

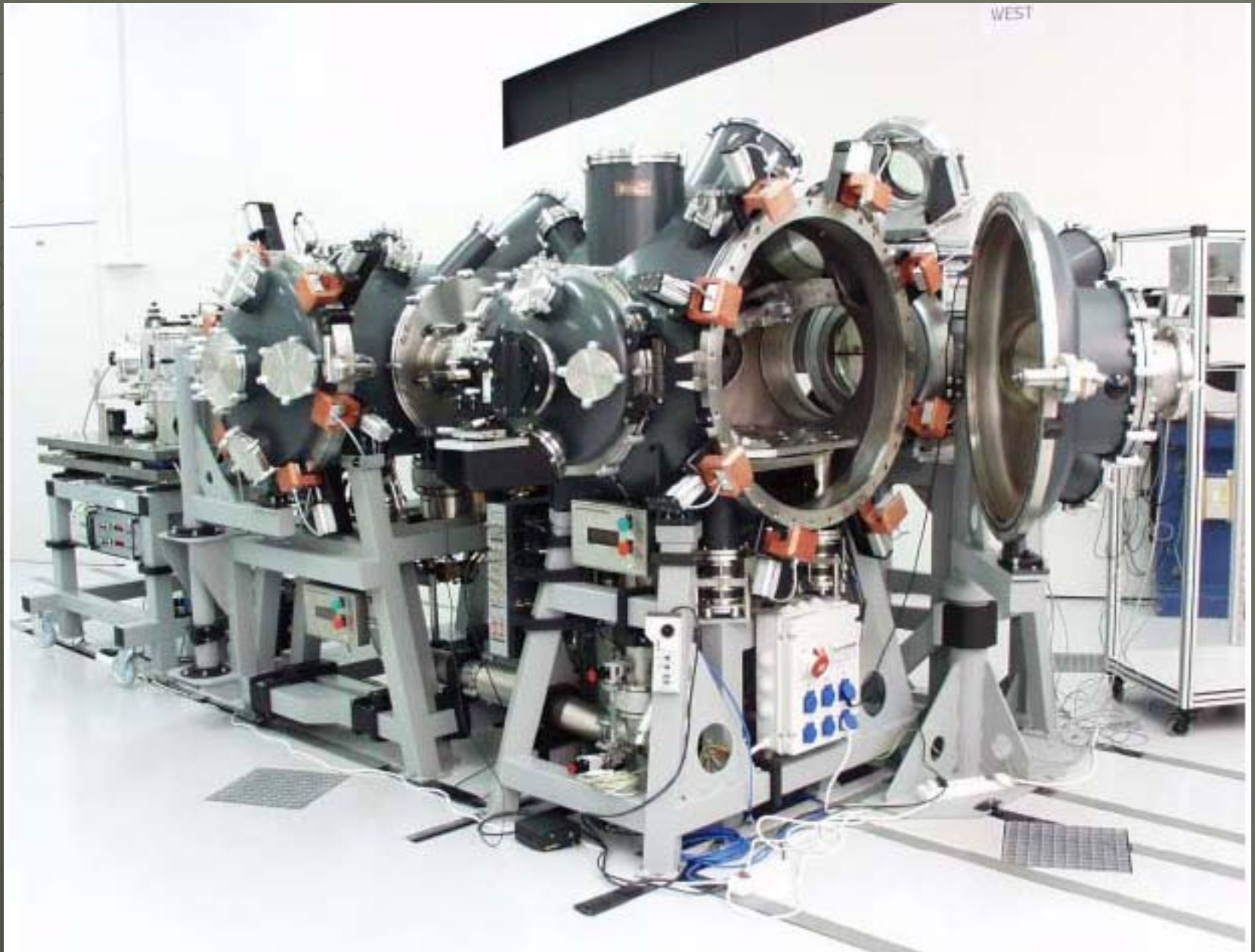


# Lasery

pro LIBS a ablaci







# Lasery – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

- ◆ Spektrální rozsah 1 mm – 50 nm, experimentálně RTG oblast do 1 nm, výzkum možností do 0,01 nm – především jako generátory záření
- ◆ Pro oblasti submilimetrových až centimetrových vln masery (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) - především jako nízkošumové zesilovače radiových signálů

# Vlastnosti záření laseru

- ◆ Emise elementárních oscilátorů (atomů, molekul...) do úzkého svazku – **prostorová koncentrace energie**
- ◆  $\Delta\lambda$  může být velmi malá – spektrální koncentrace energie
- ◆ Synchronní činnost elementárních oscilátorů – **časová koncentrace energie**
- ◆ Koherenční vzdálenost až desítky (ve vakuu až tisíce) kilometrů

# Spontánní emise

- ◆ Pravděpodobnost absorpce fotonu:

$$w_{01} = n_0 \rho(\nu) B_{01}$$

- ◆ Pravděpodobnost spontánní emise:

$$w_{10} = n_1 A_{10}$$

● = electron

\_\_\_\_\_ 1

\_\_\_\_\_ ● \_\_\_\_\_ 0



# Stimulovaná emise

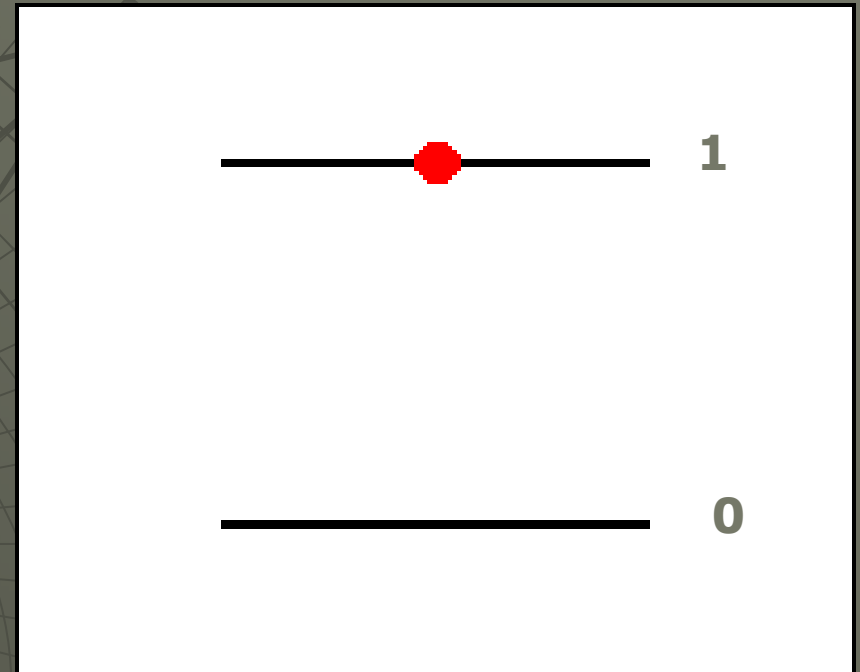
- ◆ Pravděpodobnost stimulované emise:

$$w_{10} = n_1 \rho(\nu) B_{10}$$

- ◆ Proces interakce se zářením:

$$n_0 \rho(\nu) B_{01} =$$

$$n_1 \rho(\nu) B_{10} + n_1 A_{10}$$



# Inverzní populace

- ◆ Einsteinovy koeficienty pro stimulovanou emisi i absorpci jsou si rovny:

$$B_{01}=B_{10}=B$$

- ◆ Pro absorpci záření platí:

$$d\Phi_A = h\nu n_0 B \rho(\nu) dt$$

- ◆ Pro stimulovanou emisi platí:

$$d\Phi_E = h\nu n_1 B \rho(\nu) dt$$

- ◆ Celková změna zářivého toku:

$$d\Phi/dt = h\nu (n_1 - n_0) B$$

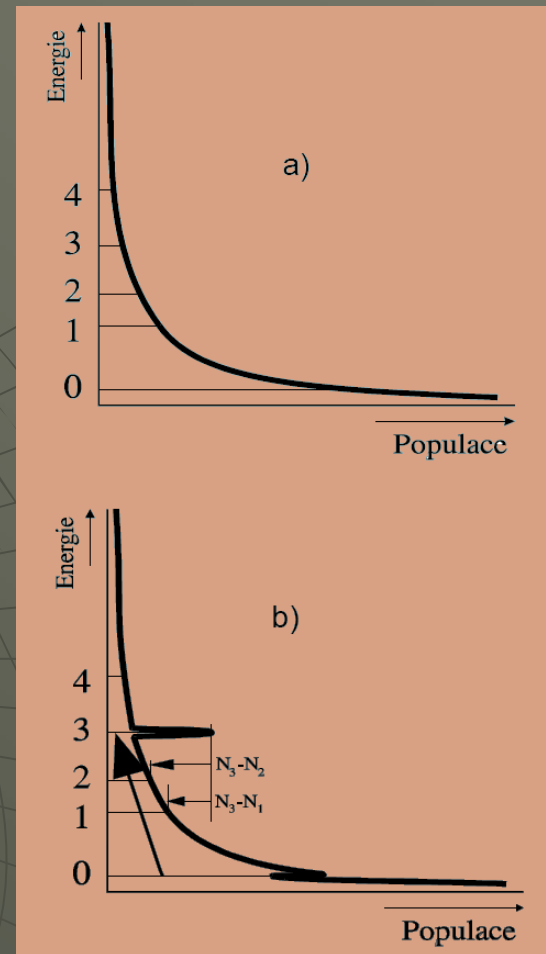
- ◆ Podmínka pro zesílení záření:

$$n_1 - n_0 > 0, \text{ tj. inverzní populace}$$

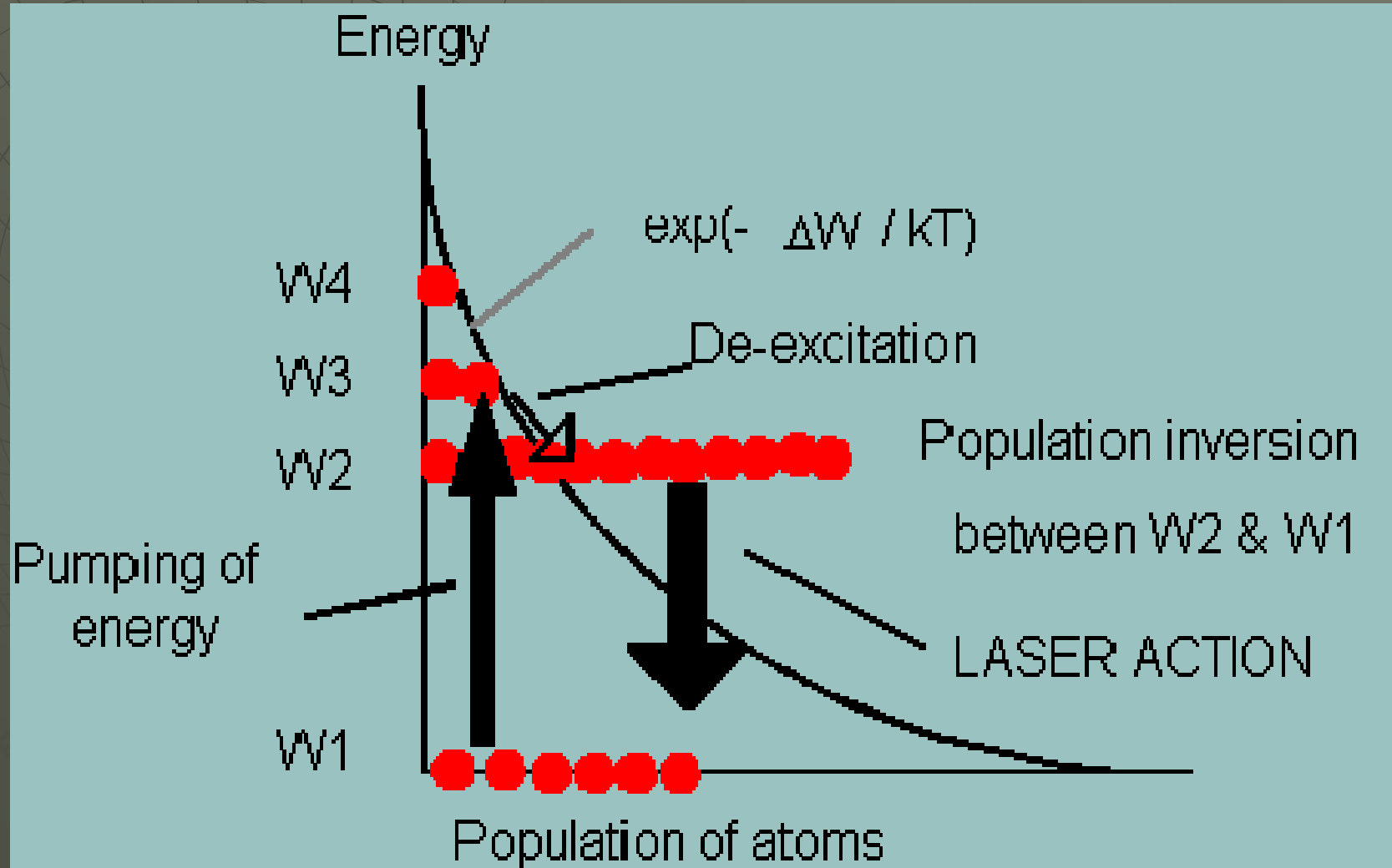


# Inverzní populace

- ◆ Běžné rozložení populace zachycuje obrázek a). Pro vytvoření aktivního prostředí je třeba zasáhnout do systému tak, abychom změnili distribuci obsazení energetických hladin způsobem, znázorněným např. na obrázku b). Proces se obvykle označuje jako buzení laserů nebo čerpání. Základní metodou je optické buzení.

