

# 1 LASERY A LASEROVÁ TECHNOLÓGIA

**Dr.h.c. Prof. Ing. RNDr. Ján Turán, DrSc.**

# 1 Úvod

## Lasery - kvantové generátory (zosilňovače)

Využívajú stimulovanú emisiu žiarenia

- Vlnová dĺžka od 200 do 13000 nm
- **LASER - Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation**
- Prvý laser - Kryštál rubínu ( $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$ ) - 1960
- Prvý plynový laser - Zmes hélia a neónu – 1961
- Prvý polovodičový laser - GaAs -1962

### Lasery :

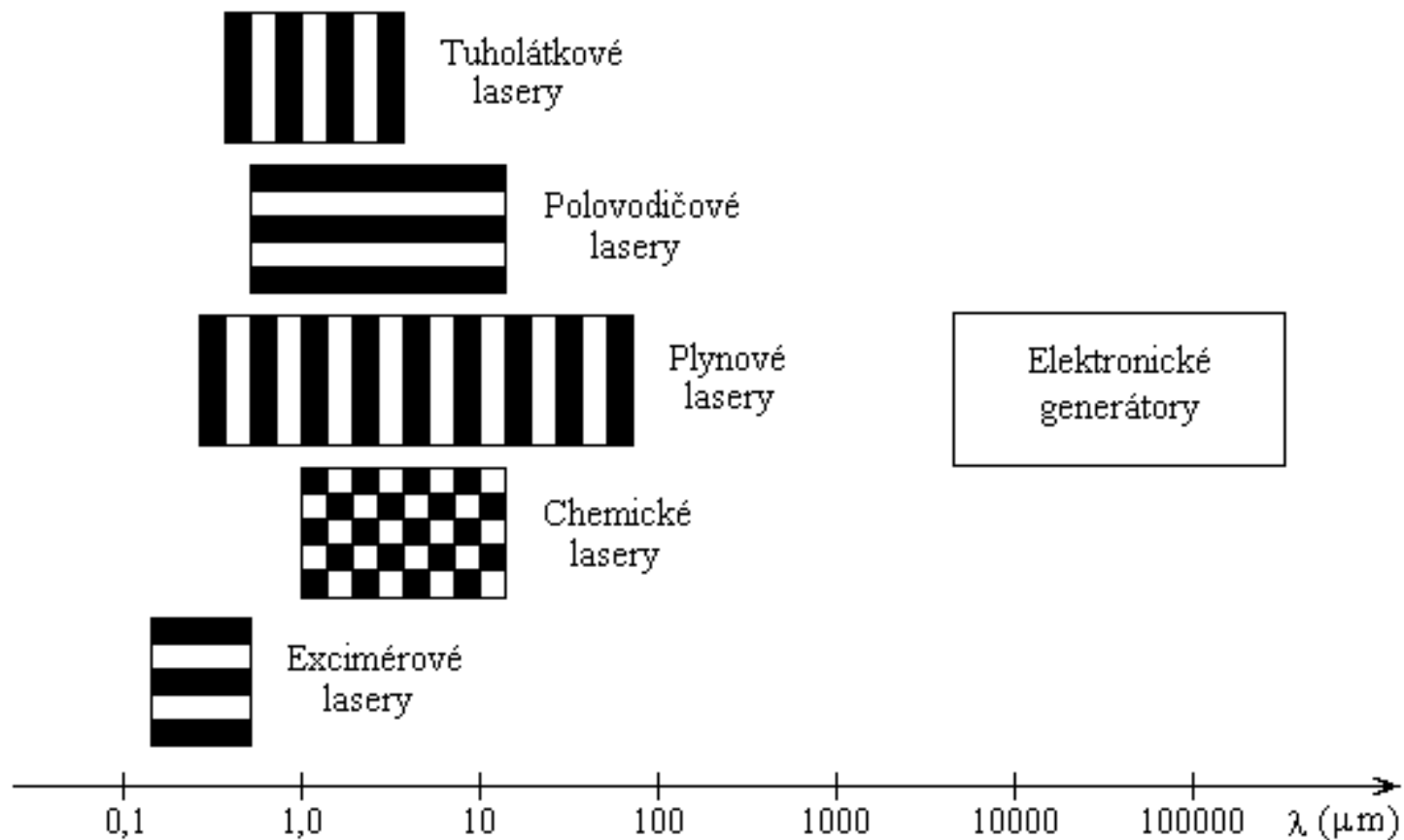
- ❖ Tuholátkové
- ❖ Polovodičové
- ❖ Plynové
- ❖ Kvapalinové
- ❖ Iné

### Režim generovania:

- ❖ Kontinuálne –  
vyžarujú dlhšie ako 0,25 s
- ❖ Impulzové

### Vlastnosti:

- ❖ Malá divergencia  
-  $10^{-2}$  –  $10^{-3}$  rad
- ❖ Vysoká hustota výkonu  
-  $10^{12}$  až  $10^{14}$  W/m
- ❖ Intenzita elektrického poľa  
-  $10^7$  až  $10^9$  V/m
- ❖ Veľká hodnota okamžitých výkonov  
- v impulze až  $10^5$  MW



**Obr. 1.1** Spektrálne oblasti práce vybraných druhov laserov.

Tab. 1.1 IMPULSOVÉ VLASTNOSTI NIEKTORÝCH LASEROV

Laser	Režim práce	Dĺžka impulzu	Opakovacia frekvencia impulzov [Hz]
Rubínový	Normálny Impulzový	1 ms	Malá (jeden impulz)
	Q - laser	50 ms	
Nd : sklo	Normálny impulzový	1 ms	Malá (jeden impulz)
	Q – laser	50 ms	
	Pikosekundový	10 ps	
Nd : YAG	Q – laser	500 ns	až do 10
N	Impulzový	10 ns	100
CO	Impulzový	100 $\mu$ s	100
	Impulzový TEA	1 $\mu$ s	1 až 100
GaAs	Impulzový	200 ns	10 až 10
Farbivový	Impulzový	10 ns	100

# 1.1 OPTICKÉ REZONÁTORY LASEROV

- **Fabryho – Perotov rezonátor**
- **Riešenie integrálnych rovníc**
- **Otvorené rezonátory – TEM vlna**

## Vidy

- **TEM<sub>mnp</sub>**  
Kde "q" – vidový index pre pozdĺžne vidy  
Pre  $L = 10^{-2}$  až 1 m, je  $q \sim 10^3$
- **TEM<sub>mn</sub> - priečny vid - Štruktúra elektromagnetického poľa**
- **V otvorených rezonátoroch sa vyvinie len nepatrná časť vidov**

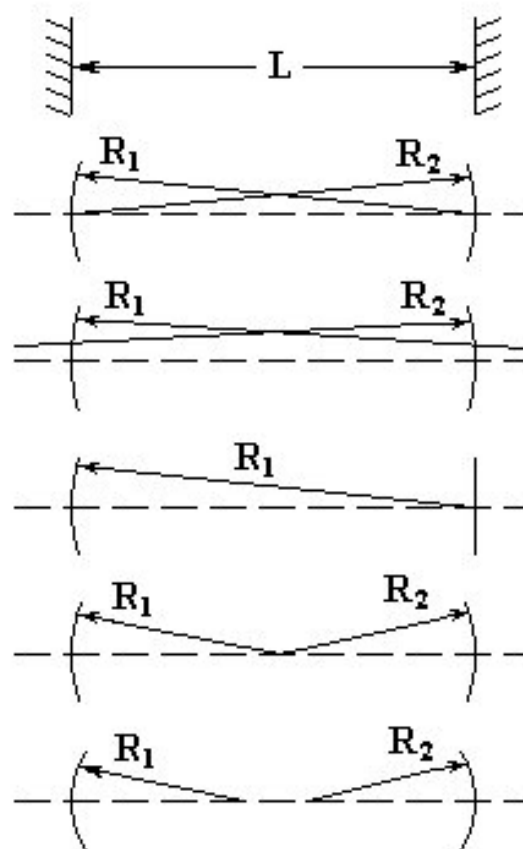
$$\frac{N_{ot}}{N_{uz}} = \frac{a^2}{8L^2} (1 - R)$$

$N_{ot}$ , resp.  $N_{uz}$  - počet vidov

$a$  – polomer zrkadiel

$L$  – vzdialenosť zrkadiel

$R$  – koeficient odrazu zrkadla



ROVINNÝ PARALELNÝ

$$R_1 = R_2 = \infty$$

KONFOKÁLNÝ

$$R_1 = R_2 = L$$

S VEĽKÝM POLOMEROM

$$R_1 \gg L, R_2 \gg L$$

HEMISFERICKÝ

$$R_1 = L, R_2 = \infty$$

SFÉRICKÝ

$$R_1 = R_2 = L/2$$

NESTABILNÝ

$$R_1 < L/2, R_2 < L/2$$

**Obr. 1.2 Konštrukcie najčastejšie používaných optických rezonátorov.**

- **Rezonátor tuholátkového lasera**
- $N_{ot} / N_{uz} \approx 10^{-6}$  ( $a = 0,5 \text{ cm}$ ,  $L = 10 \text{ cm}$ ,  $R = 0,9$ )
- **Plynové lasery**
- $N_{ot} / N_{uz} \approx 10^{-9}$  ( $a = 0,5$ ,  $L = 1 \text{ m}$ ,  $R = 0,98$ )

Lasery	Vlnová dĺžka [nm]	$\Delta f$ [MHz]	Dĺžka rezonátora [cm]	Počet vidov
He-Ne	632,8	1700	100	~10
Argónový	488 514,5	3500	100	~20
CO (nizky tlak)	10,6.10	60	100	~1
CO (atmosférický tlak)	10,6.10	3000	100	~20
Rubínový (izbová teplota)	694,3	3.10	10	~200
Rubínový (pri 77 K )	694,3	10	10	~6
Nd : sklo	1,06.10	6.10	10	~4000

- **Činiteľ akosti (kvalita)**

$$W = W_0 \exp\left(-\frac{\omega t}{Q}\right)$$

- $W_0$  energia elektromagnetického poľa v rezonátore v čase  $t = 0$
- $W$  – energia uvažovaného vidu v čase  $t$

$$v \frac{dW'}{dt} = -\frac{W(1-R)}{2\Delta t} = -\frac{W(1-R)v}{2L}$$

- $L = 10^{-1}$  m,  $\lambda = 6 \cdot 10^{-7}$  m,  $R = 0,9$ ,  $v = c$

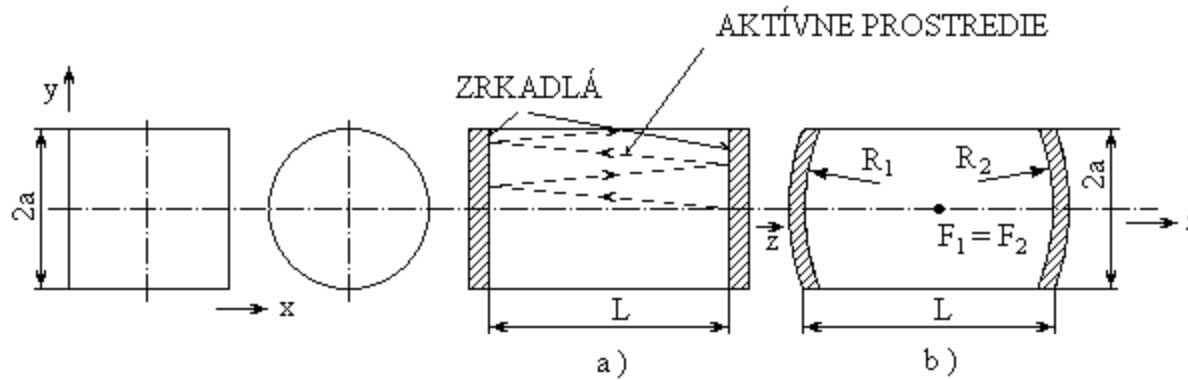
- **$Q \approx 10^7$**

- **Straty v reálnych optických rezonátoroch sú väčšie: spôsobené ohybom, nedokonalosťou, povrchu zrkadiel, nedokonalým nastavením zrkadiel, rozptylom, nevlastnou absorpciou**

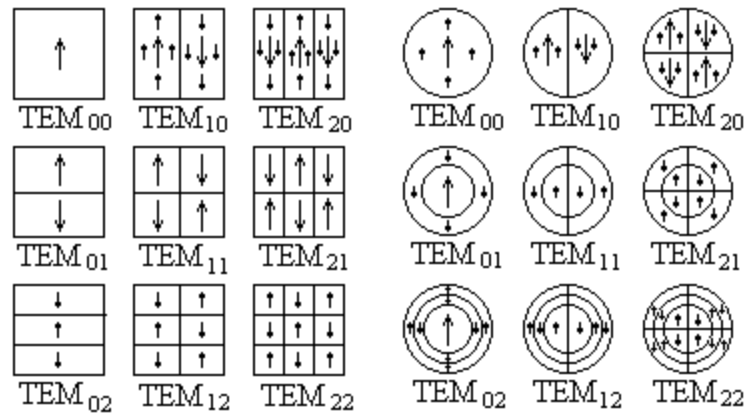
- **Rezonančná frekvencia**

$$\omega_{mnq} = \frac{v}{L} (\pi q + \Delta\varphi_{mn})$$





Obr. 1.3 Fabryho-Perotov rezonátor:(a) s rovinnými a (b) s konfokálnymi reflektormi.



