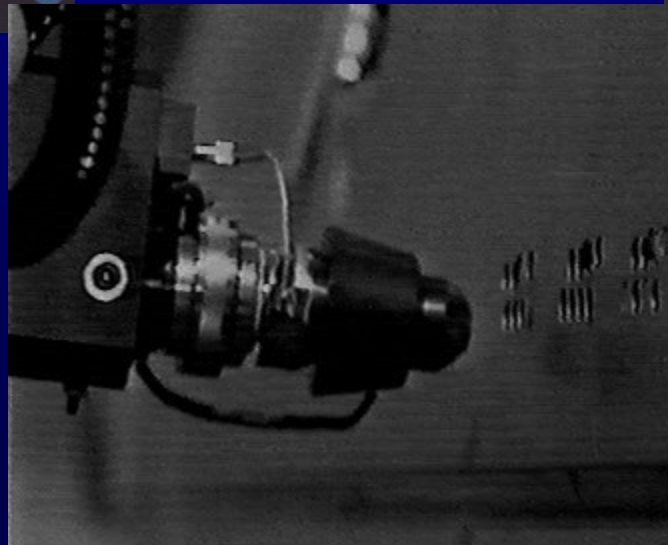
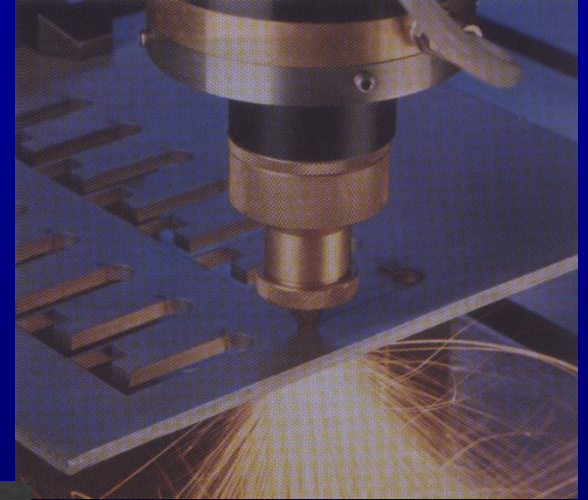
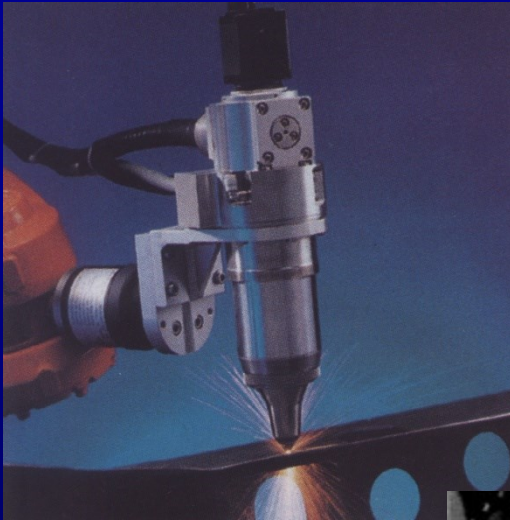
Vláknové komunikace