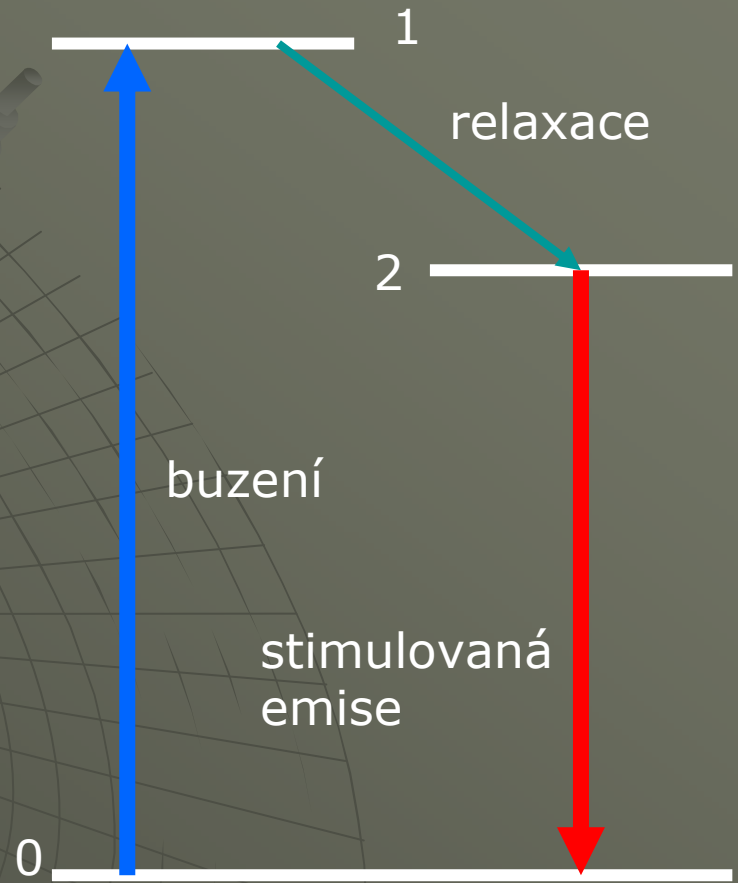


# Inverzní populace



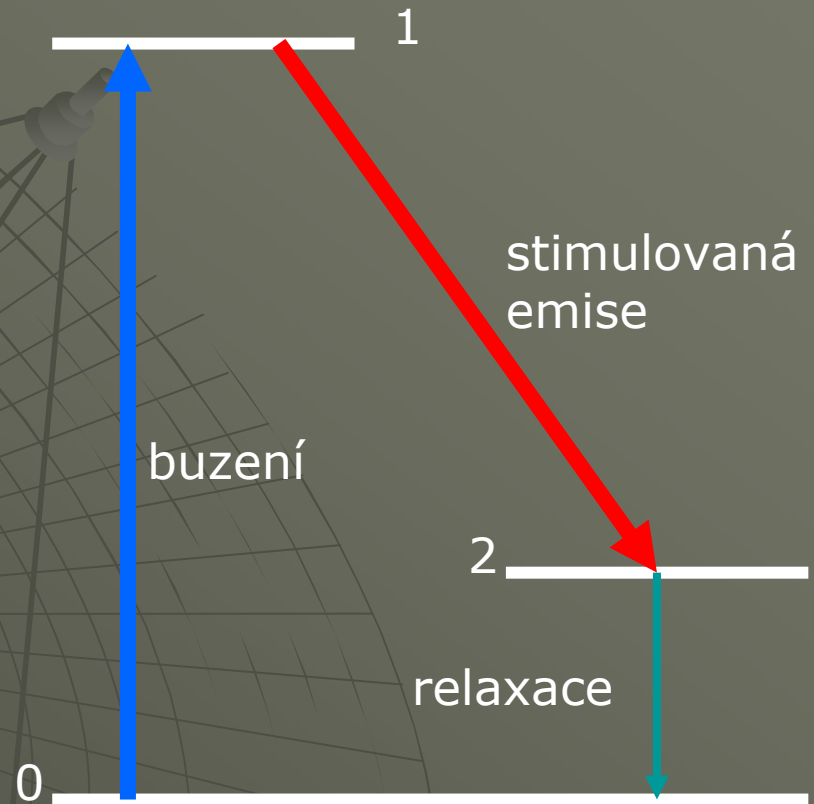
# Tříhladinový systém

- ◆ Aplikace: rubínový laser
- ◆ Hladina 2 je metastabilní
- ◆ Nevýhodou je malá účinnost – pro inverzní populaci je nutné minimálně 50% částic převést na hladinu 2



# Tříhladinový systém

- ♦ Modifikovaný tříhladinový systém s buzením na metastabilní hladinu 1.





# Čtyřhladinový systém

◆ Příklad – laser

◆ Nd:YAG

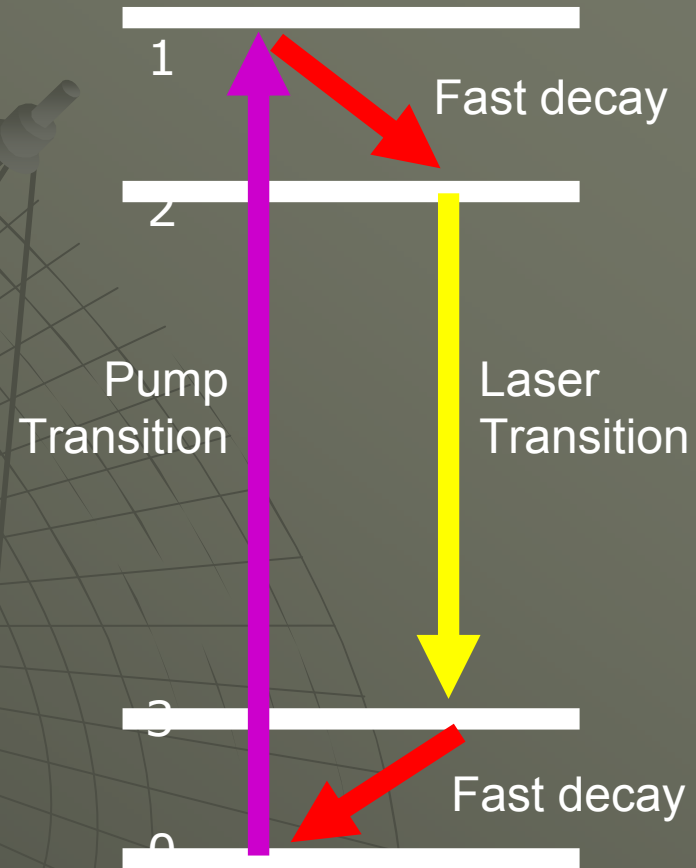
◆ Vysoká účinnost

◆ Inverzní populaci

je nutné vytvořit

pouze mezi

hladinami 2 a 3



# Zesílení záření

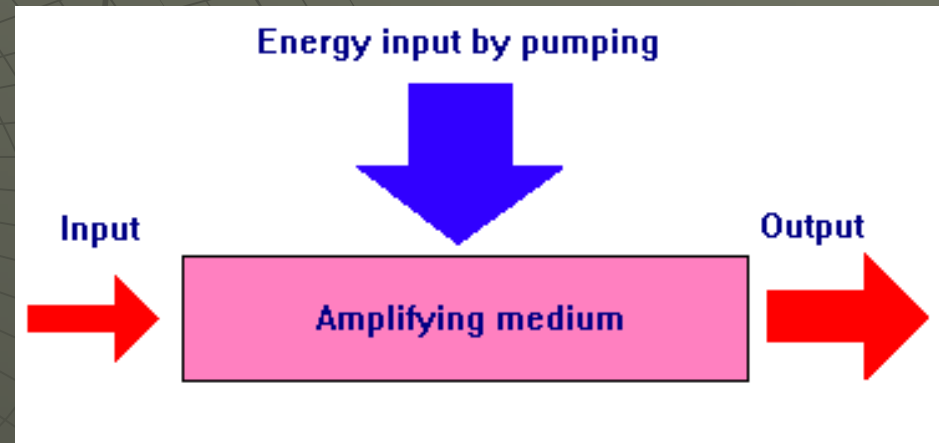
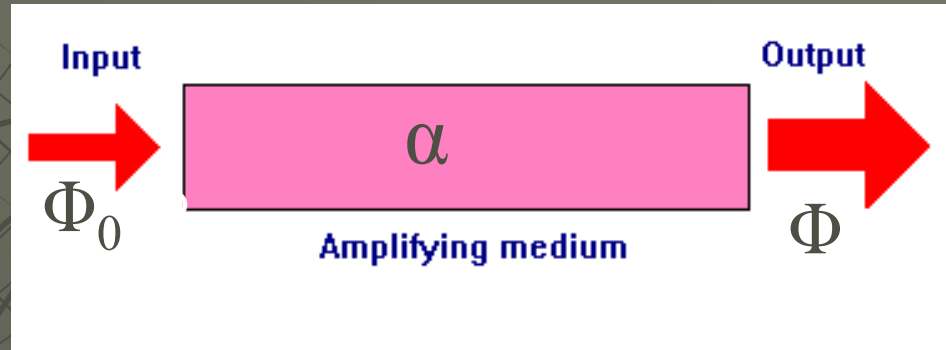
- ◆ Aktivní prostředí zesiluje vstupující záření:

$$\Phi = \Phi_0 \exp[-l(\alpha + \beta)]$$

kde  $\alpha$  je absorpční koeficient ( $\alpha < 0$ )

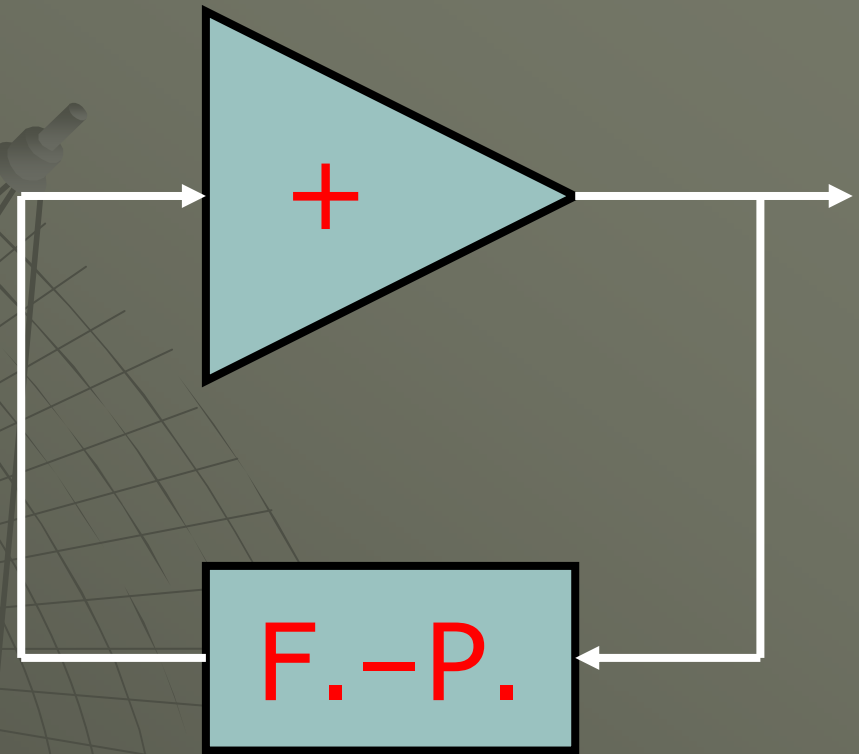
a  $\beta$  jsou ztráty ( $\beta > 0$ )

$l$  je délka aktivního prostředí



# Generace záření

- ◆ Zavedením kladné zpětné vazby z výstupu na vstup zesilovače obdržíme oscilátor, jehož frekvence je dána zesilovačem a obvodem zpětné vazby, obvykle realizované Fabry-Perotovým rezonátorem

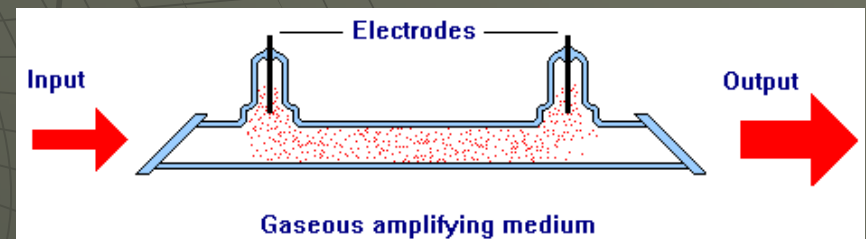
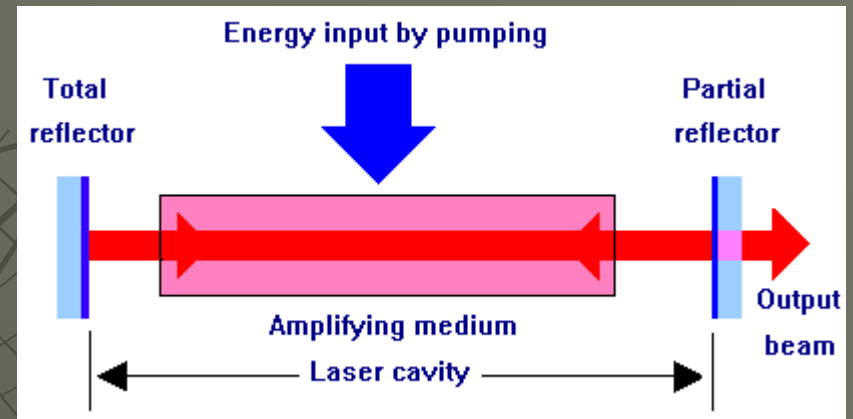