Obr. 1.4 Priechne vidy Fabryho-Perotovho rezonátora.

- **Pozdĺžne vidy - frekvenčný odstup**

$$\Delta\omega = \omega_{mn(q+1)} - \omega_{mnq} = \frac{\pi v}{L} \quad (1.1.8)$$

$$\Delta f = \frac{v}{2L} \quad (1.1.9)$$

- **Pre  $L = 10^{-1}$  m je  $\Delta f = 1,5 \cdot 10^9$  Hz = 1,5 GHz**
- **Pre  $L = 1$  m je  $\Delta f = 150$  MHz**
- **Poččet Fresnelových zón**

$$n_F = \frac{a^2}{\lambda L} \quad (1.1.10)$$

- Kde  $a$  je polomer zrkadla

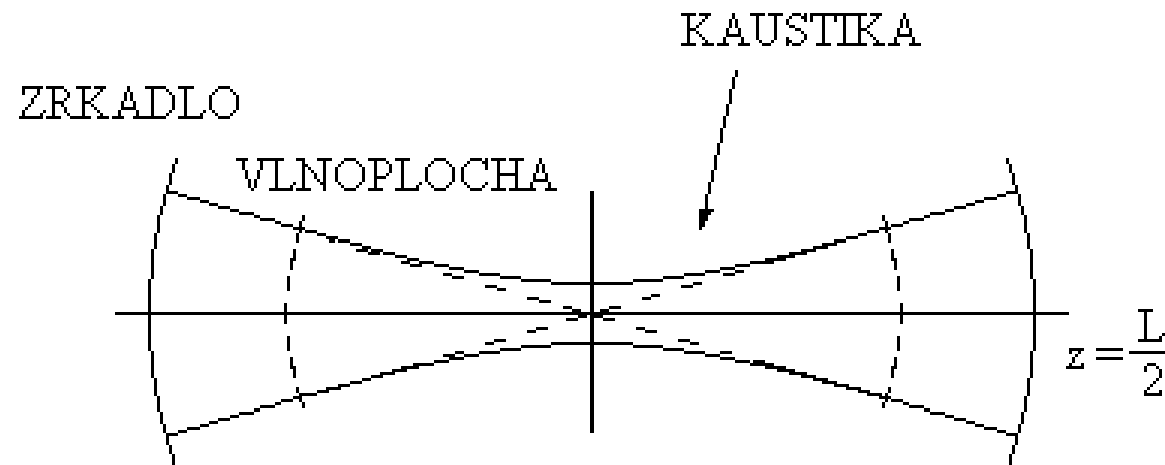
- **Poččet Fresnelových zón**

$$n_F = \frac{a^2}{\lambda L} \quad (1.1.10)$$

- Kde  $a$  je polomer zrkadla
- **Konfokálny rezonátor**
- **Diagram stability**

- **Transformačná matica lúča**

- Úsek homogénneho prostredia s indexom lomu 1 ( OBR . 1.9a ).
- Tenká šošovka s ohniskovou vzdialenosťou  $f$  ( OBR . 1.9b ).
- **Dielektrické prostredie, ktorého index lomu sa mení v závislosti od vzdialenosti od osi optického prvku podľa vzťahu**



**Obr. 1.7** Ohraničenie lúča konfokálneho rezonátora.

- **Vstupné podmienky lúča – index 1**
- **Výstupné parametre = index 2**

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ \varphi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ \varphi_1 \end{bmatrix} \quad (1.1.12)$$

Kde  $x_{1,2}$  a  $\varphi_{1,2}$  sú poloha uhol šírenia lúča

- **Transformačná matica lúča**

- Úsek homogénneho prostredia s indexom lomu 1
- Tenká šošovka s ohniskovou vzdialenosťou  $f$
- **Dielektrické prostredie, ktorého index lomu sa mení v závislosti od vzdialenosti od osi optického prvku podľa vzťahu**

$$n = n_0 - \frac{1}{2}n_2x^2 \quad (1.1.13)$$

Kde  $n_0$  je index lomu na ose

- **Matica prenosu pre rezonátor**

$$[M] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.1.14)$$

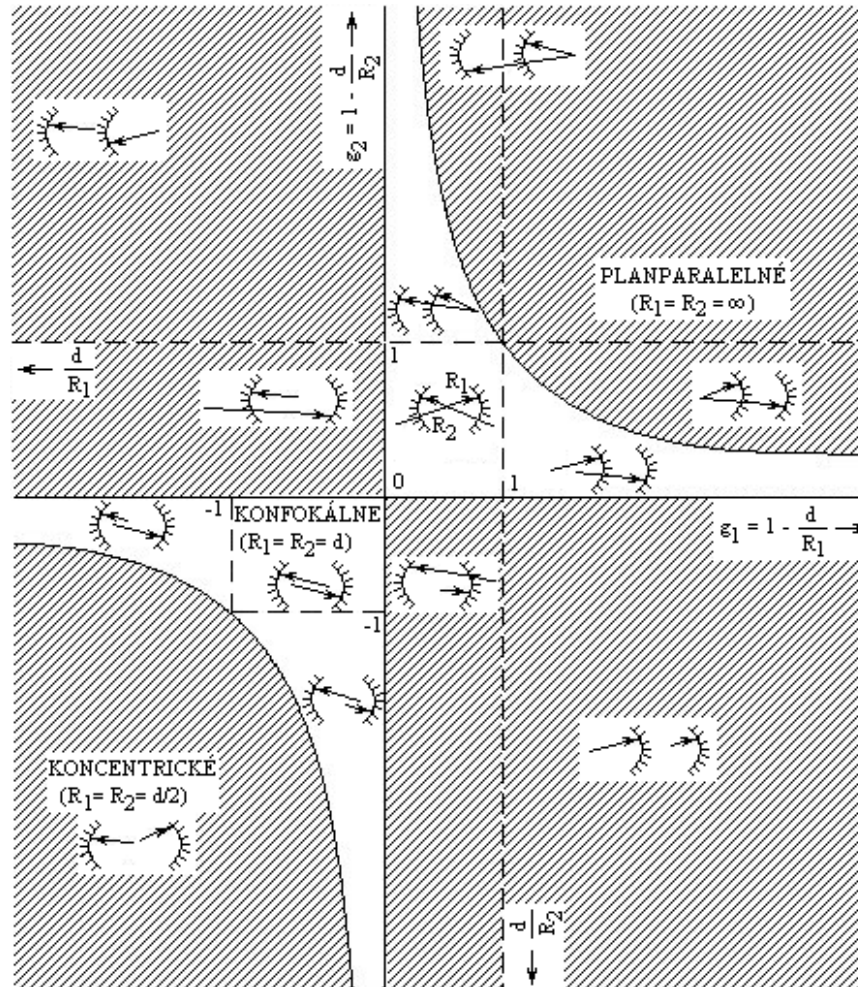
$$[M] = \begin{bmatrix} \left(1 - \frac{d}{f_1}\right)\left(1 - \frac{d}{f_2}\right) & \left(1 - \frac{d}{f_1}\right)d + d \\ -\frac{1}{f_1}\left(1 - \frac{d}{f_2}\right) - \frac{1}{f_2} & -\frac{d}{f_1} + 1 \end{bmatrix} \quad (1.1.15)$$

- **Pohyb lúča je stabilný** – ak stopa transformačnej matice spĺňa nerovnosť:

$$-1 < 0.5(A + D) < 1 \quad (1.1.16)$$

**Nerovnosť je splnená za predpokladu, že platí**

$$0 < \left(1 - \frac{d}{R_1}\right)\left(1 - \frac{d}{R_2}\right) < 1 \quad (1.1.19)$$



Obr. 1.11 Diagram stability optických rezonátorov.

# 1.2 SAMOVYBUDENIE LASEROV

- Podmienka pre vznik samovybudených kmitov v rezonátore

$$(N_2 - N_1)_p = \frac{1}{\hbar Q B_{21} g(f)} \quad (1.2.1)$$

- Vzťah medzi einsteinovými koeficientami

$$(N_2 - N_1)_p = \frac{n_f \tau_{21}}{g(f) \tau} = \frac{n_f \Delta f}{g(f) \Delta f} \frac{\tau_{21}}{\tau} \quad (1.2.2)$$

- Počet vidov pripadajúcich na jednotkové frekvenčné pásmo

$$n_f = \frac{8\pi f^2}{c^3} \quad (1.2.3)$$

$\Delta f$  je šírku spektrálnej čiary

- Prahová hodnota inverzie populácie hladín

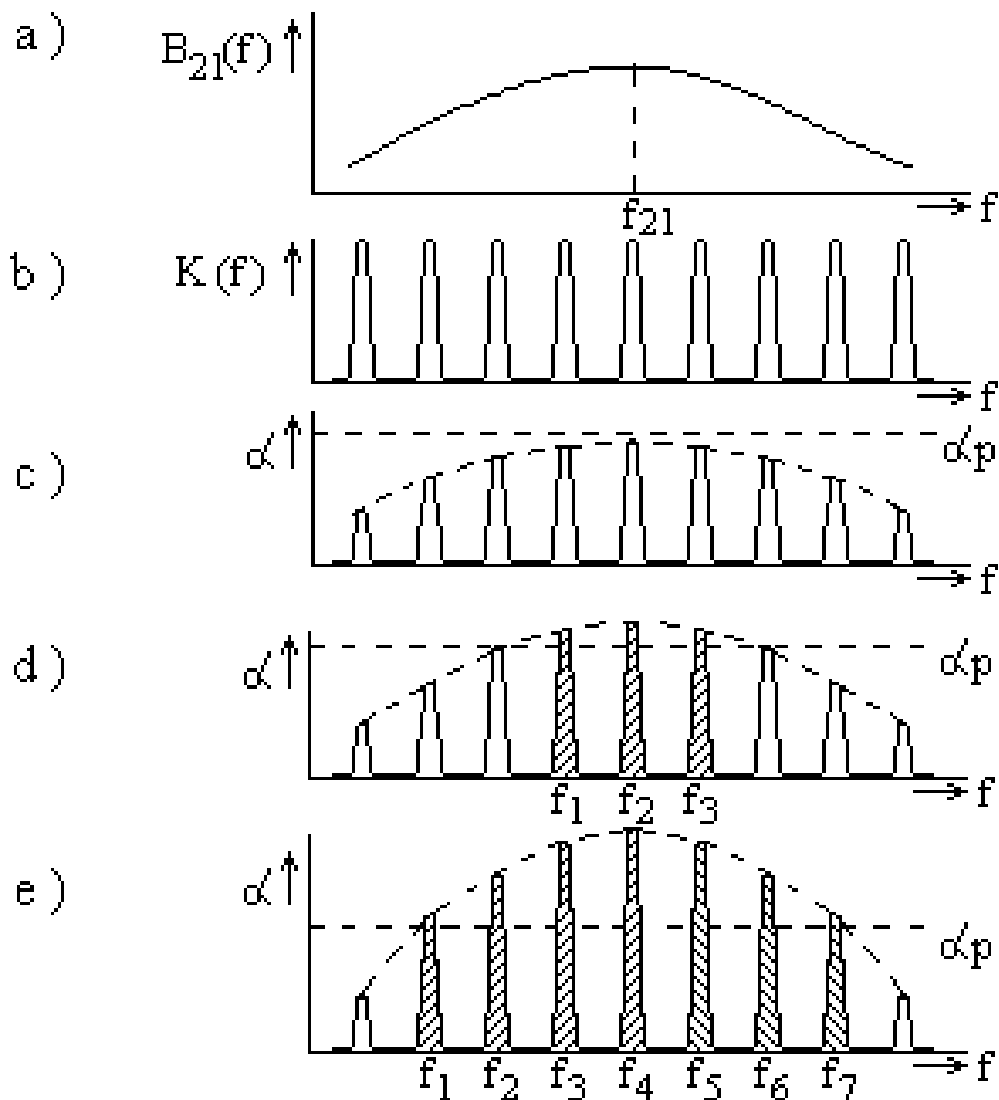
$$\alpha > \alpha_p = B_{21} \frac{\hbar \omega}{c} (N_2 - N_1)_p \quad (1.2.4)$$

- Lorentzov tvar spektrálnej čiary

$$\Delta N_L = \frac{\pi}{2} n_f \Delta f \frac{\tau_{21}}{\tau} \quad (1.2.5)$$

- Gaussov tvar spektrálnej čiary

$$\Delta N_G = \sqrt{\frac{\pi}{\ln 2}} \frac{n_f}{2} \Delta f \frac{\tau_{21}}{\tau} \quad (1.2.6)$$