Komunikace volným prostorem



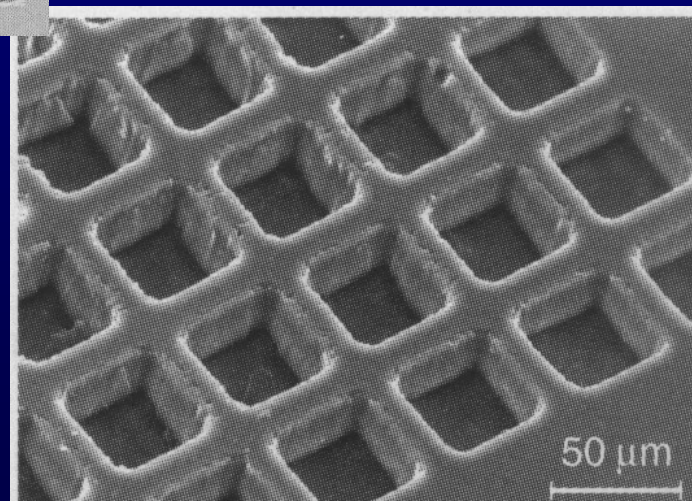
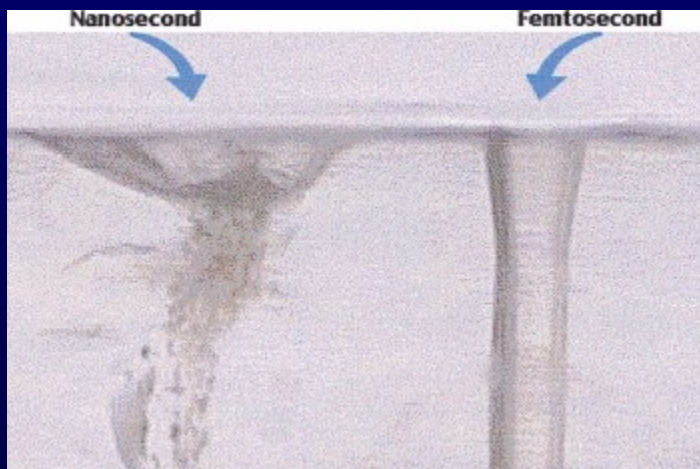
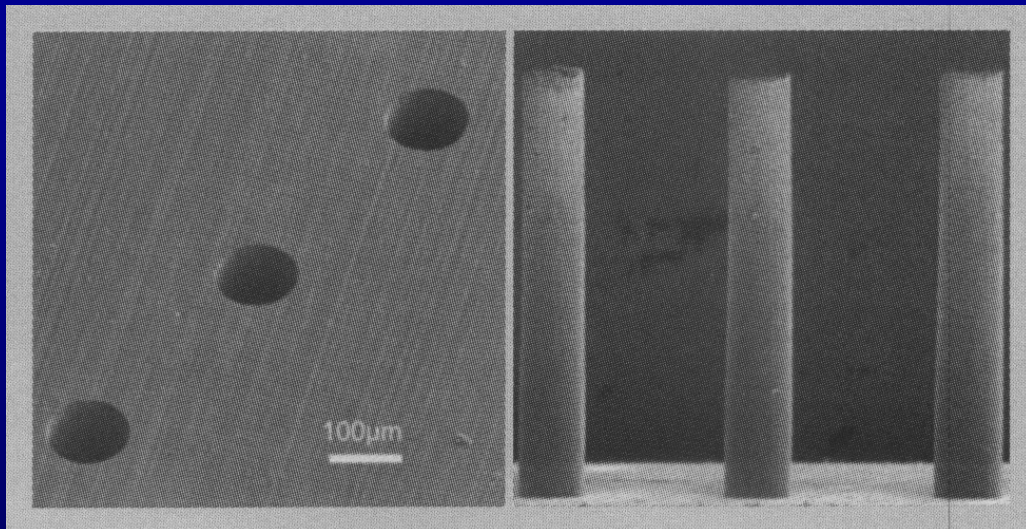
Zpracování materiálů

Laserové obrábění – řezání, vrtání, hloubení, atd.



Zpracování materiálů

Mikroobrábění, laserová litografie



Lékařské aplikace



Dermatologie

Fotodynamická terapie

Laserový skalpel

Oftalmologie

Diagnostika (endoskopie, infračervená tomografie ?)



Výzkum, analýza a technologie

Optická spektroskopie

- Ramanův rozptyl
- časově-rozlišená měření
- mikrofluorimetrie
- nelineární spektroskopie
- elastický rozptyl
- dynamický a Brillouienův rozptyl
- fotoakustická spektroskopie

Aktivní použití laseru

- laserové ablace
- řízená fotochemie a fotodegradace
- řízená polymerace
- laserová pinzeta

V čem jsou lasery nebezpečné

Hlavní nebezpečí pro **zrak** –
oproti klasickým zdrojům úzký svazek a velká rovnoběžnost