# Generace záření laserem

- ◆ Zpětná vazba je obvykle realizována Fabry-Perotovým rezonátorem.
- ◆ Pro generaci krátkých pulzů musí být frekvenční šířka pásma zesilovače minimálně:

$$\Delta f = 1/2\tau$$

kde  $\tau$  je šířka pulzu

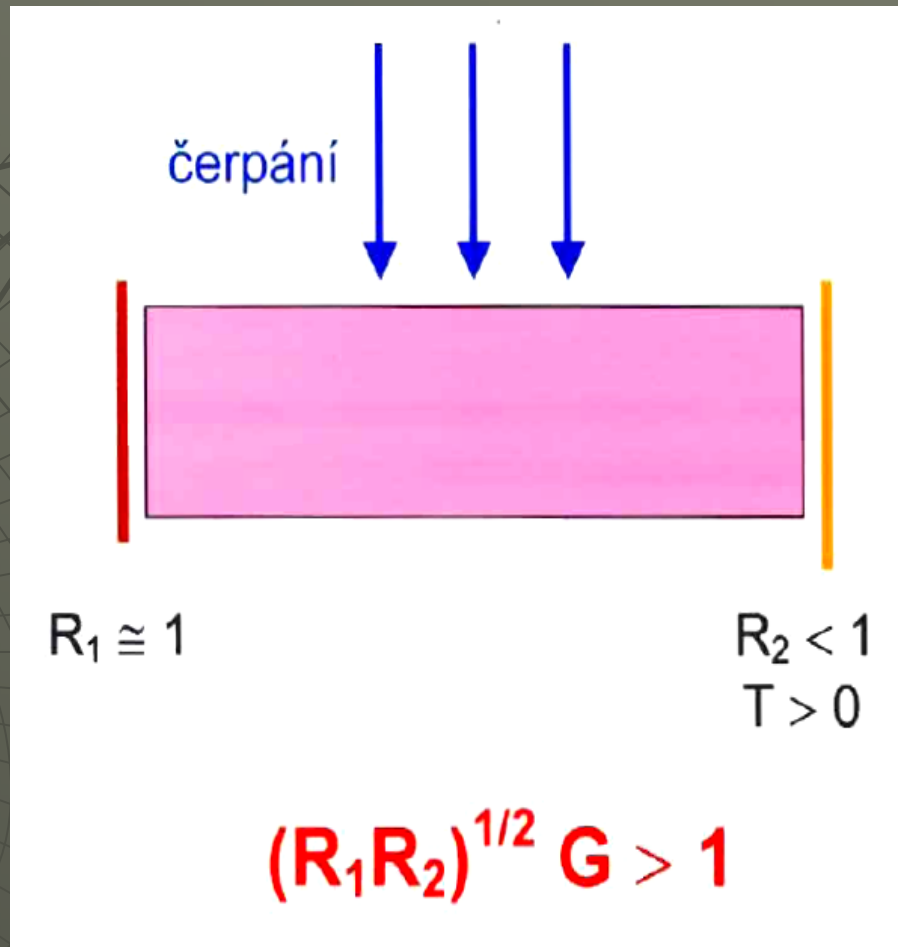




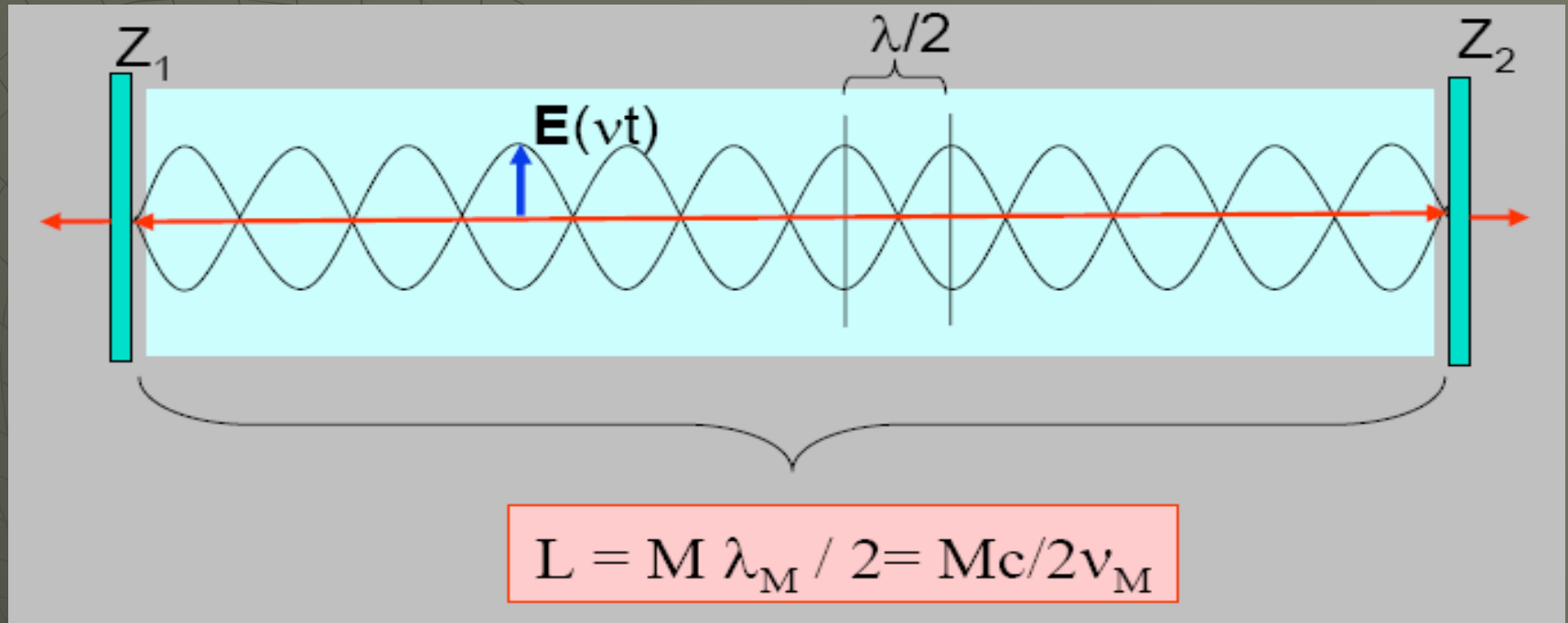
# Podmínky pro generaci záření

- ◆ Odrazivost zrcadel musí být volena s ohledem na zesílení aktivního prostředí tak, aby ztráty nepřevýšily zesílení aktivního prostředí  $G$ :

$$R_1 R_2 \exp[-2l(\alpha + \beta)] \geq 1$$



# Optický rezonátor



Délka rezonátoru  $L$  je  $M$  násobkem půlvlny ( $M$  je celé číslo). Délce  $L$  odpovídají **vlastní frekvence** rezonátoru  **$v_M$  (podélné módy laseru)**. Uvnitř rezonátoru je **stojaté vlnění** elektrického pole  $E$  o frekvenci  **$v_M = c/\lambda_M$**

# Fabry – Perot etalon

- ♦ Jakost rezonátoru  $Q$  ( $Q_{\text{FP}} \sim 10^8 - 10^9$ )

pološířka rezonančního profilu:

$$\Delta\nu = \nu_0/Q$$

pološířka podélných módů:

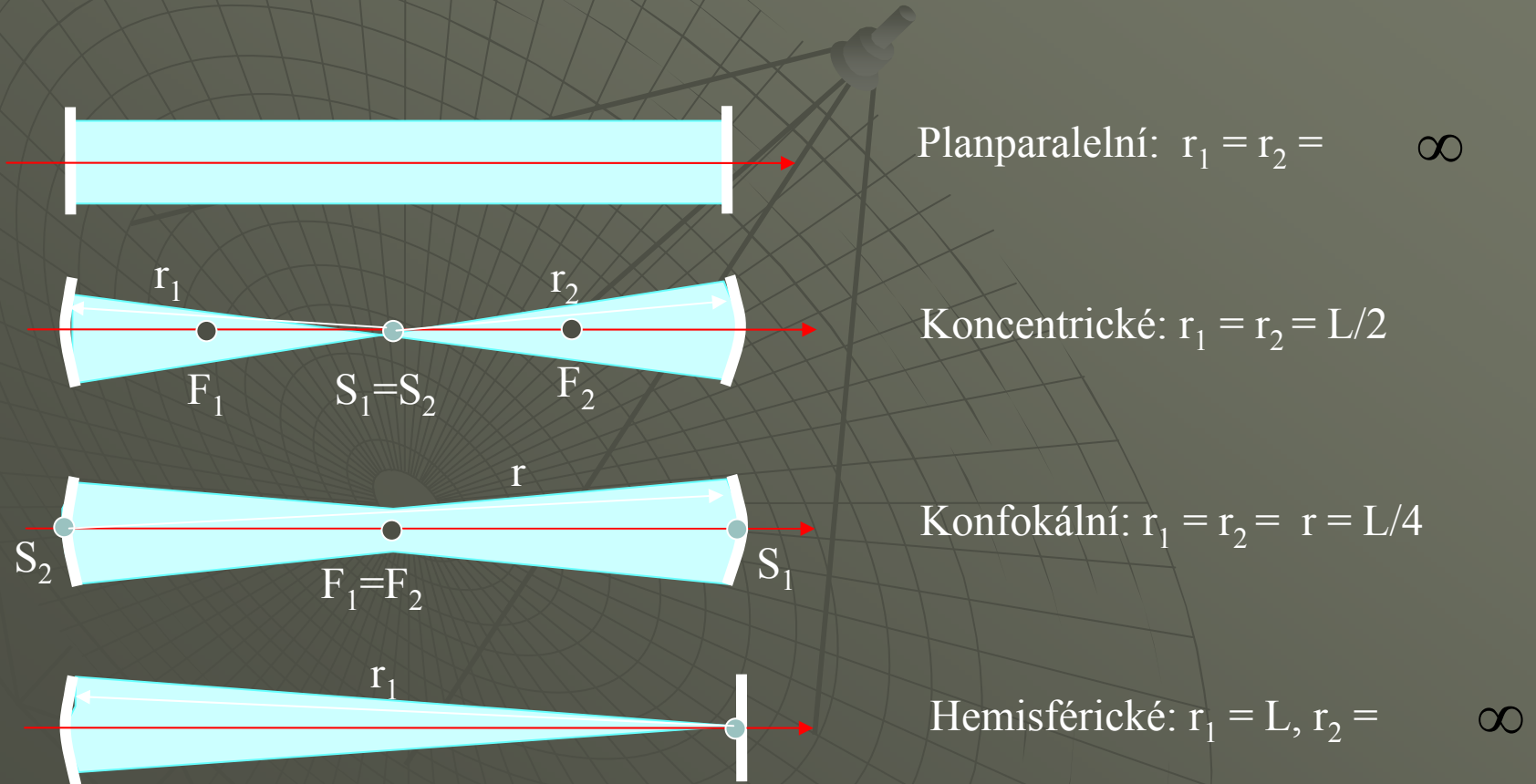
$$\Delta\lambda = \lambda_0^2(1-R)/4\pi R^{1/2}$$

doba života fotonu v rezonátoru:

$$\tau = Q/(2\pi\nu_0)$$

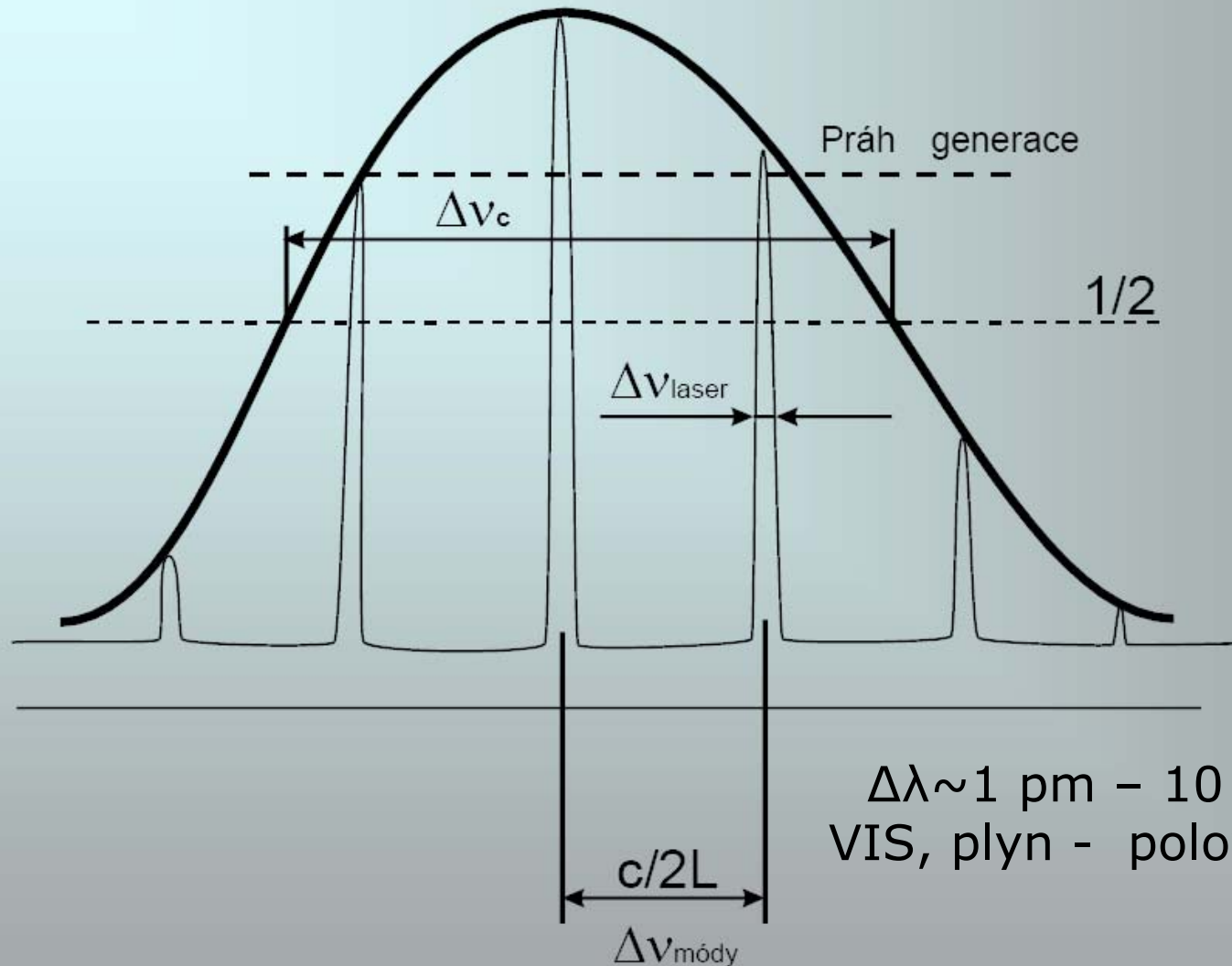
# Optické rezonátory

Objem optického (elektrického) pole náležející rezonátoru



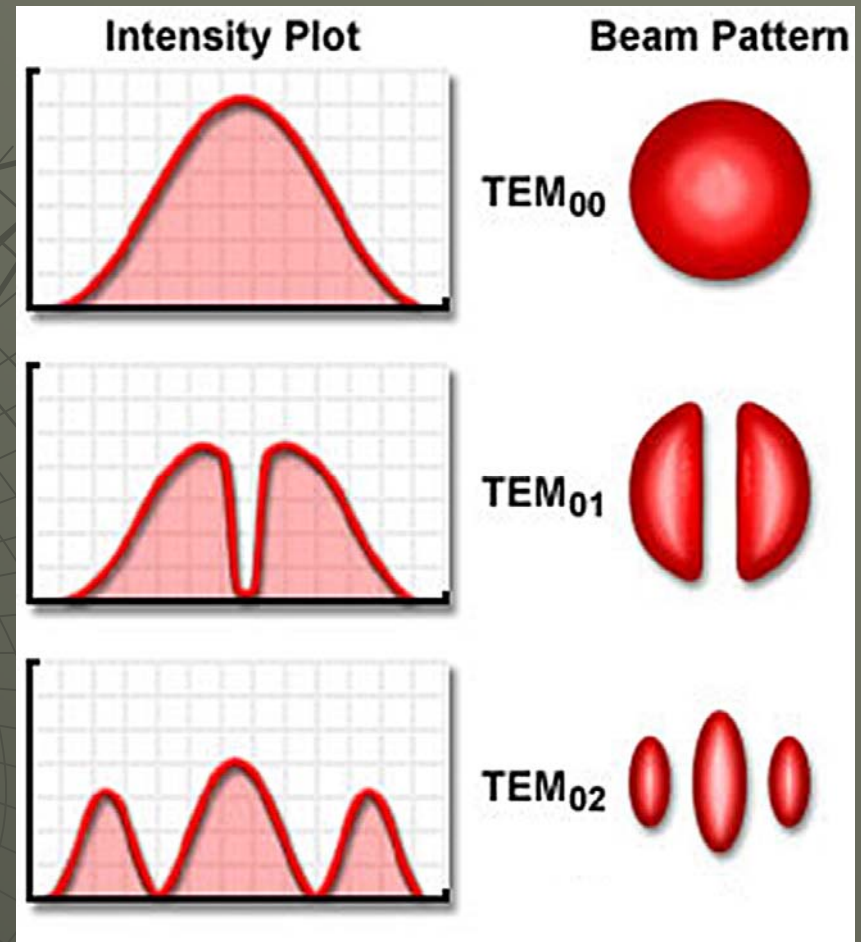


# Rezonance základního podélného módu



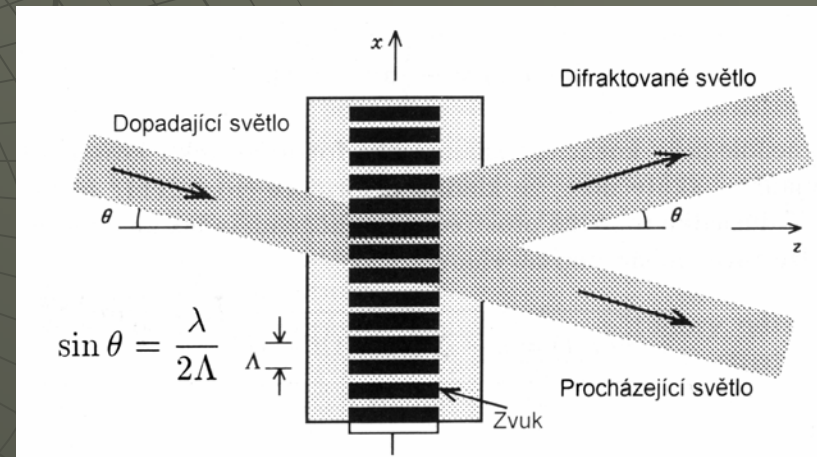
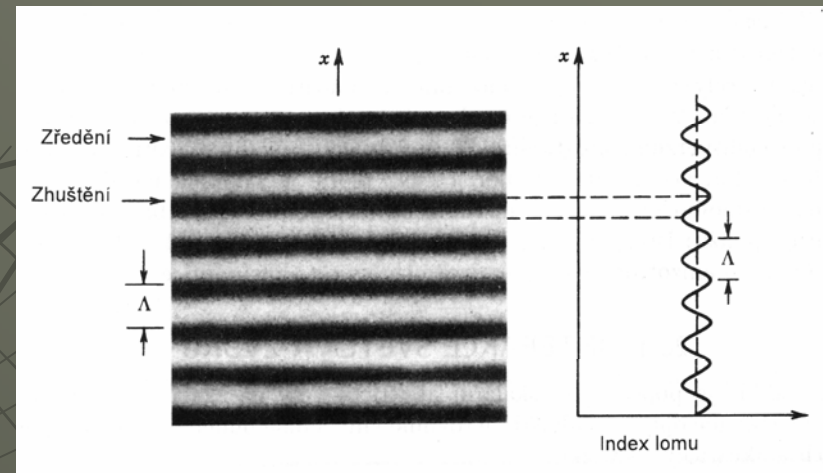
# Příčné módy rezonátoru

- ◆ Příčné módy jsou charakterizovány dvojicí čísel  $m$  a  $n$ . Tato čísla znamenají počet uzlů stojatého vlnění na osách ( $x$ ,  $y$ ) kolmých k optické ose. Počet uzlů stojatého vlnění / na optické ose je vysoký a neuvádí se. Základním módem je  $TEM_{00}$ , ve kterém má průběh intenzity záření Gaussův profil.



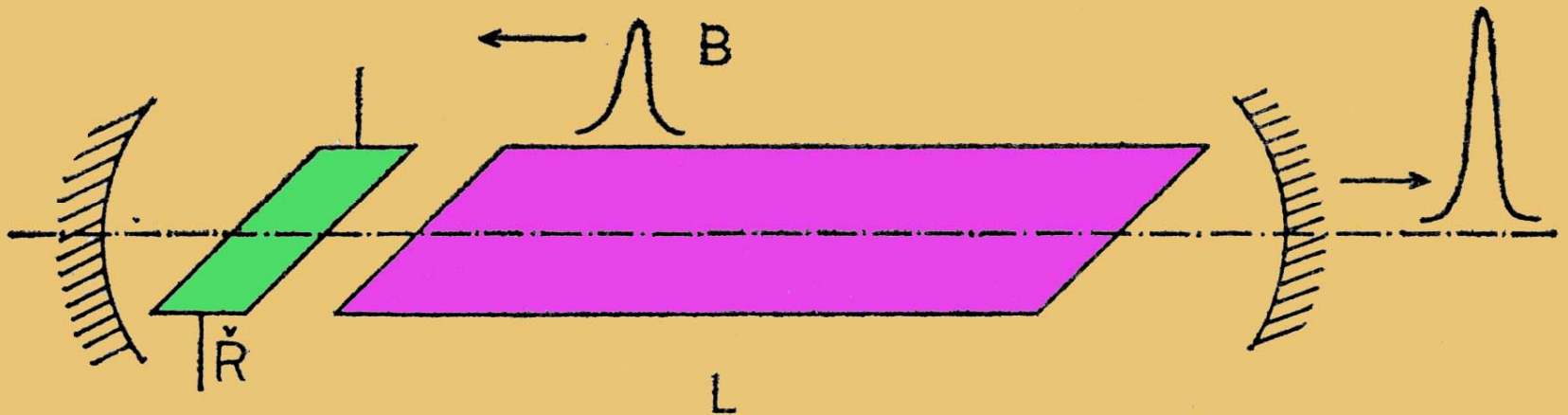
# Optoakustický modulátor

- ◆ Šíří-li se zvuk optickým prostředím, dochází ke změně hustoty a tím indexu lomu.
- ◆ Nejjednodušší je Braggova difrakce: akustická rovinná vlna působí částečný odraz záření, vyhovuje-li úhel  $\Theta$  Braggově podmínce (Braggova cela)



# Synchronizace módů

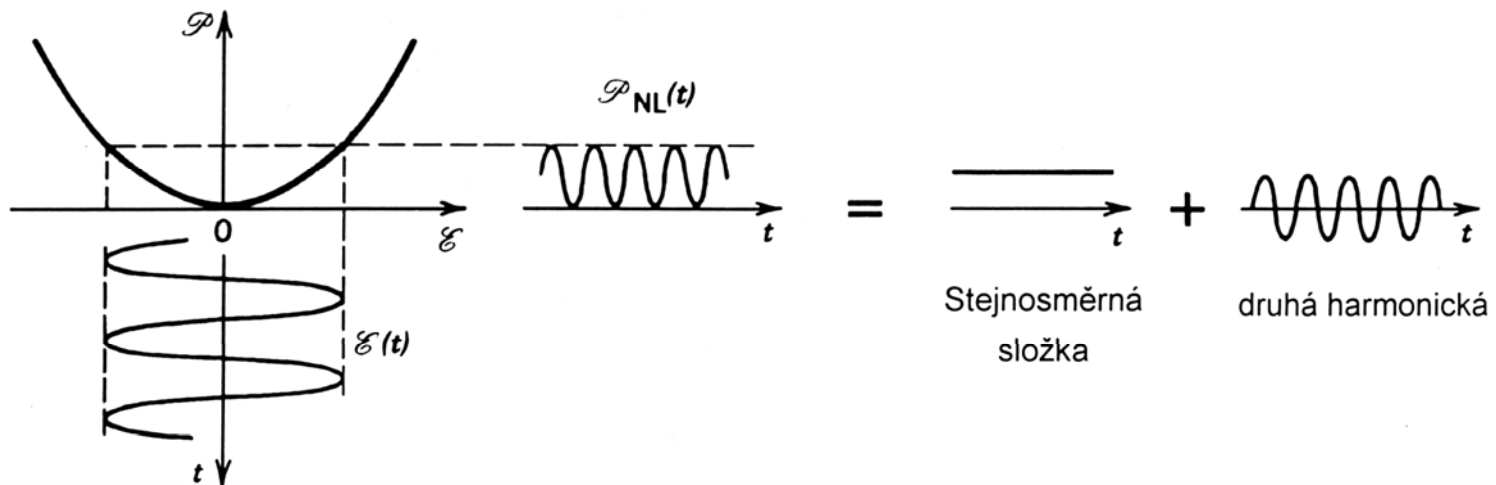
- ◆ Při pasivní nebo aktivní modulaci rezonátoru frekvencí  $f = c/2L$  získáme sled velmi krátkých impulzů, jejichž délka je určena Fourierovým obrazem spektrální čáry a opakovací frekvence dobou průletu oblaku fotonů rezonátorem tam i zpět.





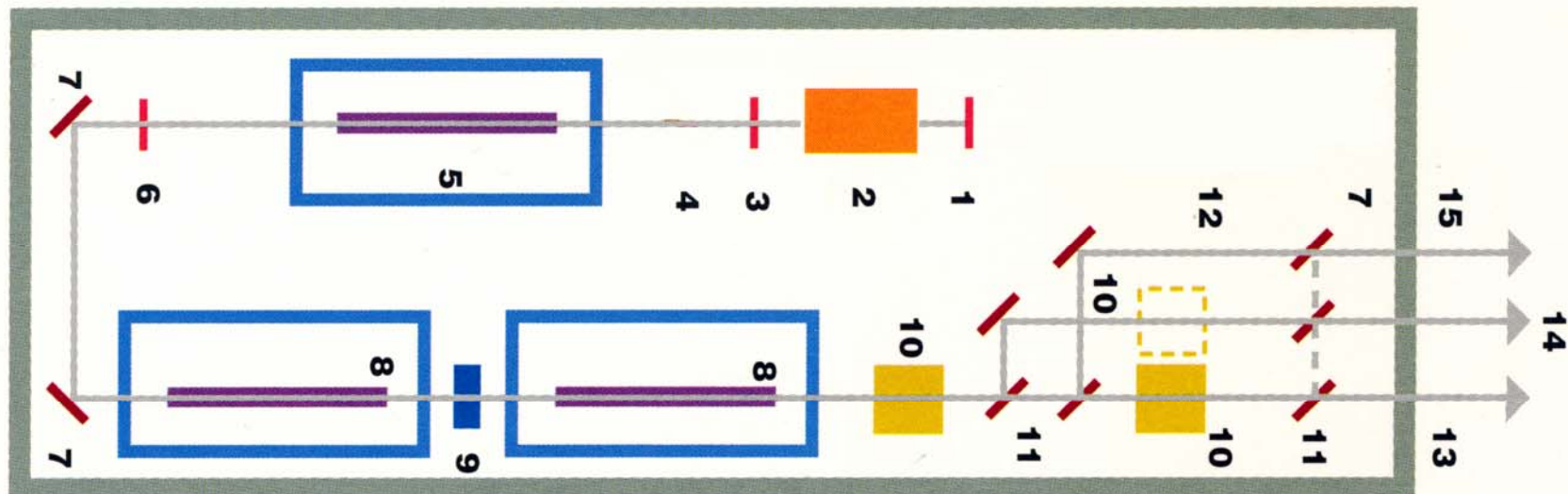
# Frekvenční konverze

- První možností je využít nelineárních jevů druhého (třetího) řádu. Intenzita záření druhé harmonické druhé mocnině koeficientu optické nelinearity a intenzitě záření dopadající vlny, nepřímo úměrná čtvrté mocnině vlnové délky.