**Obr. 1.12 Zmena frekvenčného spektra kvantového generátora.**



- **Šírka spektrálnej čiary – stovky až tisíce MHz**
- **Bilančné rovnice lasera**
- Zmenu obsadenia hladiny 2:

$$\frac{dN_2}{dt} = R_2 - W_{21}(N_2 - N_1) - \frac{N_2}{\tau_{21}} \quad (1.2.7)$$

- **Počet fotónov**

$$p = \frac{W}{hf} = \frac{\rho(f)V}{hf} \quad (1.2.8)$$

- Zavedieme označenie

$$B = \frac{B_{21}}{V} hf g(f) \quad (1.2.9)$$

- Rovnicu (1.2.7) možno napísať v tvare

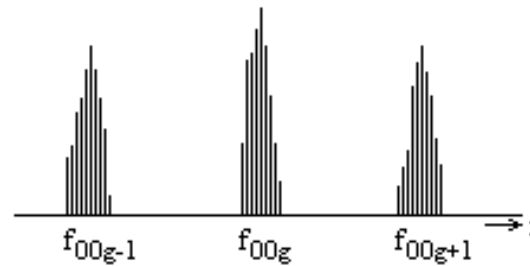
$$\frac{dN_2}{dt} = R_2 - N_2 B_p - \frac{N_2}{\tau_{21}} \quad (1.2.10)$$

- **Rovnica pre zmenu počtu fotónov**

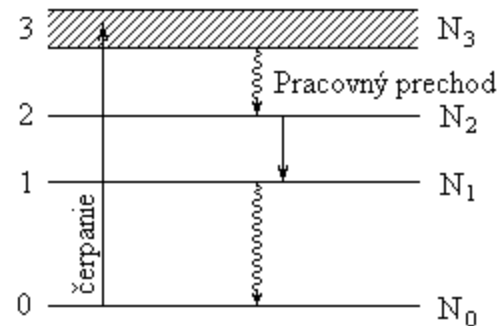
$$\frac{dp}{dt} = N_2 B_p - \frac{p}{\tau} + \frac{N_2 g(f)}{n_f V \tau_{21}} \quad (1.2.11)$$

- **Možno ukázať, že platí**

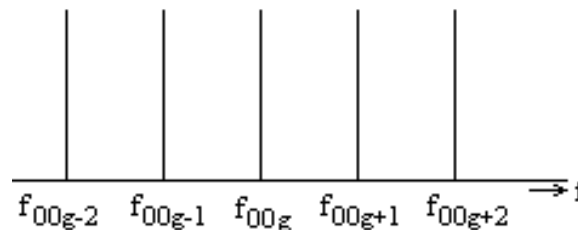
$$\frac{g(f)}{n_f V \tau_{21}} = B \quad (1.2.12)$$



**Obr. 1.13 Tvar spektra žiarenia pri viacvidovej generácii.**



**Obr. 1.14 Energetické hladiny štvorhladinového lasera.**



**Obr. 1.15 Tvar spektra žiarenia pri jednovidovej generácii.**

- Rovnica pre zmenu počtu fotónov má tvar

$$\frac{dp}{dt} = N_2 B_p - \frac{p}{\tau} + N_2 B \quad (1.2.13)$$

- Stacionárne riešenie pre  $dn_2/dt = 0$  a  $dp/dt = 0$

$$N_2 B_p - \frac{p}{\tau} + N_2 B = 0 \quad R_2 - N_2 B_p - \frac{N_2}{\tau_{21}} = 0 \quad (1.2.14)$$

$$(1.2.15)$$

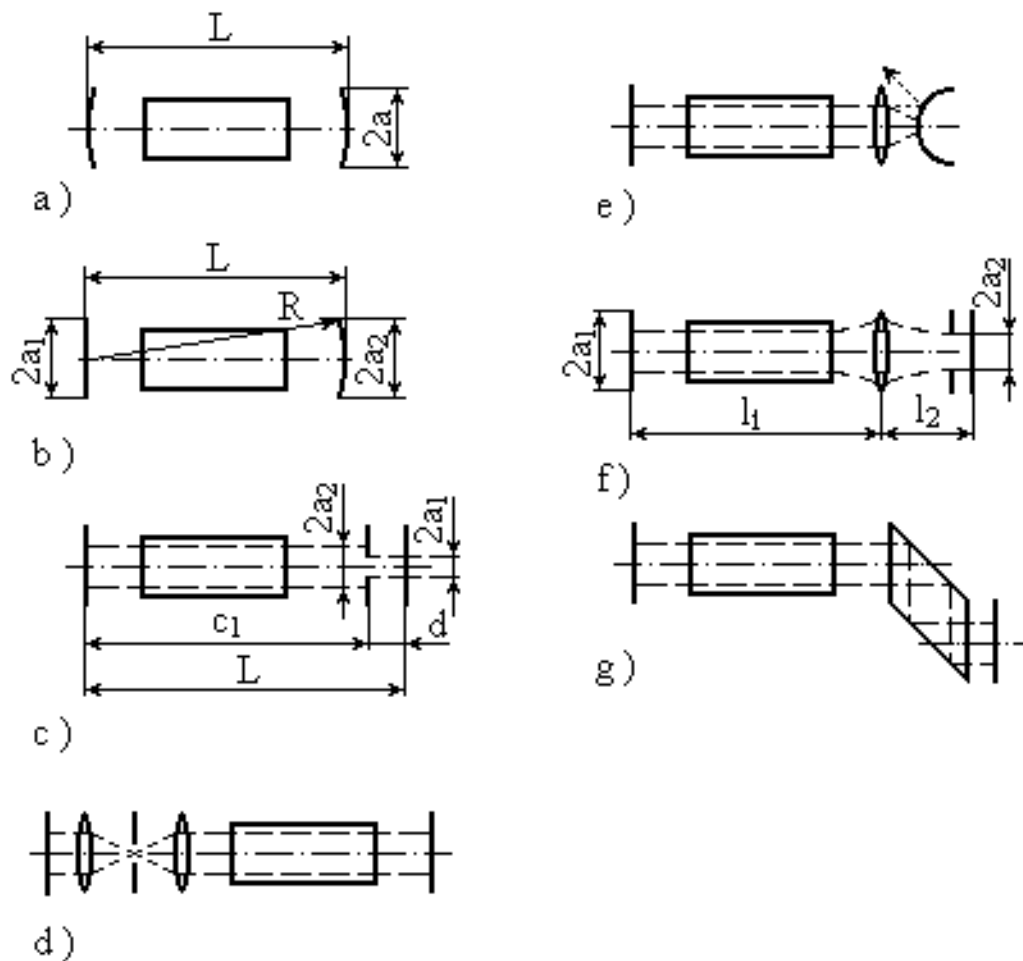
- Stimulovaná emisia kryje straty v rezonátore

$$N_2 = \frac{1}{B\tau} \quad N_2 = \frac{1}{B\tau} \frac{p}{1+p} \quad (1.2.16)$$

$$(1.2.17)$$

$$p \approx R_2 \tau - \frac{1}{B\tau_{21}} + 1 = R_2 \tau - \left( \frac{n_f V}{g(f)} - 1 \right) \quad (1.2.19)$$

- Počet fotónov vo vide je určený predovšetkým súčinom rýchlostí čerpania životnosťou fotónov



**Obr. 1.16 Schémy metód selekcie priečných vidov.**

- **Výstupný výkon lasera**

$$P = \frac{W}{\tau} = hf \frac{p}{\tau} \quad (1.2.20)$$

- **Spektrálna šírka samovybudených kmitov**

- **„Pasívny rezonátor“**

- **Stimulovanou emisiou sa rezonátor „odtlmí“**

$$\delta_f = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{1}{\tau} - N_2 B \right) = \frac{1}{2\pi\tau} \left( 1 - \frac{p}{p+1} \right) = \frac{\Delta f}{1+p} \approx \frac{\Delta f}{p} \quad (1.2.23)$$

- **Šírku čiary môžeme tiež vyjadriť pomocou výstupného výkonu**

$$\delta_f = \frac{2\pi hf (\Delta f)^2 \tau}{P_{výst} \tau_g} \quad (1.2.24)$$

- **Jednovidový laser** - len kmity základného (dominantného) vidu **TEM<sub>00</sub>**

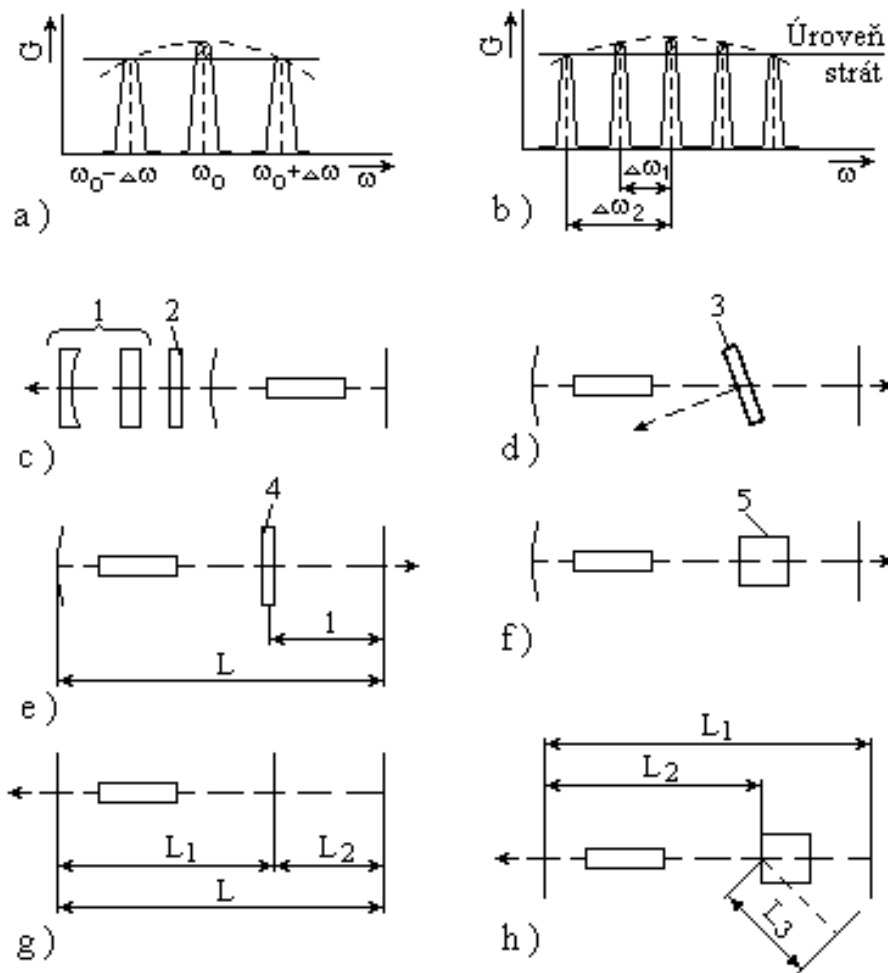
- **Jednofrekvenčný laser** - vybudí len jeden pozdĺžny vid (väčšinou typu **TEM<sub>00q</sub>**)

- **Selekcia priečných vidov**

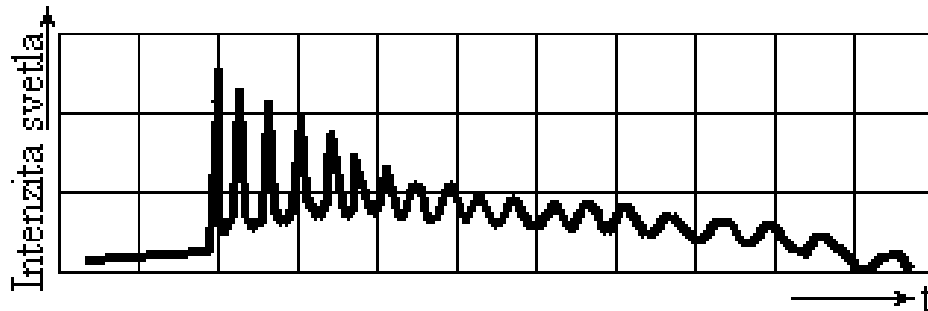
- **Selekcia pozdĺžnych vidov**

- **Intenzita generovaného svetla nie je konštantná – vznikajú**

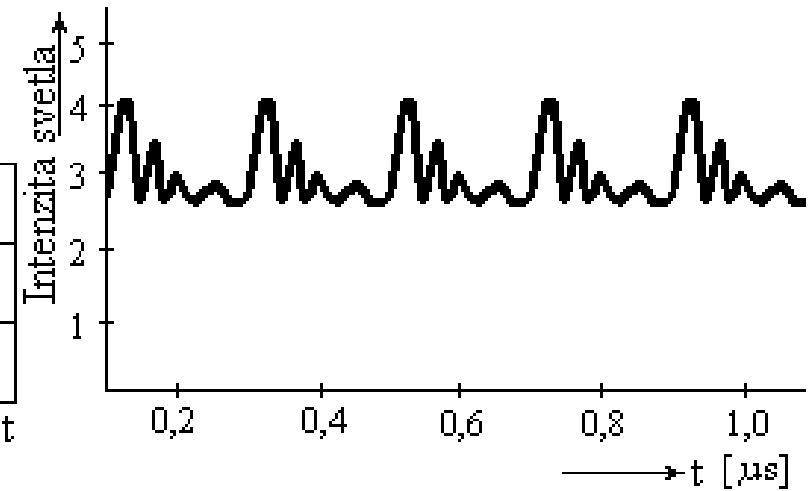
**Relaxačné kmity**



**Obr. 1.17 Schémy metód selekcie pozdĺžnych vidov.**



**Obr. 1.18** Relaxačné kmity v tuholátkovom laseri na  $\text{CaWO}_4: \text{Nd}^{3+}$ .



**Obr. 1.19** Fluktuácia intenzity xenónového lasera.

# 1.3 PLYNOVÉ LASERY

Aktívna látka - atómy, ióny alebo molekuly plynu

## Výhody plynnej aktívnej látky

- Veľké objemy
- Vylúčená možnosť rozrušenia štruktúry
- Temer dokonalé homogénne prostredie
- Ľahko sa zabezpečuje odvod tepla
- Prietokom plynu aktívnou oblasťou, možno zabezpečiť veľmi vysoké výkony generácie