# Nd:YAG laser

- ◆ Laser s Q-modulací (1-6), dvoustupňovým zesilovačem (8), kompenzátorem dvojlomu (9) a násobiči frekvence (10), výstup 1064 nm (13), 532/355 nm (14), 266/1064 nm zbytkový (15)

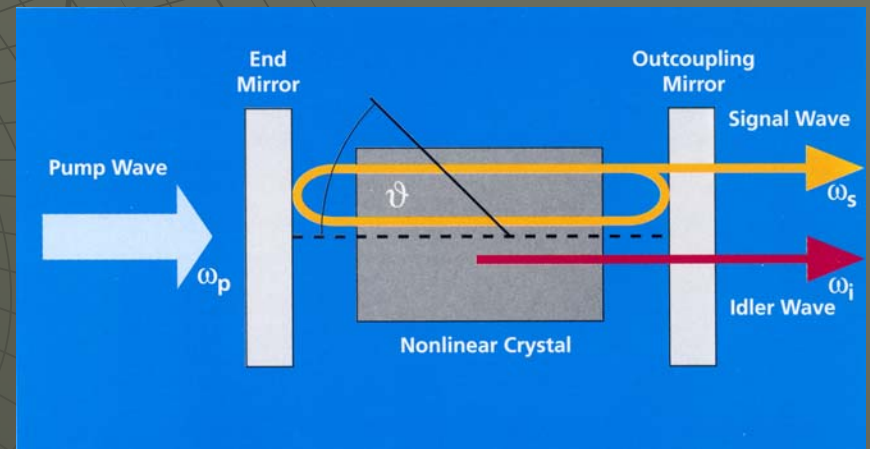
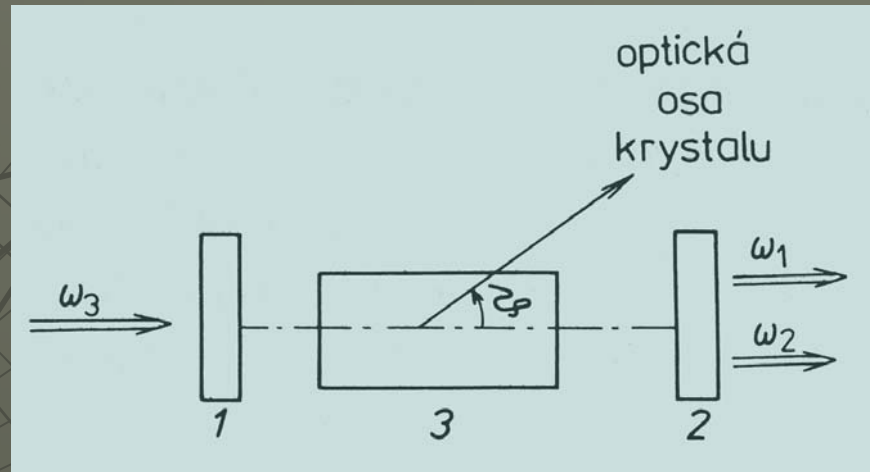


# Nelineární prostředí - krystaly

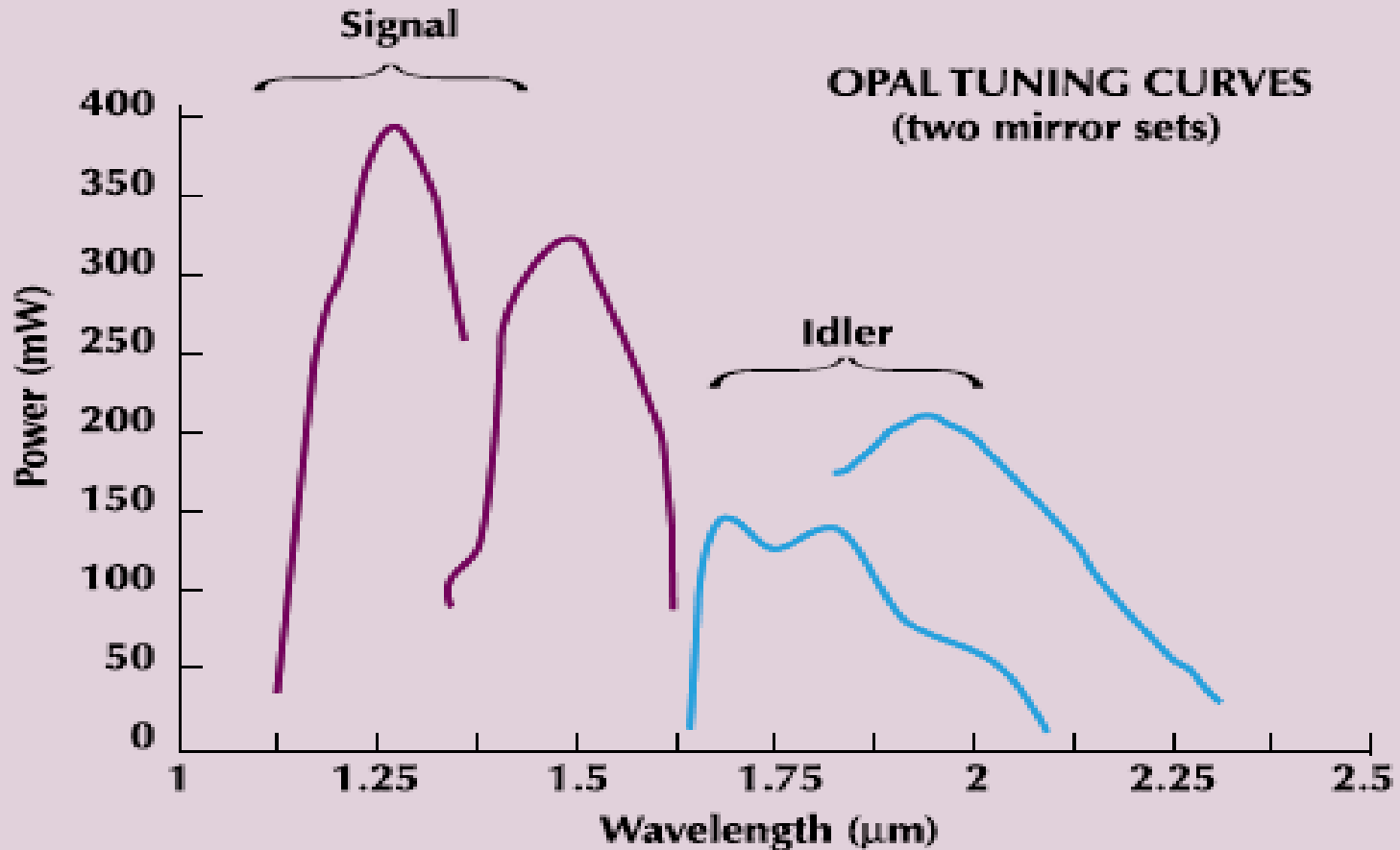
krystal	$\Delta\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	MW/cm <sup>2</sup>
KDP (dihydrogenfosfát draselný)	0,2-1,35	400
KDDP (deuterovaný KDP)	0,2-1,8	500
ADP (dihydrogenfosfát amonný)	0,2-1,2	500
RDP (dihydrogenfosfát rubidný)	0,2-1,5	300
CDA (dihydrogenrsenát cesný)	0,26-1,6	500
LiIO <sub>3</sub>	0,3-4,5	60
LiNbO <sub>3</sub>	0,4-4,5	120
Ba <sub>2</sub> NaNb <sub>5</sub> O <sub>15</sub>	0,38-5	100
HIO <sub>3</sub>	0,4-1,3	100
BBO ( $\beta$ -BaB <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	0,2-1,5	400

# Optical Parametric Oscillator

- ◆ Založen na koherentním rozpadu fotonu o kruhové frekvenci  $\omega_3$  na dva fotony, jejichž kruhové frekvence  $\omega_1$  a  $\omega_2$  (signálová a jalová vlna), při čemž platí:  $\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$  a poměr  $\omega_1 / \omega_2 = f(\nu)$

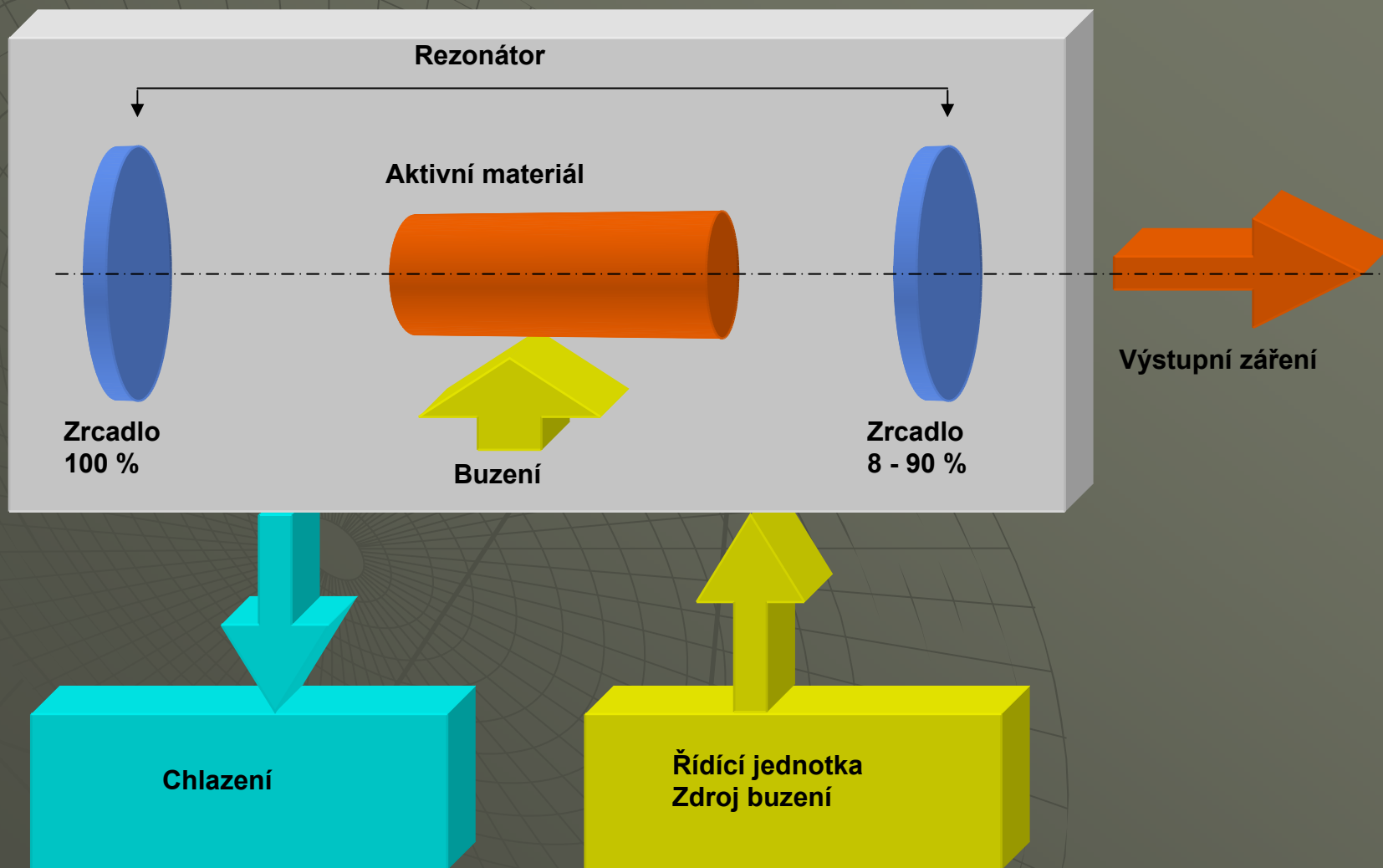


# OPO Spectra Physics





# Pevnolátkový laser

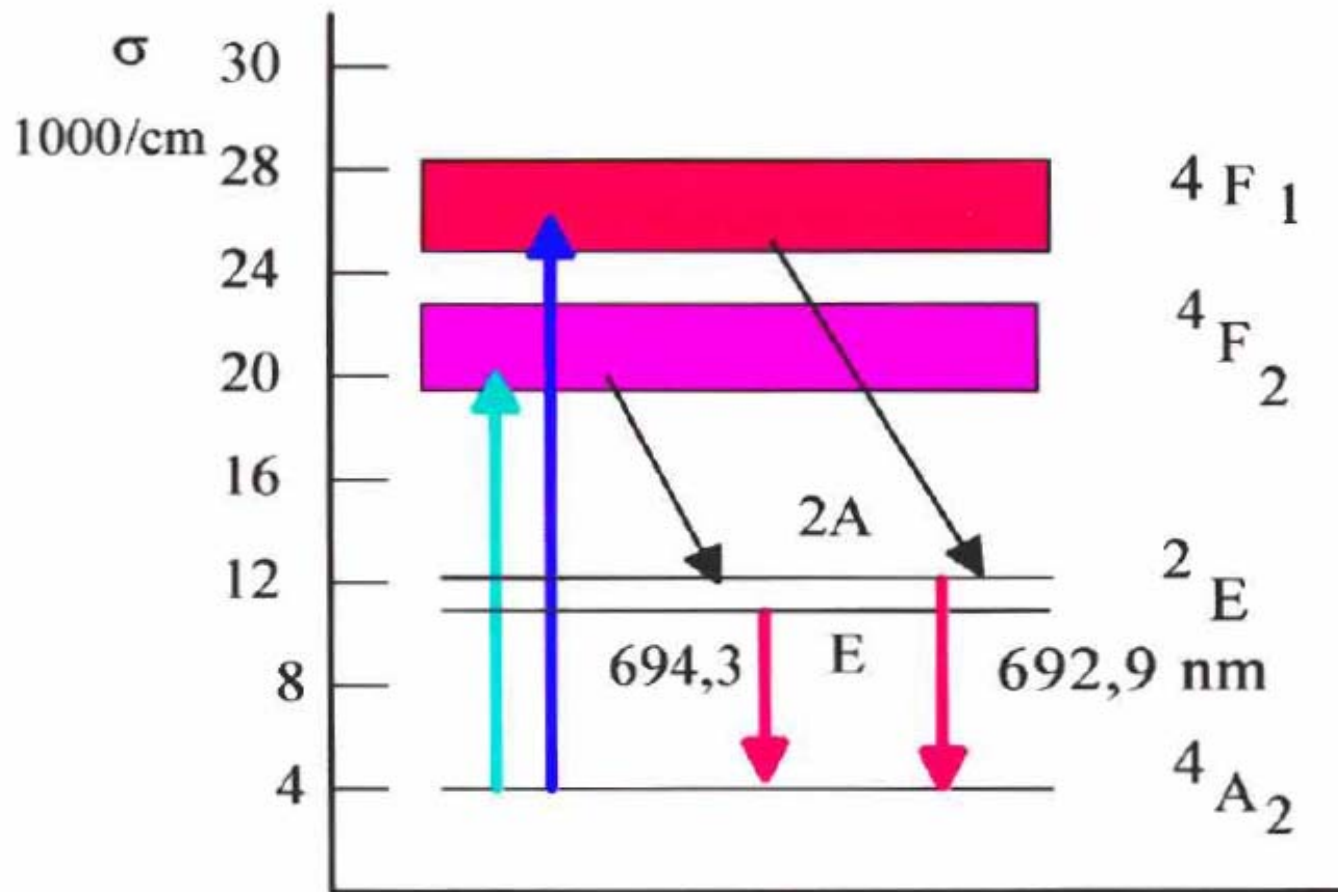


# Rubínový laser ( $\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ )

- ◆ První laser zkonstruovaný T. Maimanem v r. 1960. Používá se v impulsním režimu, výkon ve volně běžícím režimu do 10J (1ms), Q-spínaném režimu pak do 5J (1 – 10 ns)