## Nevýhody plynnej aktívnej látky

- Malá koncentrácia aktívnych častíc
- Dĺžka výbojok desiat centimetrov až po niekoľko metrov

## Základné vlastnosti

- Zdroje kontinuálneho (spojitého) laserového žiarenia
- Výstupný výkon  $10^{-1}$  do  $10^3$  W
- Vlnová dĺžka od ultrafialovej do ďalekej infračervenej
- Dobrá priestorová aj časová koherencia
- Malý uhol divergencie lúča



### Atómové plynové lasery

- ❖ Hélium – neónový (**He – Ne**) laser
- ❖ Lasery na inertných plynoch (**Ne, Ar, Kr a Xe**) - 0, 10 až 200  $\mu\text{m}$

### Iónové plynové lasery

- ❖ **Ar<sup>+</sup>, Kr<sup>+</sup> a Xe<sup>+</sup>.**
- ❖ Ionizovaný kryptón - 0,6471; 0,5682; 0,5309; 0,5208; 0,4825; 0,4762; 0,3507 a 0,3564  $\mu\text{m}$
- ❖ Ionizovaný xenón - **modrej** a **zelenej** - od 0,4955 do 0,5395  $\mu\text{m}$  s výkonom do sto **mW**
- ❖ **He – Cd** laser
- ❖ - 0,4416  $\mu\text{m}$  ~50 **mW**
- ❖ -0,3250  $\mu\text{m}$ ~15 **mW** jedna z najkratších vlnových dĺžok
- ❖ **Lasery na parách Zn, Hg**

### Molekulové plynové lasery

- ❖ **CO<sub>2</sub> laser** 9,6; 10,6  $\mu\text{m}$
- ❖ Molekulové lasery **N<sub>2</sub>, CO, N<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>O a HCN**

### Dusíkový laser

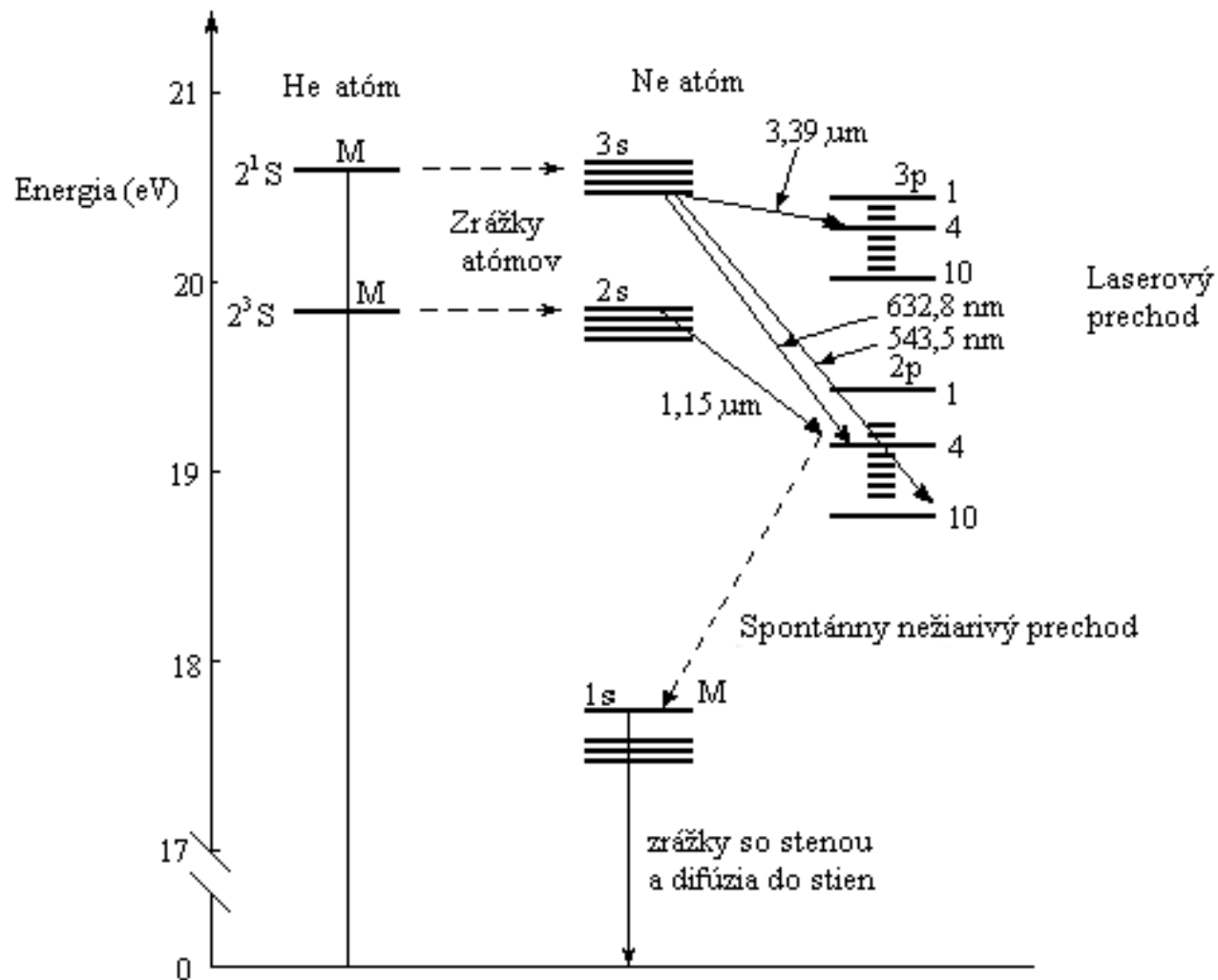
- ❖ 0,337  $\mu\text{m}$
- ❖ Impulzy trvania ~10 **ns**
- ❖ Výkon 100 **kW**
- ❖ Najkratšia vlnová dĺžka, ktorá je komerčne dostupná

## 1.3.1 HÉLIUM – NEÓNOVÝ LASER

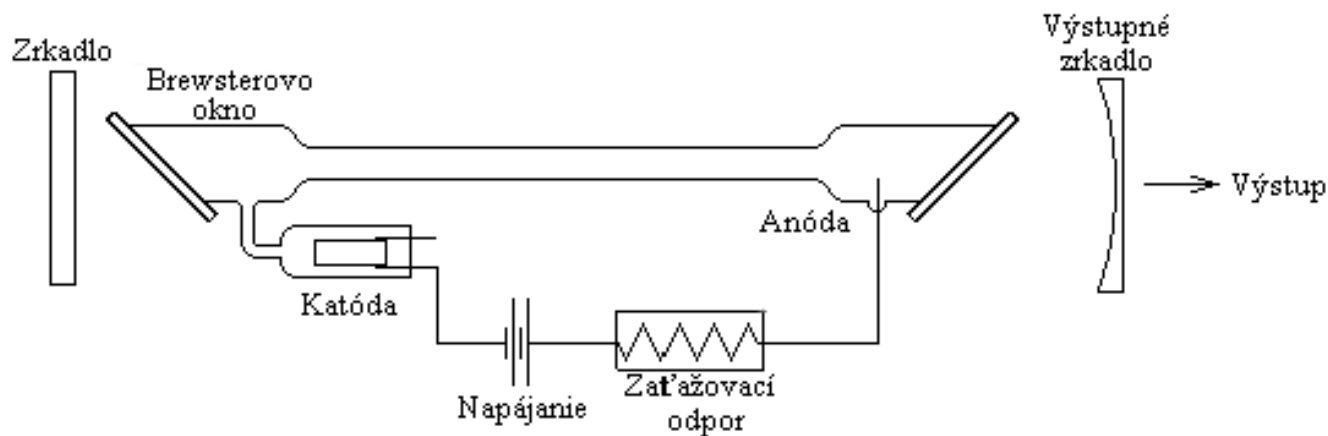
- Je najrozšírenejší
- **Skonstruovaný v r. 1961 - 1,15  $\mu\text{m}$**
- Kompaktné, prenosné a jednoduché zdroje kontinuálneho laserového žiarenia vo viditeľnej oblasti
- Vhodné na demonštračné účely a použitie vo výučbe
- Pracovný plyn – neón používaný v zmesi s héliom v pomere  
He:Ne = 10:1 budený zrážkami s elektrónmi v plazme
- **Dve metastabilné hladiny  $2^1s$ ,  $2^3s$**

## 1.3.1 HÉLIUM – NEÓNOVÝ LASER

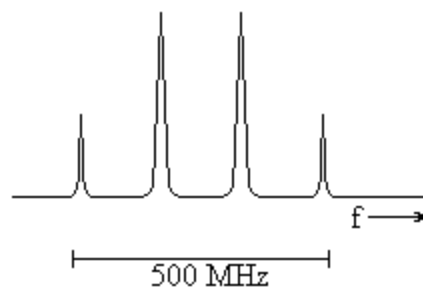
- **Neónové multiplety 3s a 2s**
- **Inverzia populácie medzi hladinami 3s, 2s a 3p, 2p**
- **Životnosť neónu: v stave 3s a 2s je  $\sim 0,1 \mu\text{s}$ ,  
v stave 2p len  $0,01 \mu\text{s}$**
- **Stav 1s sa vyprázdňuje interakciou atómov neónu so stenami výbojky**
- **Malý priemer výbojky**
- **Hustota prúdu vo výboji je  
od  $0,05$  do  $0,5 \text{ A/cm}^2$   
(typická hodnota  $\sim 0,1 \text{ A/cm}^2$ )**
- **Prechody:  $3s_2 \rightarrow 2p_4$  ( $\lambda = 0,6328 \mu\text{m}$ ),  
 $2s_2 \rightarrow 2p_4$  ( $\lambda = 1,1523 \mu\text{m}$ ),  
 $3s_2 \rightarrow 3p_4$  ( $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$ )**



Obr. 1.20 Energetické hladiny a prechody He – Ne lasera.



**Obr. 1.21** Schéma typického nízko výkonového He – Ne lasera.



**Obr. 1.22** Typické spektrum He – Ne lasera.

- Väčšina He – Ne laserov v súčasnosti pracuje na vlnovej dĺžke  $0,6328 \mu\text{m}$
- $\lambda = 3,39 \mu\text{m} - \alpha \sim 20\text{db/m}$
- Dĺžka výbojovej trubice - 1m
- Priemer trubice je - niekoľko milimetrov (1 až 5 mm)
- Divergencia výstupného lúča  $\sim 2 \cdot 10^{-4}$  rad
- Okienka zvierajú brewsterov uhol
- Odrážkové straty - 7 až 13 %
- Tri prstencové elektródy - **vf výboj**
- Budiaci generátor s frekvenciou  $\sim 27$  MHz, výkon  $\sim 100$  W
- Napätie prierazu - 3400 V
- Pre udržanie výboja menšie -  $\sim 1350$  V

- $\lambda = 0,6328 \mu\text{m}$  - dopplerova šírka spektrálnej čiary  
 $\Delta f = 1500 \text{ MHz}$
- **Prirodzená šírka  $\sim 3 \text{ MHz}$**
- Pri dĺžke rezonátora  $\sim 0,1 \text{ m}$  - vzdialenosť susedných pozdĺžnych vidov  
1500 MHz, malý výstupný výkon  $\sim 0,1 \text{ mW}$
- Dĺžka rezonátora  $1 \text{ m}$  - výkon väčší  $\sim 0,1 \text{ W}$ , vybudí sa už viac vidov
- **He – Ne lasery so stabilizáciou frekvencie**  
Krátkodobá stabilita  $\sim 10^{-13}$   
Dlhodobá stabilita je rádovo  $10^{-9}$  až  $10^{-10}$   
Dĺžka vlny  $0,632991418 \pm 0,000000003 \mu\text{m}$   
Koherenčná dĺžka väčšia ako  $1000 \text{ cm}$

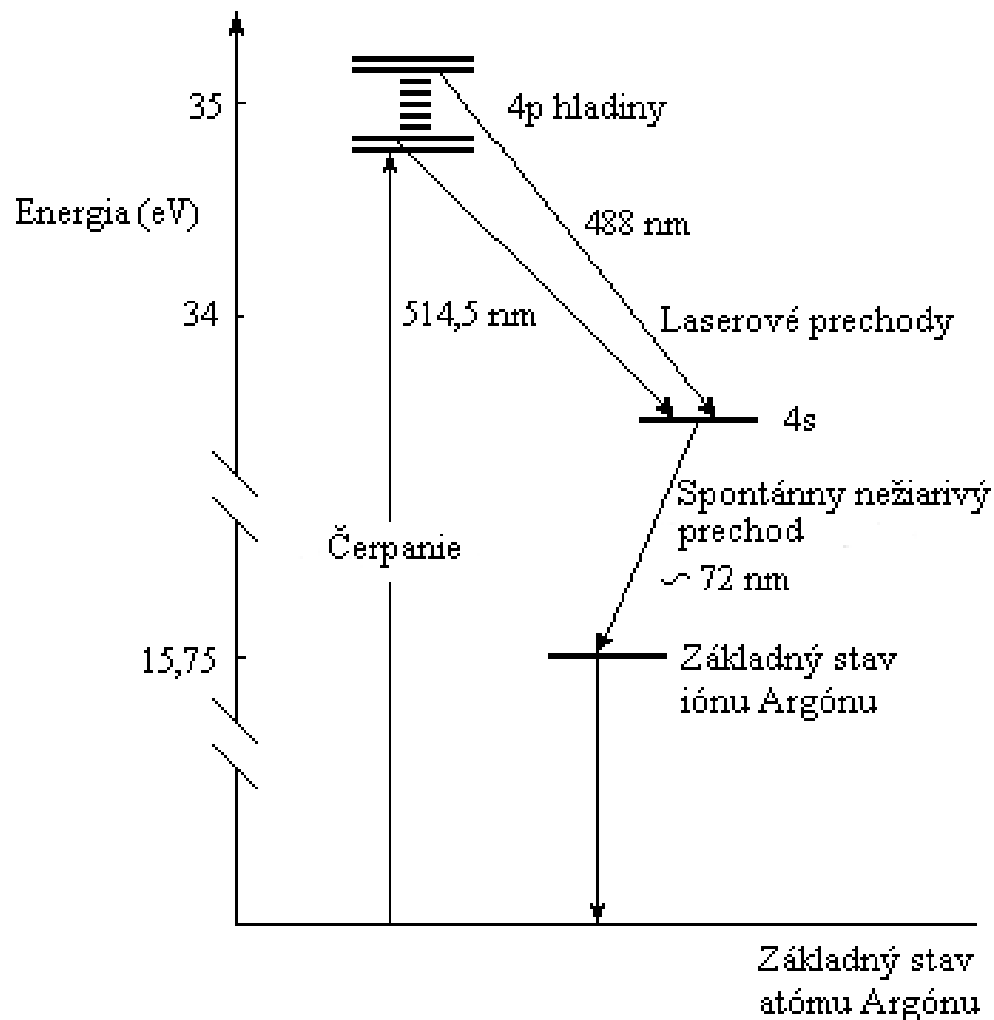
## 1.3.2 ARGÓNOVÝ LASER

- **Iónový plynový laser Ar<sup>+</sup>**
- **Energetický diagram je omnoho zložitejší**
- **Väčší počet emisných čiar**
- **Emisné čiary: fialová, modrá, zelená**
- **Najväčšia intenzita - prechody 0,4880 a 0,5145 μm**
- **Koeficient zosilnenia  $\alpha \sim 10\text{dB/m}$**
- **Malý priemer trubice**



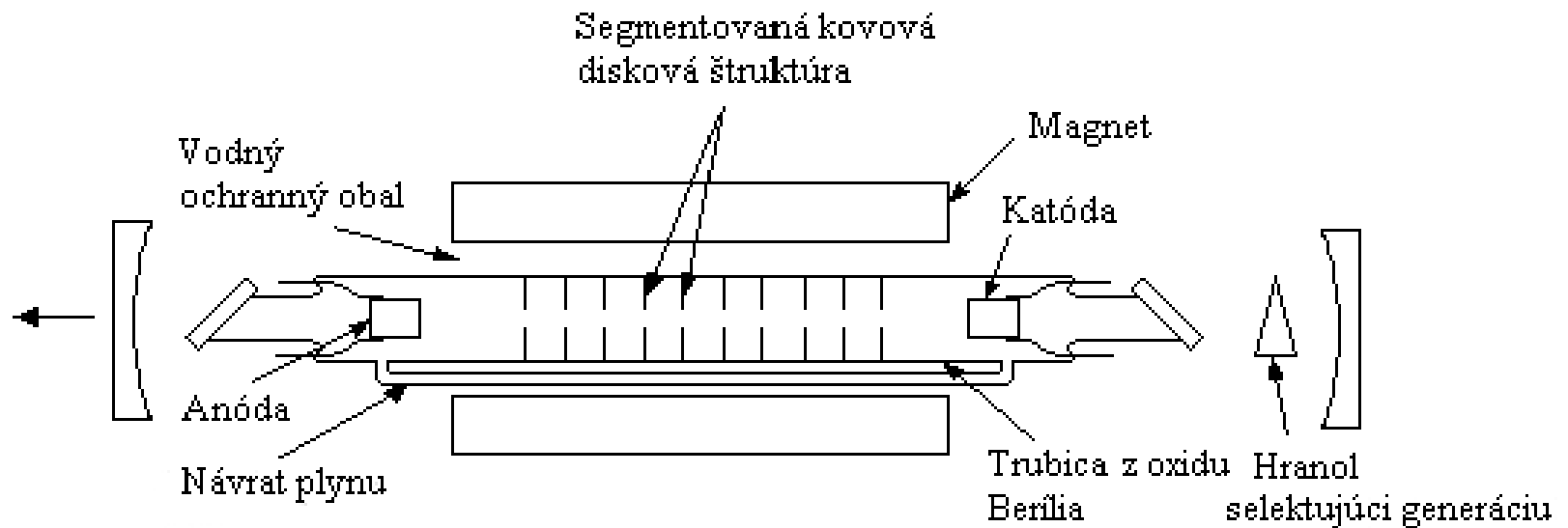
## 1.3.2 ARGÓNOVÝ LASER

- **Veľký prúd**
- **Nízkotlakový výboj  $\sim 133$  Pa**
- **Hustota prúdu  $100$  až  $2000$  A/cm<sup>2</sup>**
- **Maximálny výstupný výkon  $\sim 120$  W**
- **Typická hodnota  $\sim$  desiatky W**
- **Generáciu len na jednej vlnovej dĺžke – desatiny až niekoľko W**



**Obr. 1.23 Zjednodušené energetické hladiny iónu argónového lasera.**

- **Magnetické pole**
- Rozrušenie materiálu výbojovej trubice
- Tepelne odolné materiály - grafit, kremeň, korund a **Oxid Berýlia (BeO)**
- **BeO:**
  - **Veľmi málo sa rozprašuje v elektrickom výboji**
  - **Veľmi dobrá tepelná vodivosť**
  - **Nevýhoda - vysoká cena a jedovatosť**
  - **Dĺžka výbojky: 0,2 až 1 m**
  - **Vnútorňý priemer: od 1 do 10 mm**
- **Argónové lasery**
  - **Vlnová dĺžka 0,3511 a 0,3638  $\mu\text{m}$**
  - **System znovunaplnenia argónovej výbojovej trubice**



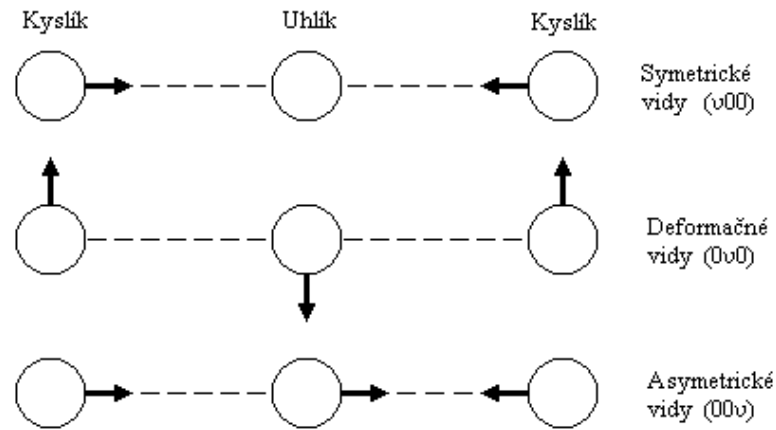
**Obr. 1.24** Typická konštrukcia iónového argónového lasera.

## 1.3.3 CO<sub>2</sub> LASER

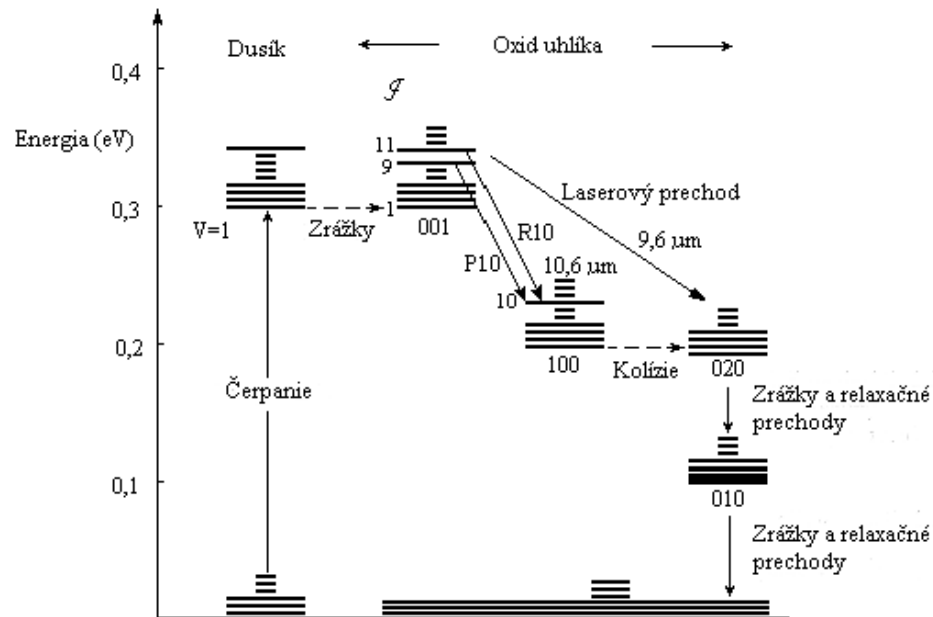
- **Najdôležitejší molekulový plynový laser**
- **CO<sub>2</sub> je lineárna molekula**
  - **Tri vidy vibrácií**
  - **Vibračné stavy -  $ij^sk$** 
    - **i pre symetrický, j pre deformačný, k pre antisymetrický vid**
    - **s doplnkové kvantové číslo**
  - **Rotačné stavy**
- **Hladina 00<sup>0</sup>1 - blízka hladine prvej vybudenej vibračnej hladine molekuly dusíka**

- **Dusík sa vybudí v elektrickom výboji zrážkami s elektrónmi**
- **Inverzia populácie medzi hladinou - (00<sup>0</sup>1) a hladinami (10<sup>0</sup>0) a (02<sup>0</sup>0)**
- **Pracovné vlnové dĺžky 10,6 a 9,6 μm**
- **Zosilnenie väčšie pre 10,6 μm**
- **Základný vibračný stav - (00<sup>0</sup>0) – relaxačné procesy**
- **Hélium**
  - **Zvýši výstupný výkon lasera**
  - **Urýchľuje proces vyprázdňovania nižších energetických hladín**

a)



b)



**Obr. 1.25** Vibračné módy molekuly CO<sub>2</sub> (a). Zjednodušený diagram energetických hladín pre CO<sub>2</sub> laser (b).