# Energetický diagram chromu v rubínovém laseru



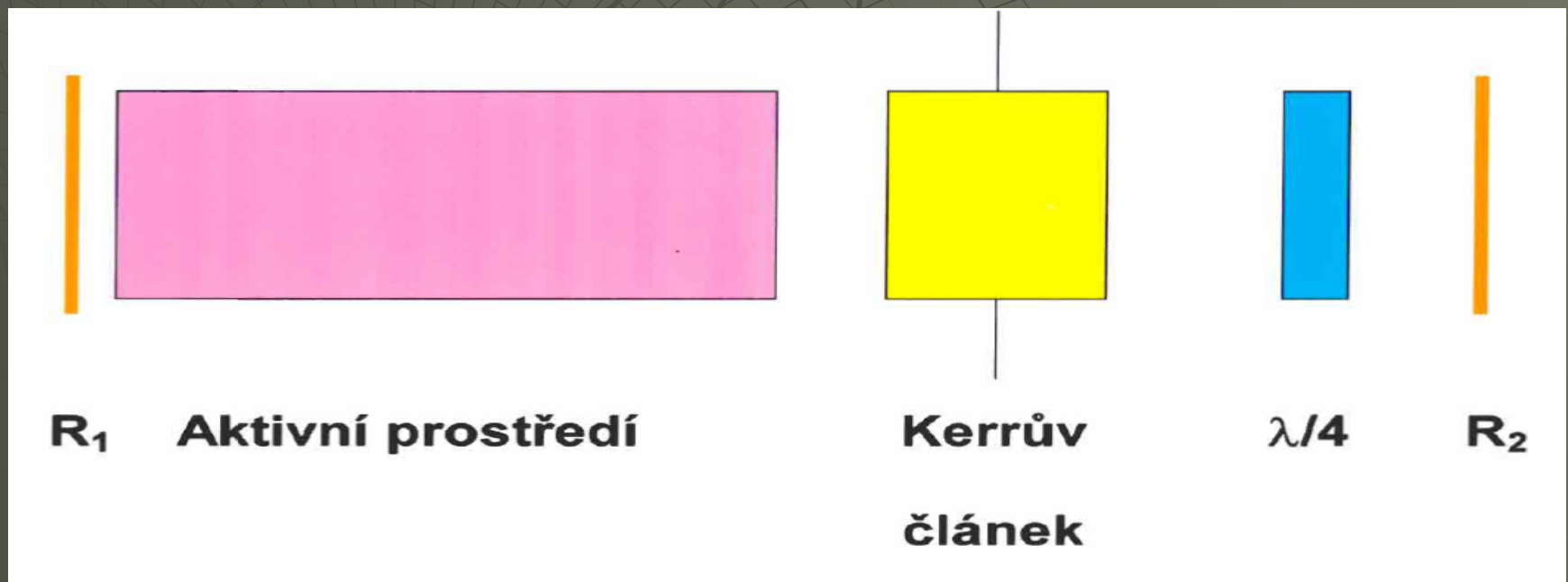
# Pasivní Q-modulace

- ◆ Příklad použití saturačního absorbtoru pro generaci krátkých (nanosekundových) výkonových impulsů (GW) u rubínového laseru



# Aktivní Q-modulace

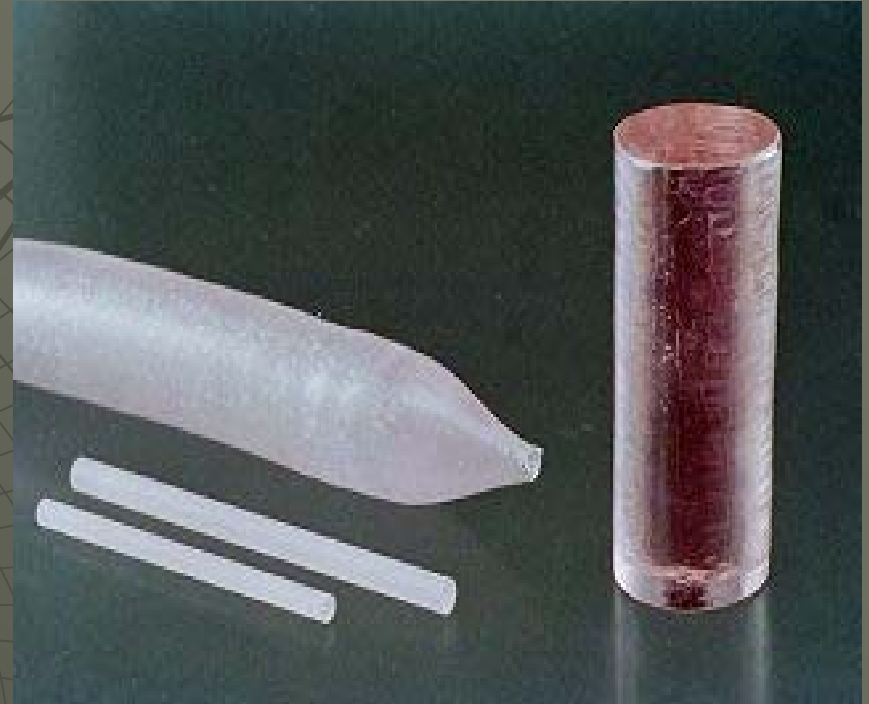
- ♦ V tomto případě je Q rezonátoru modulováno optickými závěrkami, např. elektrooptickým modulátorem na principu Kerrova jevu nebo akustooptickým modulem.





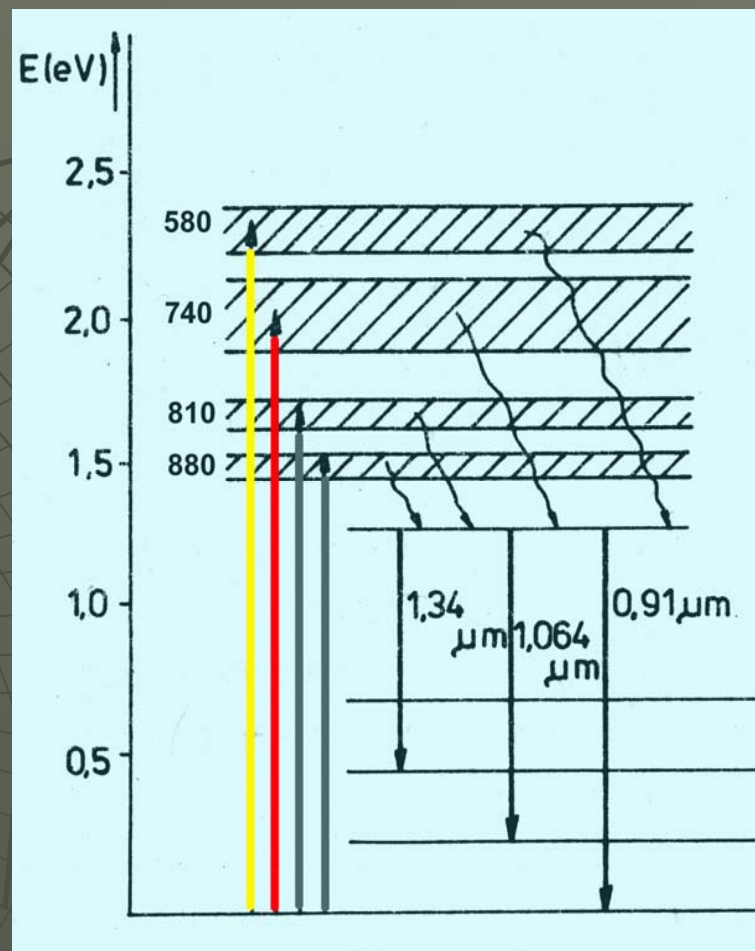
# Neodymový laser

- ♦ Je nerozšířenější pevnolátkový laser (cca 1% Nd v  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ) . Pracuje na 1,064 nm, v kontinuálním režimu výkony do 1 kW, pulzní do 10 J a opakovací frekvence až několik kHz. V Q-spínaném módu pulzy 1 – 10 ns, při synchronizaci módů až 10 ps.



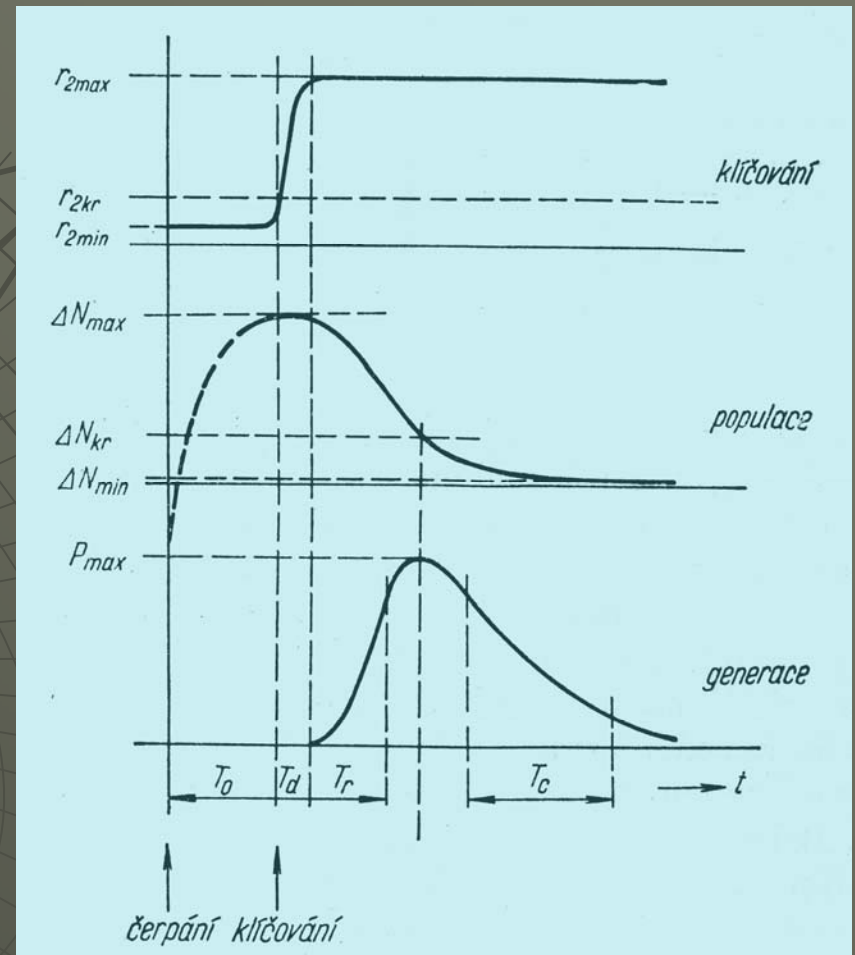
# Energetický diagram neodymu v Nd:YAG laseru

- ◆  $\text{Nd}^{3+}$  v ytrito-hlinitém granátu ( $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ) zastupuje ionty  $\text{Y}^{3+}$ . Monokrystaly jsou mechanicky pevné, tepelně stálé s minimem optických vad na rozdíl od neodymových skel. Pro čerpání se používají xenonové výbojky nebo laserové či LED diody.