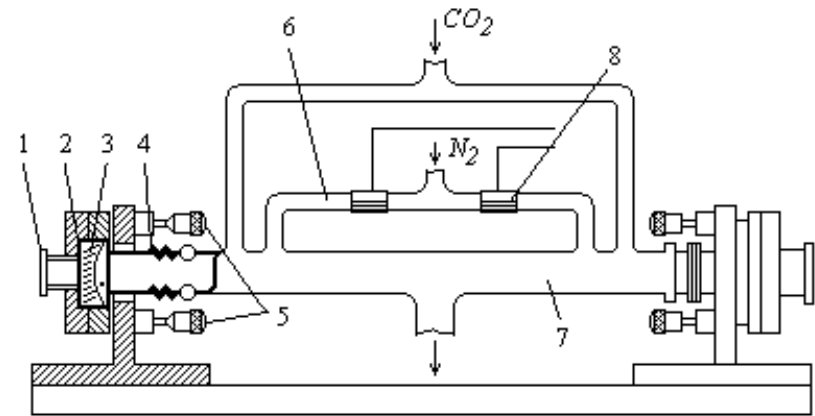
- **CO<sub>2</sub> lasery pracujú so zmesou plynov CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> a He**
  - **Nutné ochladzovať zmes**
  - **Prietokový systém**
- **CO<sub>2</sub> lasery - čerpanie elektrickým výbojom**
- **Optimálne parciálne tlaky plynov**
  - **66,5 Pa (~ 0,5 tor) CO<sub>2</sub>**
  - **798 Pa (~ 6 tor) He**
  - **200 Pa (~ 1,5 tor) N<sub>2</sub>**
- **$\lambda = 10,6 \mu\text{m}$**



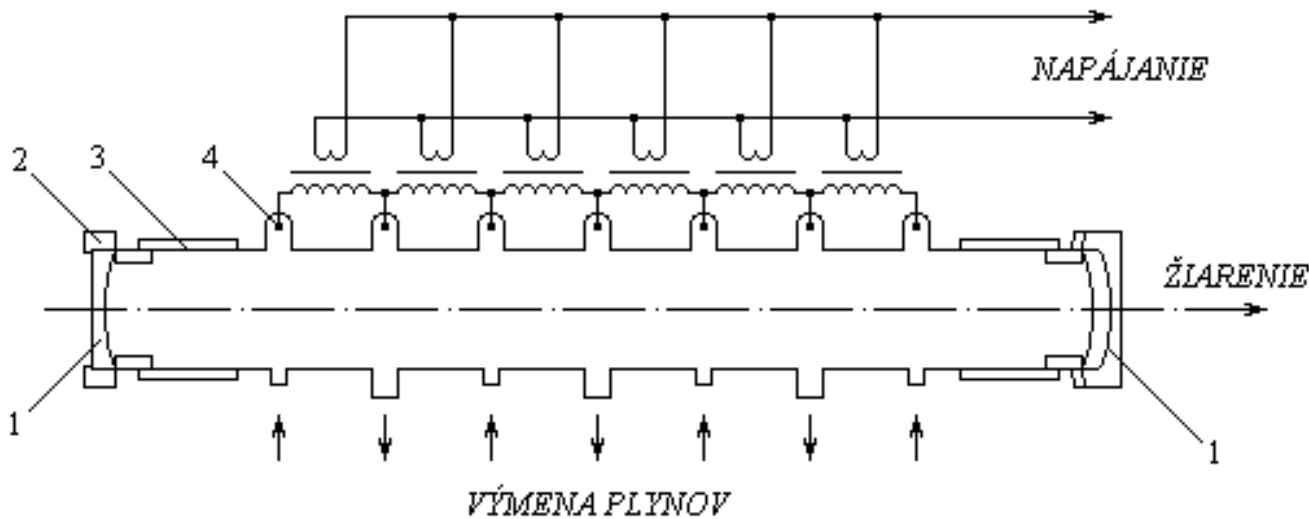
- **Dopplerový jav** - šírka spektrálnej čiary
  - $\Delta f = 59 \text{ MHz}$  pri  $400 \text{ K}$
- Rezonátor dĺžky  $3 \text{ m}$
- Výstupný výkon -  $10 \text{ W}$  až  $10 \text{ kW}$
- Vytvára sa len vid  $\text{TEM}_{00}$ 
  - priemer - od  $1$  do  $2 \text{ cm}$
- Laser s výbojovou trubicou zloženou zo sekcií
- Pričný prietokový systému zmesi plynov
- Typická účinnosť je -  $20$  až  $30 \%$
- Ostatné lasery -  $1\%$
- GaAs polovodičový laser nad  $40 \%$

## 1) CO<sub>2</sub> laser s rýchlym prietokom zmesi plynov

- Rýchlosti prietoku plynov -  $10^3 \text{ m}^3/\text{min}$
- Výkon lasera je 1 až 30 kW
- Dĺžka lasera  $\sim 1 \text{ m}$



Obr. 1.26 Konštrukcia prietokového CO<sub>2</sub> lasera.

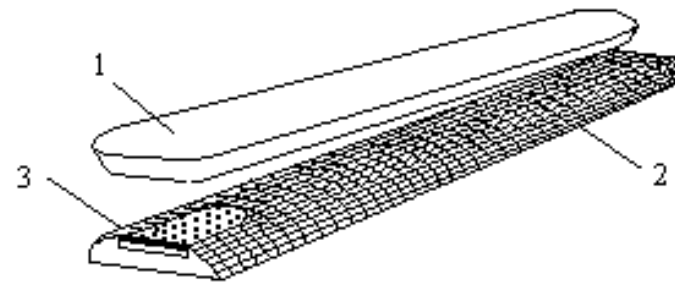
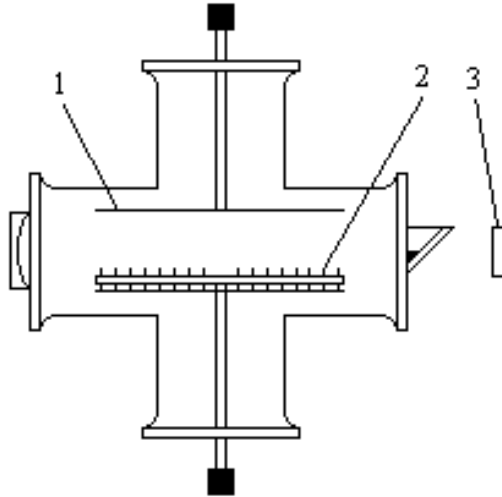


Obr. 1.27 Konštrukcia CO<sub>2</sub> lasera s výbojovou trubicou zloženou zo sekcií.

## 2) TEA CO<sub>2</sub> laser

### TEA - Transversely Excited Atmospheric pressure laser

- Čerpaný napät'ovými impulzmi rádovo megavolt
- Marxov kondenzátorový generátor
- Impulzy - energiou niekoľko **J**, dĺžka niekoľko  $\mu\text{s}$
- Veľmi vysoké napätie ( $\sim 10^5$  až  $10^6$  V)
- Používa priečny výboj
- Špeciálny tvar elektród
- Submikrosekundové impulzy - energia **od jednotiek do stoviek J**

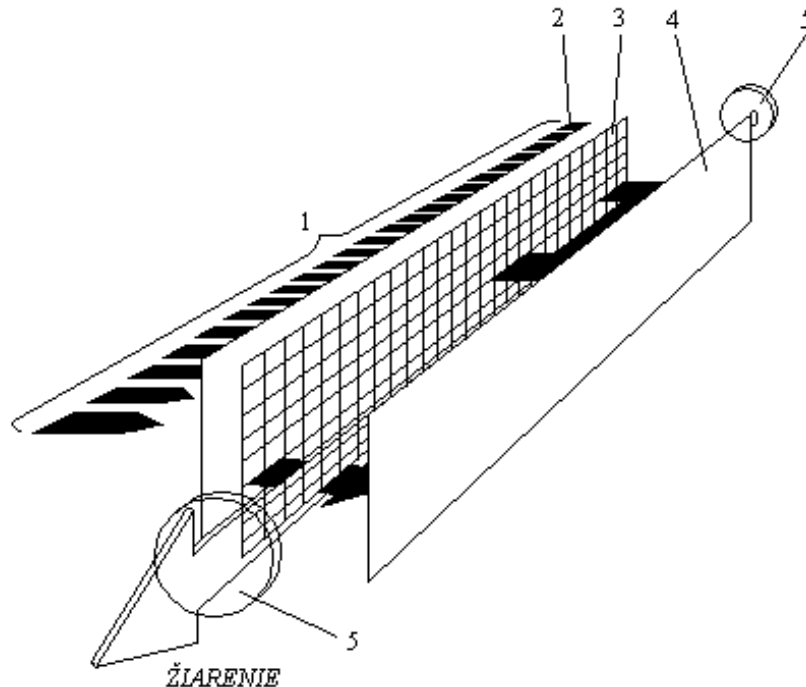


Obr. 1.28 Konštrukcia TEA CO<sub>2</sub> lasera.

Obr. 1.29 Konštrukcia elektród TEA CO<sub>2</sub> laser.

### 3) CO<sub>2</sub> lasery s elektrónovou ionizáciou

- Voľné elektróny v plazme majú dve rôzne funkcie:
  - ❖ Vytvárať nové elektrón – iónové páry
  - ❖ Vybudiť molekuly dusíka
- Tieto dve funkcie od seba oddelené
- Ionizácia zmesi plynov - rýchle elektróny - **100 až 200 keV**
- Vybudenie molekúl dusíka – pomalé elektróny – **3 až 4 eV**
- Energie výstupného žiarenia v impulzovom režime sú až **niekoľko tisíc J** pri účinnosti **~ 25%**



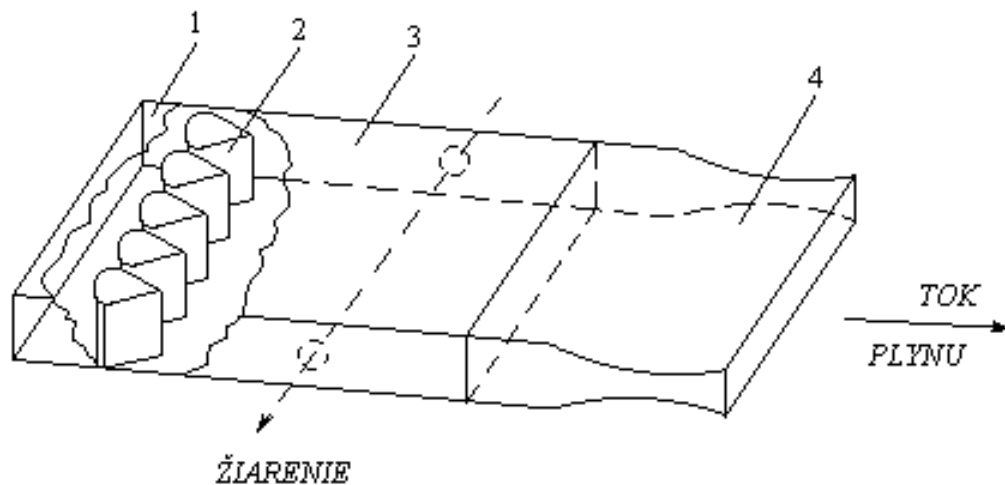
Obr. 1.30 Schéma TEA CO<sub>2</sub> lasera s elektrónovou ionizáciou.

## 4) Plynové dynamické CO<sub>2</sub> lasery

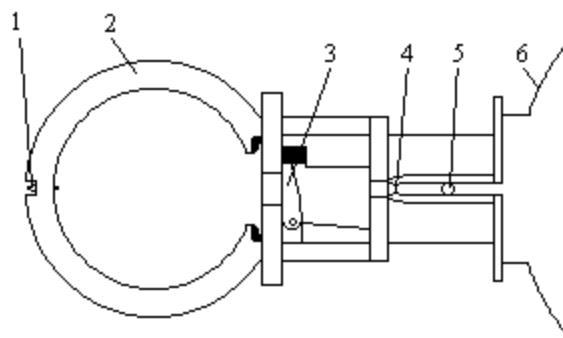
- Inverzia populácie hladín vytvorená prudkým rozpínaním zahriateho plynu
- „Zamrznutie“ obsadenia hladiny - zodpovedajúca hodnote pri teplote horiaceho plynu
- Systém nadzvukových dýz
- Palivo (C<sub>2</sub>N<sub>2</sub> alebo CO) a kyslík (alebo vzduch)
- Machovo číslo  $\sim 4$
- Výstupný výkon - až  $10^6$  kW
- **Impulzové plynové dynamické lasery**

Zmes plynov (CO, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> a N<sub>2</sub>) zapalovaný elektrickou iskrou

Dosiahnutý výkon  $\sim 450$  kW, pre periódy  $\sim 4$  ms, pre teplotu  $2000$  K a tlak  $6,9$  MPa ( $70$  atm) v pracovnom priestore



**Obr. 1.31** Konštrukcia plynového dynamického CO<sub>2</sub> lasera.



**Obr. 1.32** Konštrukcia impulzového plynového dynamického CO<sub>2</sub> lasera.

## 5) Vlnodové CO<sub>2</sub> lasery

- Dielektrický jednoividový vlnovod
- Keramika **BeO**
- Výstupný výkon **0,2 W** na **1 cm**
- **10 cm** dlhý laser **~ 2 W**
- Kompaktný elektronický prvok
  - Priemer **~ 2 cm**
  - Dĺžka **5 až 10 cm**