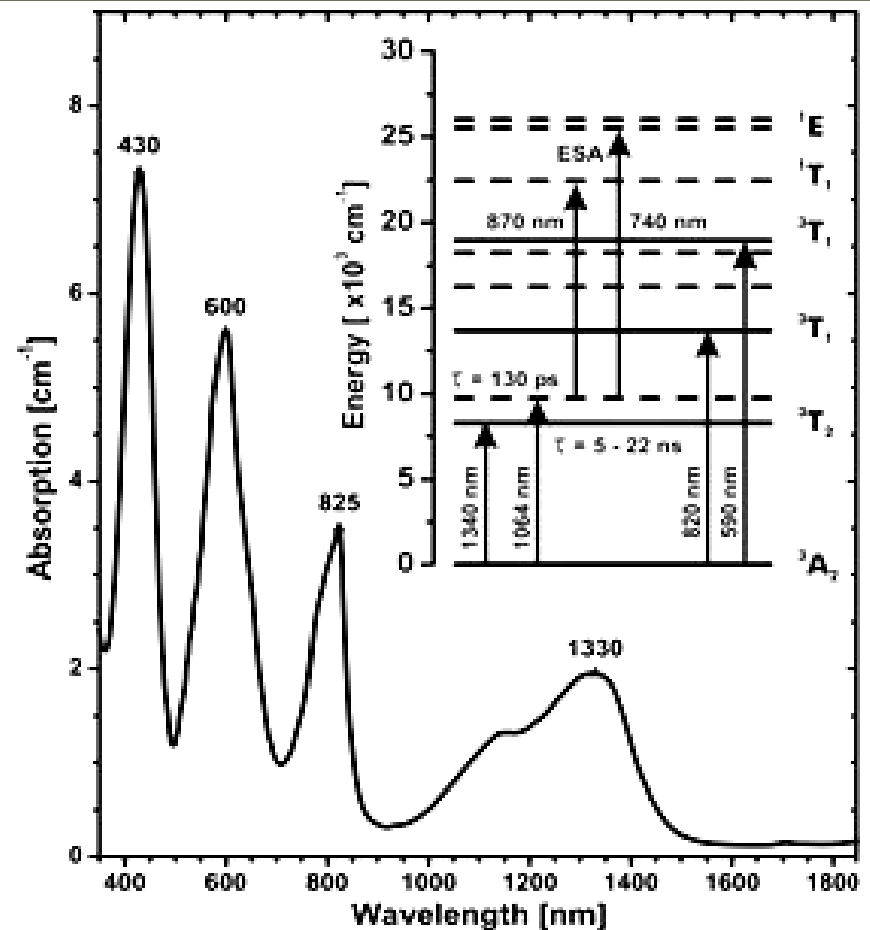
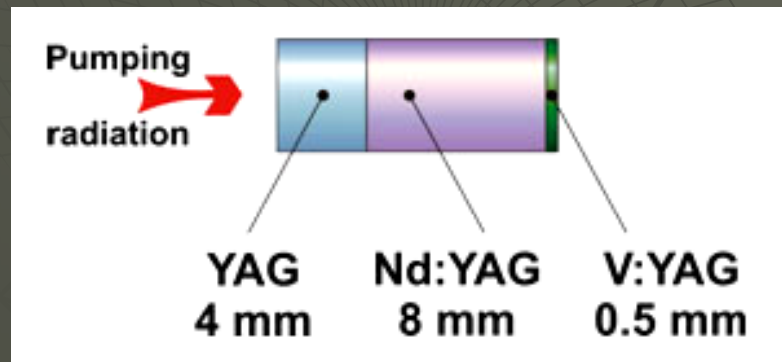


# Časový průběh aktivní Q-modulace

- ◆ Typické časy u Nd:YAG laseru:
- ◆ Nárůst inverzní populace ( $T_0$ ) 150 $\mu$ s
- ◆ Klíčovací impuls ( $T_D$ ) 1 ns
- ◆ Generace záření 10ns

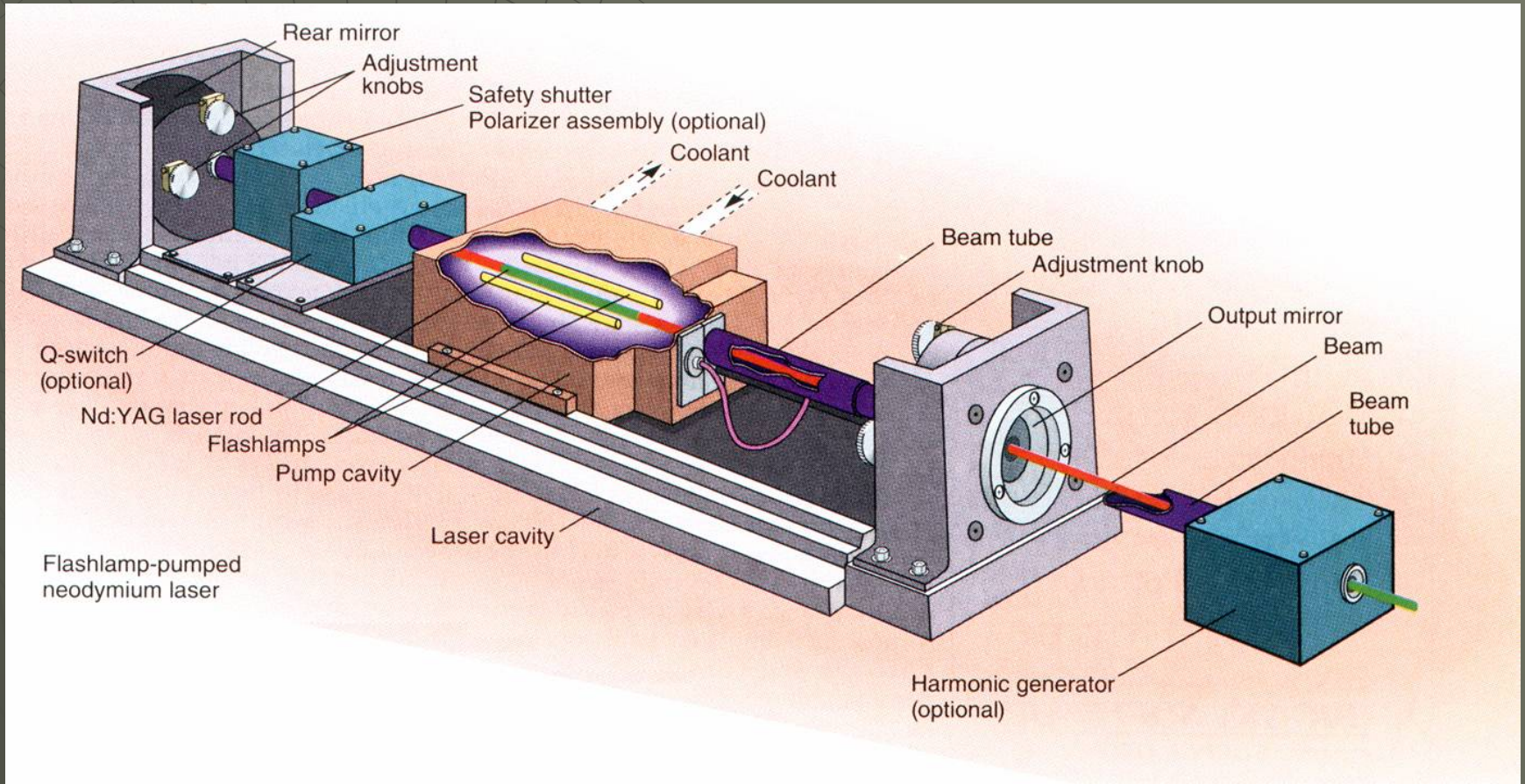


# Pasivní Q-modulace $V^{3+}$ :YAG





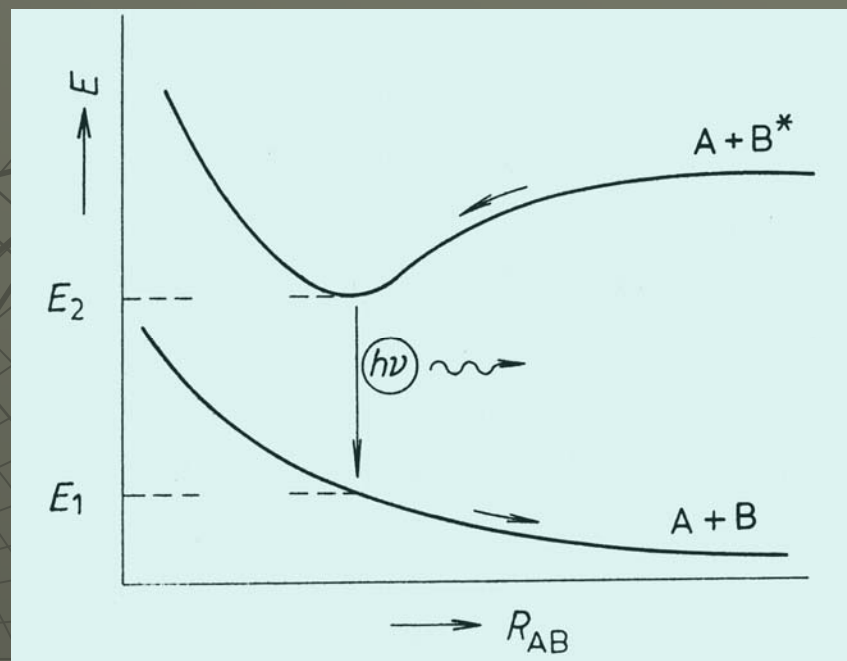
# Neodymový laser





# Excimer

- ◆ Excimer – nestabilní molekula vznikající na přechodnou dobu v důsledku působení excitovaného atomu (molekuly) s atomem (molekulou) v základním stavu. Po přechodu excimeru do základního stavu (vyzáření fotonu) dojde během  $10^{-14}$  s k disociaci



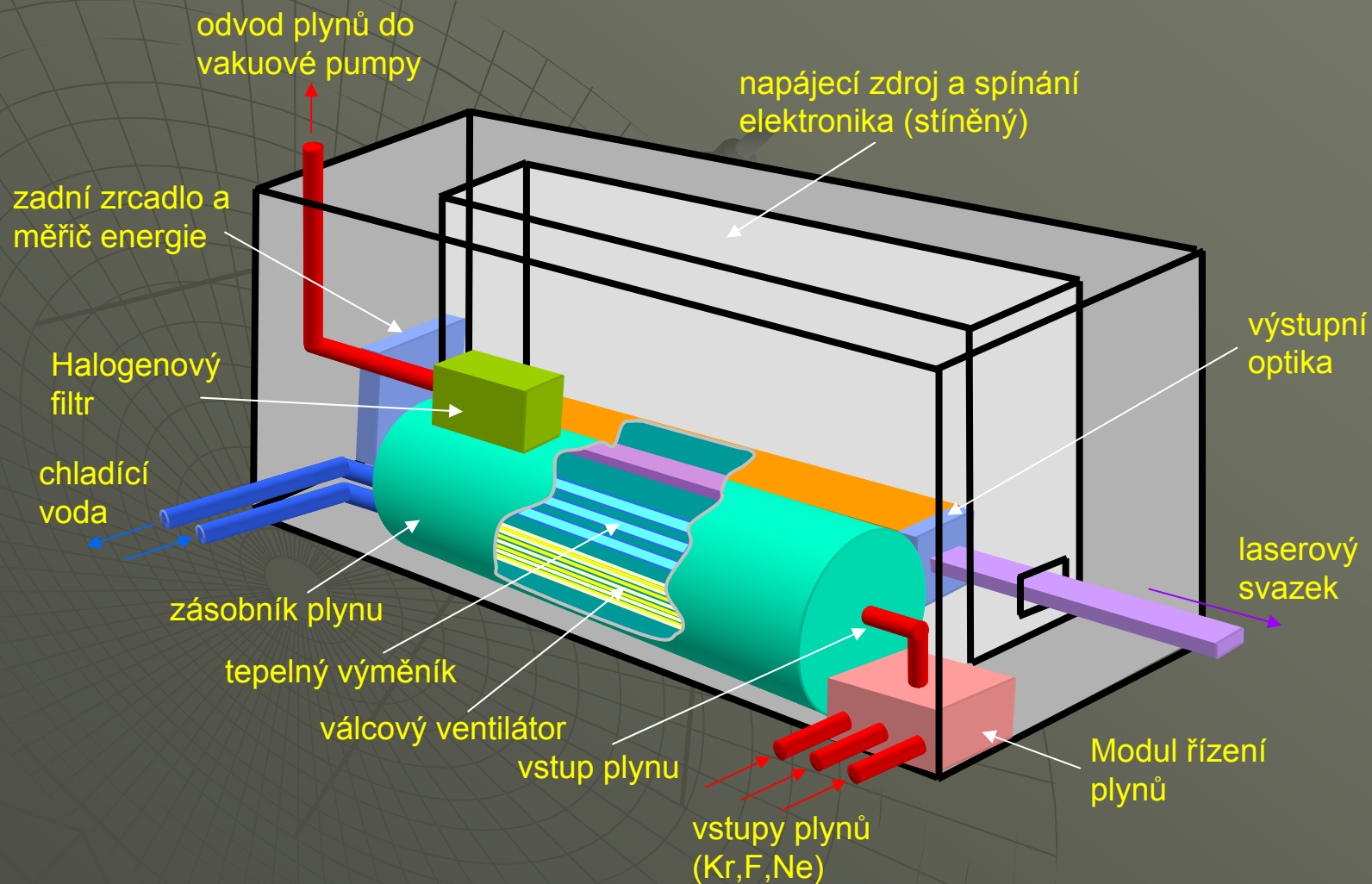
Závislost potenciální energie  $E$  soustavy atomů (molekul)  $A$ ,  $B$ , vytvářejících excimer, na jejich vzdálenosti  $R_{AB}$

# Excimerový laser

- Excimery v laserech se tvoří buď silno-proudým svazkem rychlých elektronů (0,1 – 2 keV, účinnost až 20%, Xe<sub>2</sub><sup>\*</sup>, 1970, SSSR) nebo elektrickým výbojem (účinnost cca 1%, XeCl, 1975, USA). Impulsní (ns), výkon 10 – 1000 MW.

Excimer	Vlnová délka (nm)	Šířka spektrální čáry (nm)
Ar <sub>2</sub>	126,1	8,0
Kr <sub>2</sub>	146,7	13,8
Xe <sub>2</sub>	172,0	20,0
ArCl	175,0	
ArF	193,3	1,5
KrCl	222,0	5,0
KrF	248,4	4,0
XeBr	281,8	1,0
XeCl	308,0	2,5
XeF	351,1	1,5
XeO	540,0	25,0
KrO	557,7	1,5
ArO	558,0	4,0

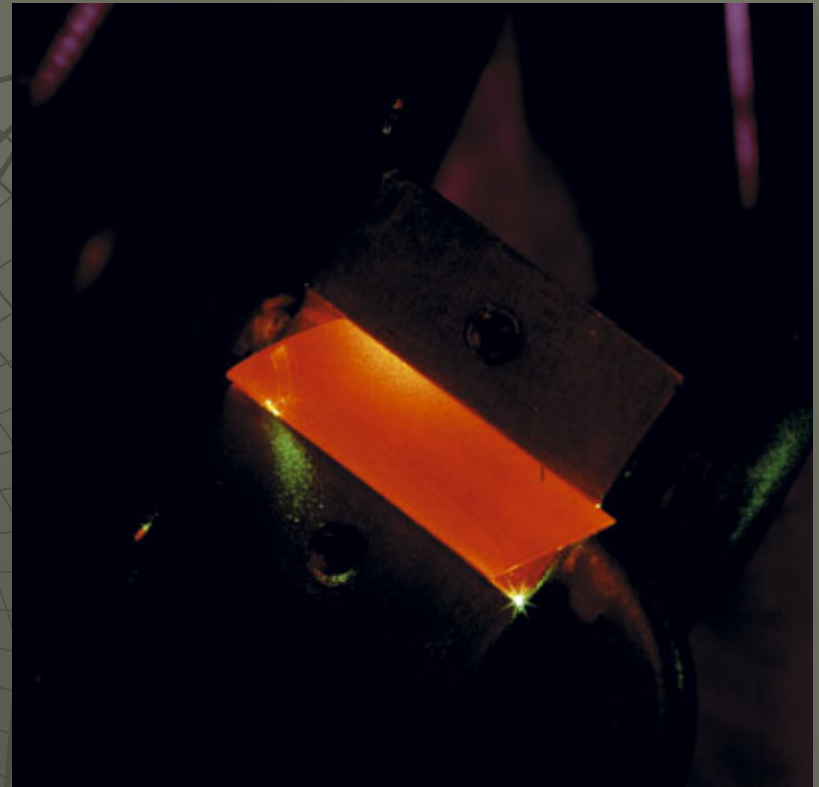
# Excimerový laser



# Titanium Doped Sapphire



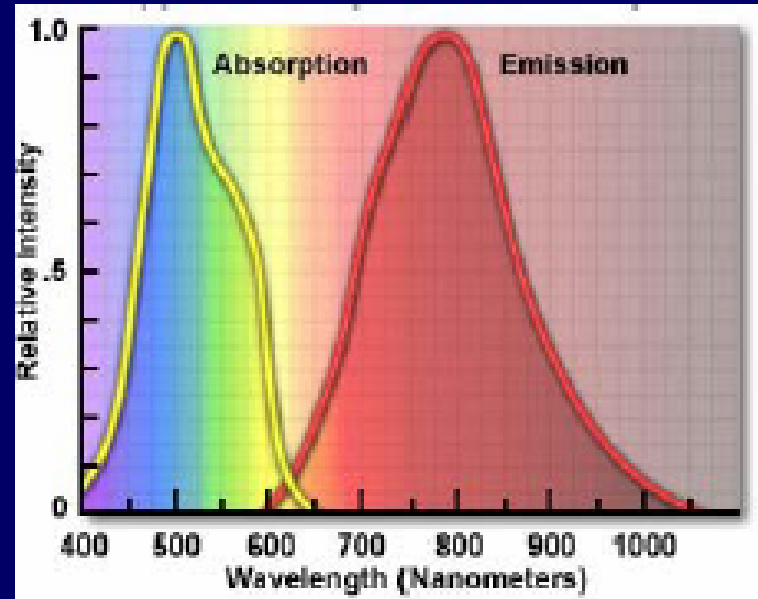
- ◆  $\text{Ti}_2\text{O}_3$  concentration 0.06-0.5 wt%
- Hardness 9 Mohs
- Thermal conductivity 0.11 cal/(°C x sec x cm)
- ◆ **Optical Properties**
  - Laser action 4-Level Vibronic
  - Fluorescence lifetime 3.2  $\mu\text{sec}$  (T = 300 K)
  - Tuning range 660-1050 nm
  - Absorption range 400-600 nm
  - Emission peak 795 nm
  - Absorption peak 488 nm
  - Refractive index 1.76 @ 800 nm



# Ti-safír krystal



## Ti:sapphire electronic spectra

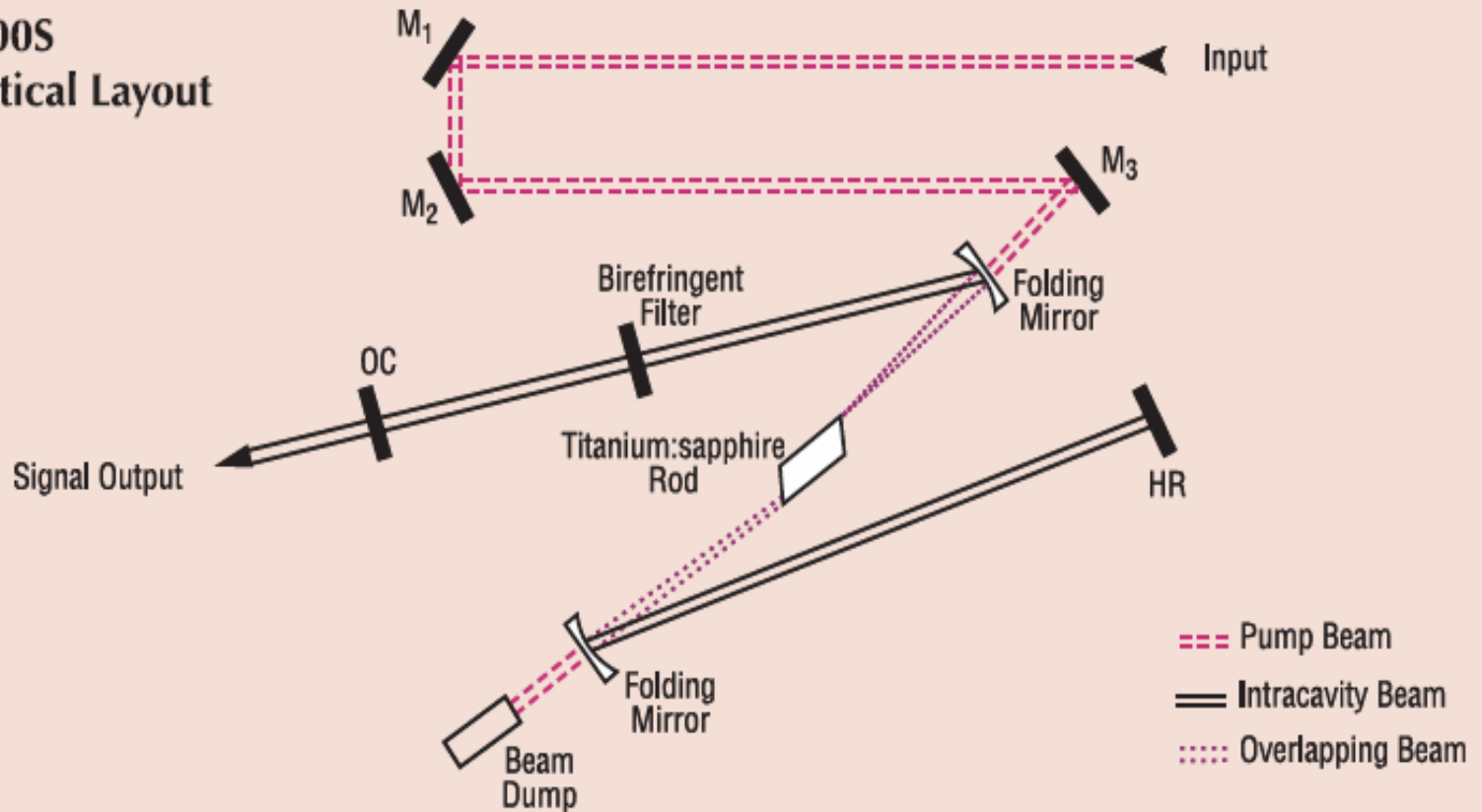


- Excitation at 532 nm from a frequency doubled Nd:YVO<sub>4</sub> laser



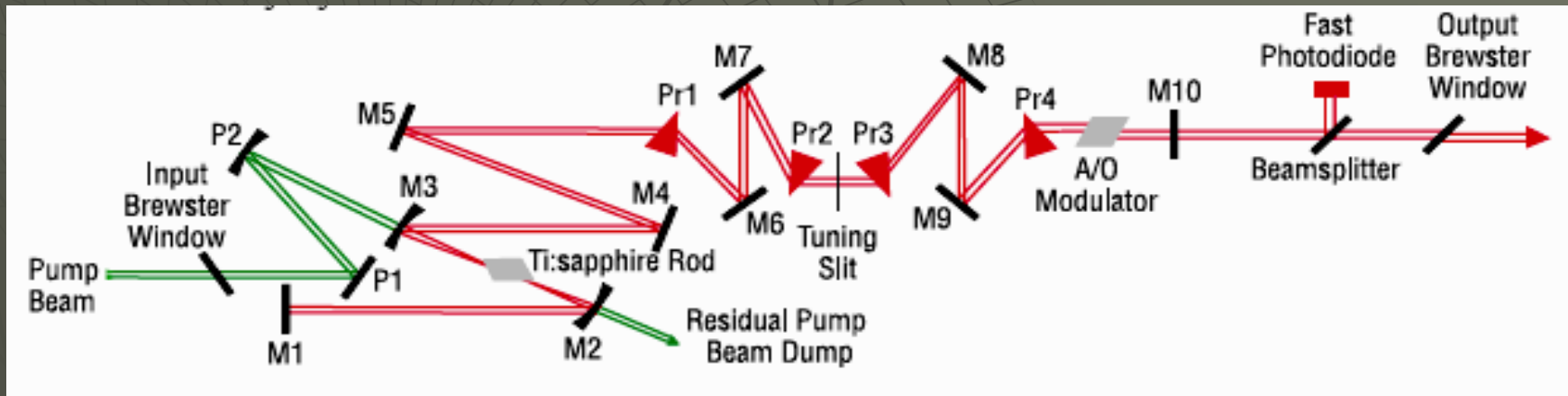
# Ti:safír laser

## 3900S Optical Layout



# Ti:safírový femtosekundový laser

- Typické uspořádání titanového laseru s optoakustickou celou pro synchronizaci módů a čerpáním Nd:YAG laserem s násobičem frekvence

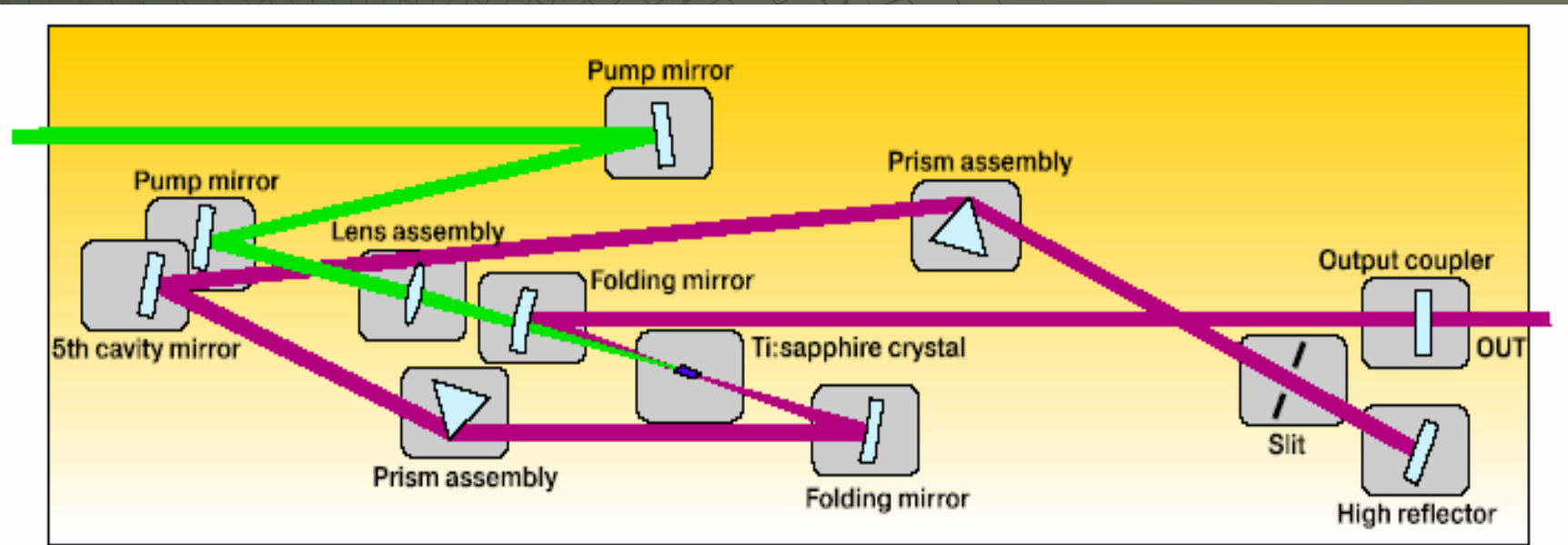
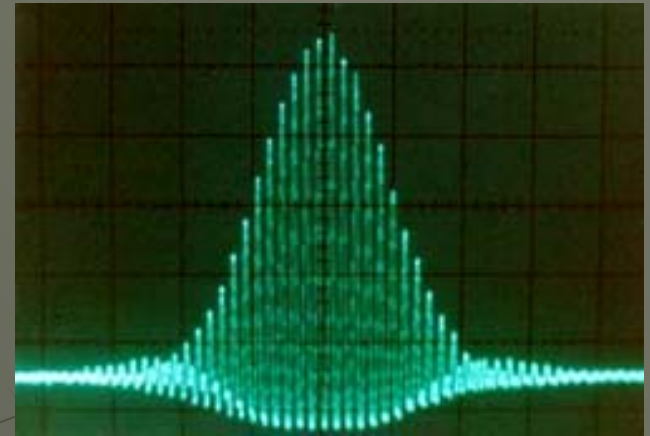


# Model TISSA-20: $< 20$ fs

Stable Kerr-lens mode-locking operation

5-mirror compact cavity design

Model TISSA-20: Seeding source of broadband femtosecond pulses for Ti:sapphire amplifiers



# Vliv délky pulzu