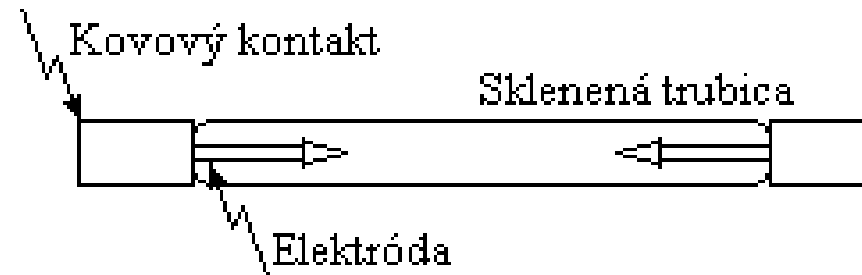
## 1.4 TUHOLÁTKOVÉ LASERY

- **Aktívna látka - Dielektrický kryštál**
  - Sklo
- **Dotované prímеси vhodných prvkov**
  - aktívne centrá
- **Prechodové kovy, vzácne zeminy a aktinidy**
- **Optické čerpanie pomocou impulzových výbojok:**
  - **Plnene xenónom, kryptónom alebo héliom**
  - **Sú zdrojom intenzívneho žiarenia**
  - **Ultrafialová a viditeľná oblasť spektra**

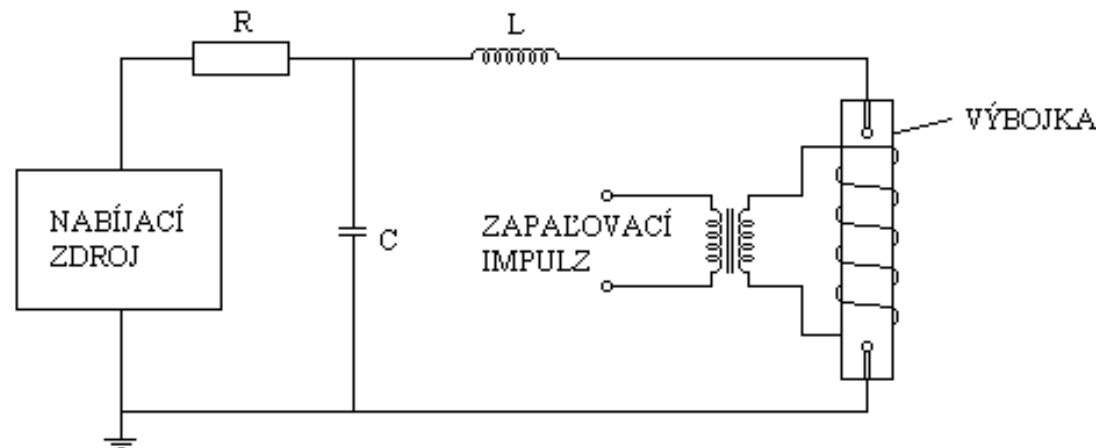


## 1.4 TUHOLÁTKOVÉ LASERY

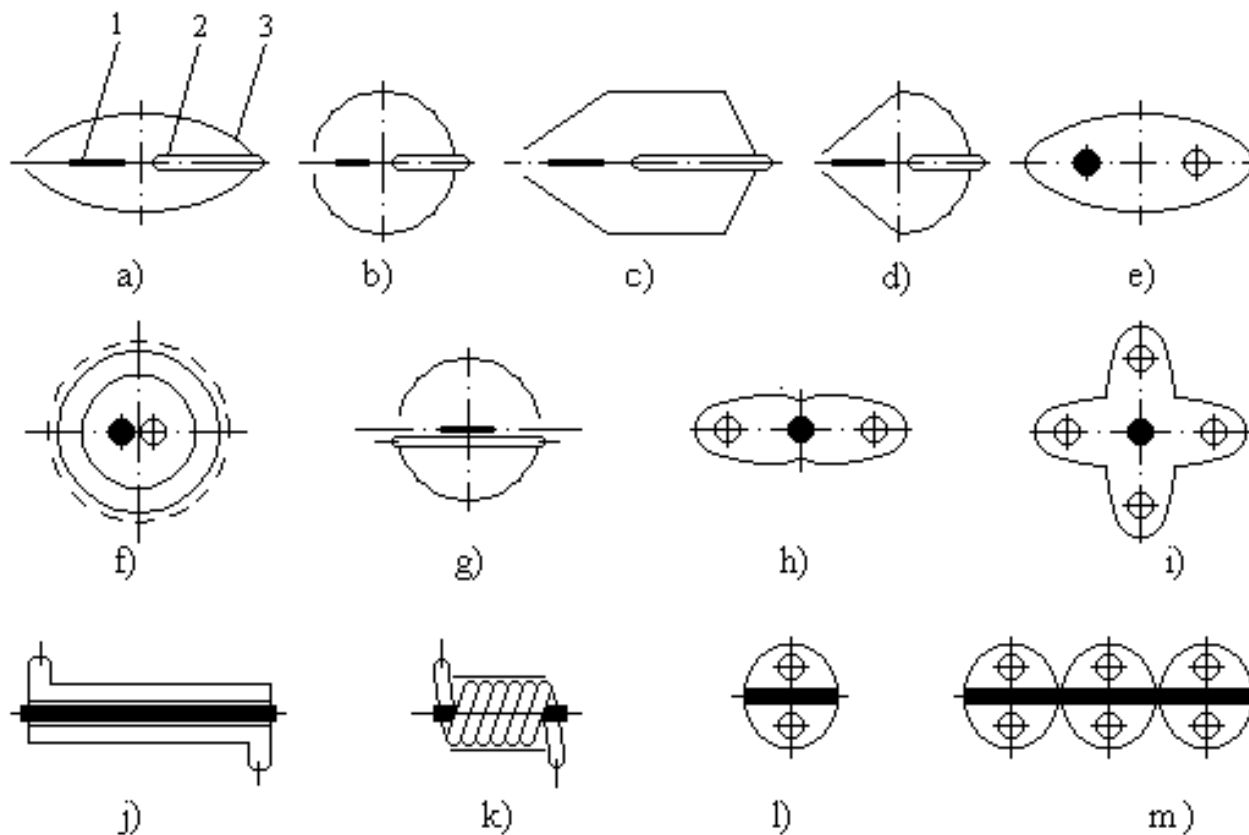
- **Aktívny materiál tuholátkových laserov**
  - **tvar valca s rovinnými dokonale opracovanými a vyleštenými čelnými plochami**
  - **Priemer valca - niekoľko centimetrov**
  - **Dĺžka - desiatky centimetrov - niekoľko metrov**
  - **Typická dĺžka - niekoľko decimetrov**
- **Odrážač – vhodnej konštrukcie (zväčšenie účinnosti optického čerpania)**
  - **Rubín**
  - **Neodýmom dopovaný yttriový hliníkový granát YAG (Yttrium Aluminium Garnet), Nd:YAG**
  - **Neodýmom dopované sklo - SiO<sub>2</sub>, Nd:sklo**



**Obr. 1.33 Konštrukcia výbojovej trubice.**



**Obr. 1.34 Schéma napájacieho zdroja tuholátkového lasera.**



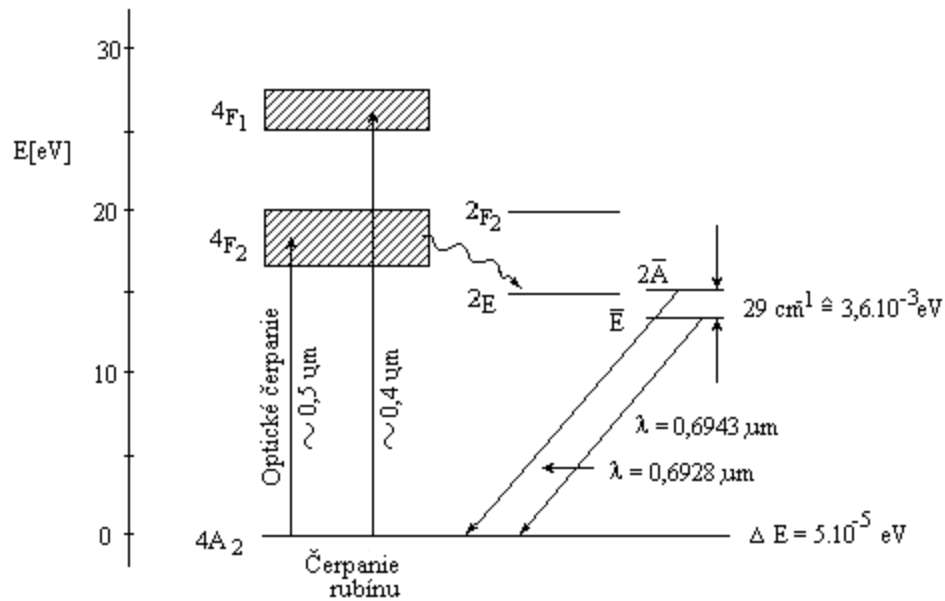
**Obr. 1.35 Rôzne konštrukcie odrážačov tuholátkových laserov:  
(1) aktívna látka, (2) výbojka, (3) odrážač.**

# 1.4.1 RUBÍNŮVY LASER

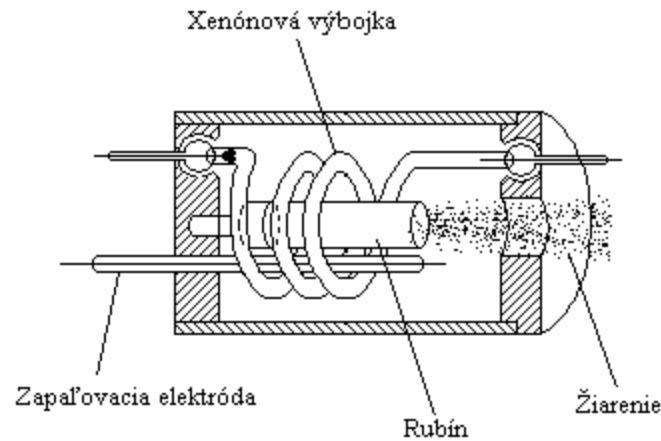
- **Prvý laser - v r. 1960**
- **Impulzový režim pri izbovej teplote**
- **Kontinuálny režim pri 77 K**
- **Rubín je kryštál  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (zafír – bielej farby) dotovaný iónmi  $\text{Cr}^{3+}$**   
**(0,05% váhového množstva  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  v  $\text{Al}_2\text{O}_3$ )**
- **Aktívne centrá -  $10^{19}$  iónov na  $\text{cm}^3$**

# 1.4.1 RUBÍNOVÝ LASER

- **Tvar valca**  
dĺžka valca je 5 až 10 cm, priemer 6 až 10 mm
- **Čelné plochy: s veľkou presnosťou vybrúsené na planparalelné plochy a vyleštené, pokryté vysokoodrazeným materiálom**
- **Fabryho – Perotov rezonátor**
- **Hladina  $^2E$  tvorí hornú a hladina  $^4A_2$  dolnú hladinu laserového prechodu pre stimulovanú emisiu**
- **Hladina  $^2E$  je rozštiepená na dve blízke hladiny  $2\bar{A}$  a  $\bar{E}$**
- **Vznik dvoch emisných čiar -  $0,6943 \mu\text{m}$   
-  $0,6928 \mu\text{m}$**



**Obr. 1.36 Energetické hladiny a prechody rubínového lasera.**

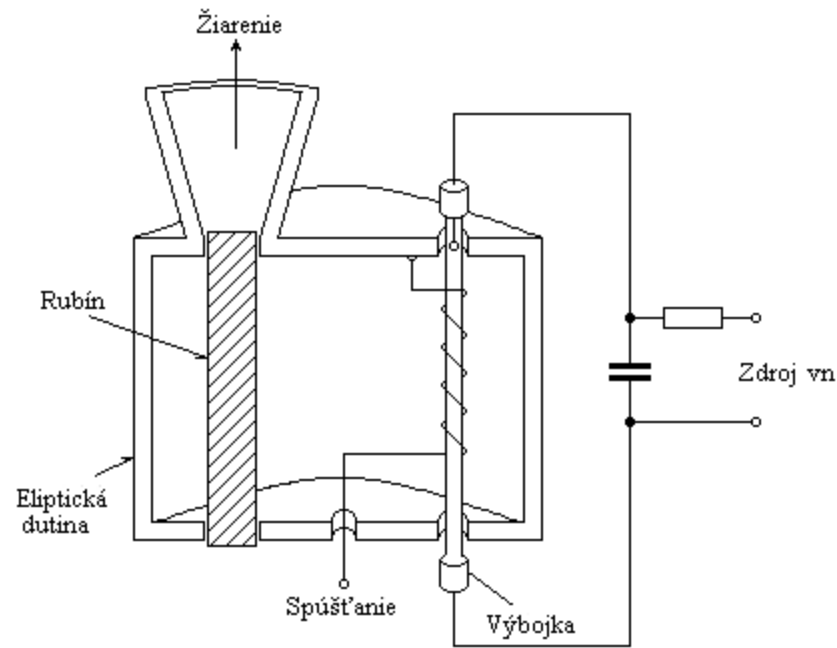


**Obr. 1.37 Rubínový laser s čerpacou výbojkou v tvare špirály.**

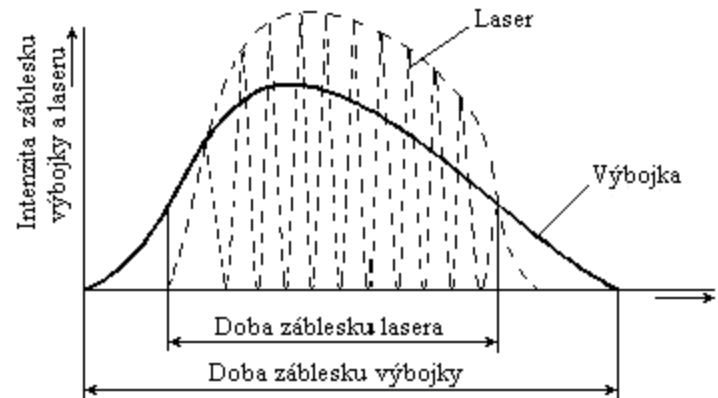
- ${}^4A_2$  je tiež rozštiepená na emisné čiary v mikrovlnovom pásme - Maser
- Omnoho intenzívnejšia je emisná čiara s  $\lambda = 0,6943 \mu\text{m}$ , zodpovedajúca prechodu  $\bar{E} \rightarrow {}^4A_2$
- $\bar{E}$  je metastabilná s veľkou životnosťou  $\tau \approx 3 \text{ ms}$
- Farba výstupného žiarenia je jasne červená
- Čerpanie lasera prebieha absorpciou svetla pásmom  ${}^4F_2$  (Zelené svetlo) a  ${}^4F_1$  (Modré svetlo)
- Šírka čiary stimulovanej emisie prechodu  $\bar{E} \rightarrow {}^4A_2$   
Pri izbovej teplote  $\Delta f = 3 \cdot 10^{11} \text{ Hz}$ ,  
pri teplote 77 K sa zníži na  $\Delta f = 3 \cdot 10^9 \text{ Hz}$
- Laser pracuje v trojhladinovom systéme

- Pri teplote  $T = 290 \text{ K}$  a koncentrácii aktívnych centier  $2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  je potrebný príkon čerpania  $\sim 615 \text{ W/cm}^3$  - **zahrieva kryštál**
- **Bez intenzívneho chladenia nie je možný kontinuálny režim práce**
- **V impulzovom režime sa však rubínový kryštál veľmi osvedčil vzhľadom na dobré mechanické aj optické vlastnosti a pomerne lacnú výrobu**
- Čerpanie lasera je pomocou xenónovej alebo ortuťovej výbojky
- Priemerná hodnota výstupnej energie žiarenia rubínového lasera v jednom impulze je **1 až 10 J** (špičková  $\sim 150 \text{ J}$ ) pri účinnosti lasera  $\sim 0,75\%$
- V rubínových laseroch s moduláciou akosti optického rezonátora (tzv. **Q laseroch**) vznikajú „**obrie**“ impulzy o dĺžke  $10^{-7}$  až  $10^{-9} \text{ s}$ , s výstupným výkonom až  $10^9 \text{ W}$





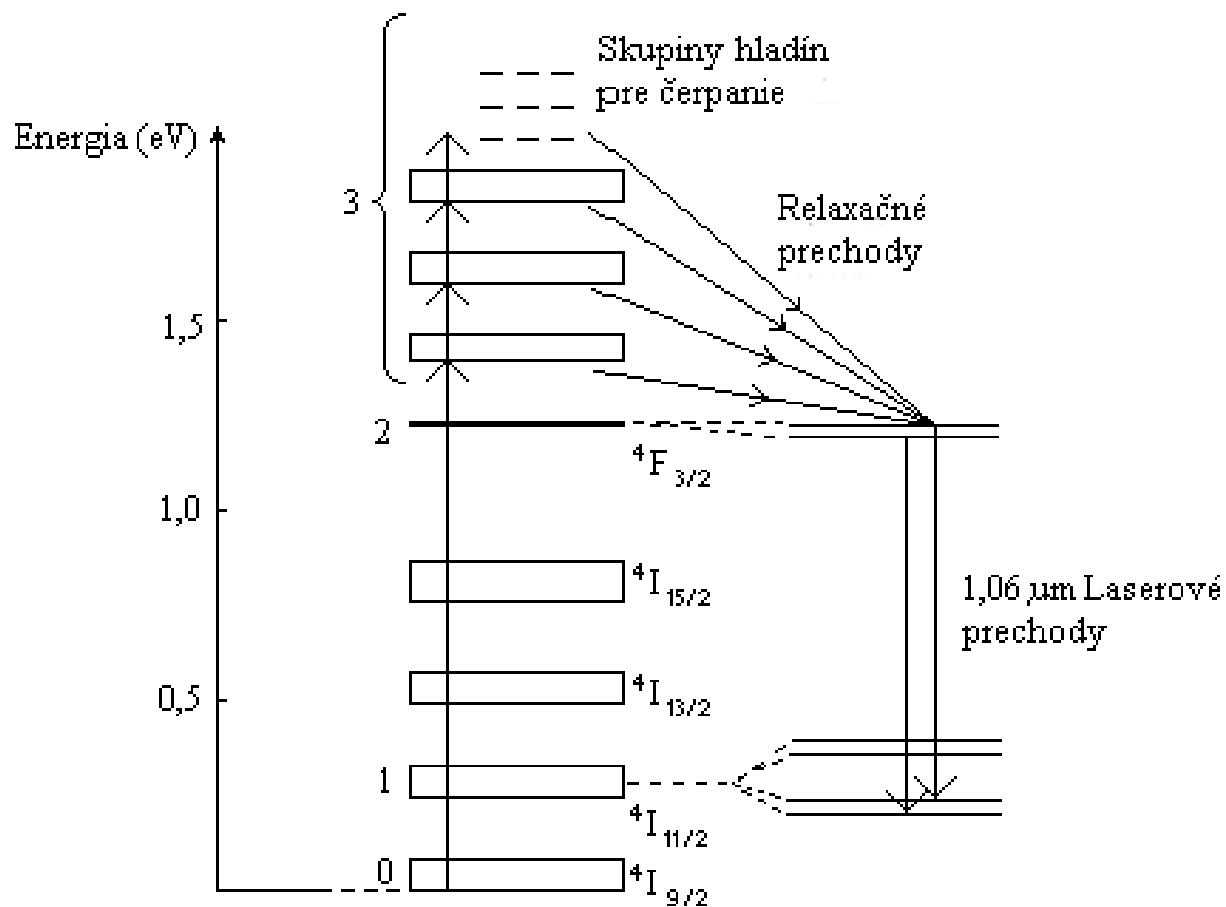
**Obr. 1.38 Rubínový laser s tyčovou výbojkou v eliptickej čerpacej dutine.**



**Obr. 1.39 Časový priebeh intenzity stimulovaného žiarenia lasera a intenzity.**

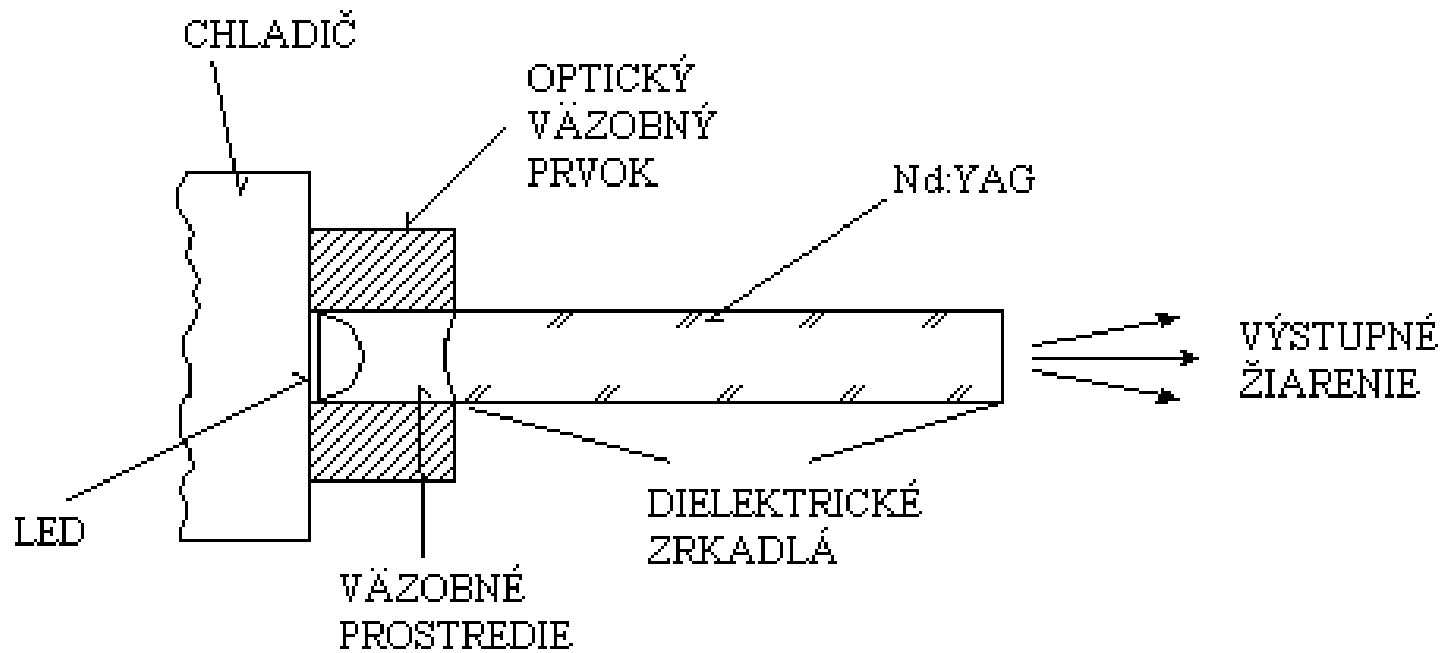
## 1.4.2 NEODÝMOVÝ YAG LASER

- **Yttrium hliníkový granát (YAG) -  $Y_3Al_5O_{12}$**
- **Aktívne centrá  $Nd^{3+}$  - veľmi dobré mechanické aj optické vlastnosti, vysoká tepelná vodivosť (desaťkrát vyššia ako sklo) - Nd : YAG**
- **Veľký počet absorpčných pásiem - vyššie ako hladina  $^4F_{3/2}$**
- **Laserový prechod -  $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$  - 1,064  $\mu m$**
- **$^4I_{11/2}$  je pri izbovej teplote je neobsadená**
- **Aktívna látka sa používa v tvare tyčiniek, vyrobených z taveniny Nd : YAG ťahaním**
- **Tvar valca - dĺžka 4 až 8 cm, priemer 3 až 5 mm**
- **Optické čerpanie je ako pre rubínový laser**
- **Xenónové výbojky pre výstupný výkon  $\sim 10$  W**



Obr. 1.40 Zjednodušený diagram energetických hladín pre ión neodýmu v YAG laseri.

- **Kryptónové výbojky** pre výstupný výkon  $\sim 100$  W a viac (až do 400 W)
- Čerpanie **wolfrámovou žiarovkou** - plnená parami jódu
- Priemerná hodnota energie v jednom impulze **20 až 60 J pri dĺžke impulzov 0,5 až 10 ms**
- Účinnosť lasera  $\sim 3\%$
- **V Nd : YAG Q laseroch** môžu vznikáť krátke „obrie“ impulzy s výstupným výkonom  $\sim 100$  MW a viac
- **Zdvojenie frekvencie**
  - Laser vyžaruje na vlnovej dĺžke **0,53  $\mu\text{m}$**
  - **Zelená oblasť viditeľného spektra**
- Čerpanie Nd : YAG lasera pomocou elektroluminiscenčnej diódy (LED)
  - **Dĺžka 5 mm a priemer 0,5 mm**
  - **Výstupný výkon niekoľko mW**



**Obr. 1.41 Konštrukcia Nd:YAG lasera čerpaného LED.**

## 1.4.3 NEODÝMOVÝ SKLENENÝ LASER

- **Nd : sklo** - optimálna koncentrácia **Nd** je  $\sim 2\%$
- **Vytvarajú vzorky veľkých rozmerov s vysokou optickou homogenitou**
- **Ľubovoľné rozmery aj tvar – od vlákien s priemerom niekoľko mikrometrov až po tyče s dĺžkou  $\sim 2$  m a priemerom  $\sim 5$  cm**
- **Sú podstatne lacnejšie**
- **Nevýhodou skla je jeho malá tepelná vodivosť**
- **Aspoň v jednom smere malý rozmer**

## 1.4.3 NEODÝMOVÝ SKLENENÝ LASER

- Sklenené lasery majú tiež vyššiu účinnosť
- **Veľké hodnoty výstupného výkonu** v impulzovom režime  $\sim 10^6$  W pri dĺžke impulzu  $\sim 1$  ms a až  $10^{12}$  W pri dĺžke impulzu  $\sim 1$  ps

### Aplikácie

- Spracovanie materiálov
- Výskum termojadrových reakcií
- **Kremenné vlákna - vláknové lasery** aktivované neodýmom s priemerom 20 až 50  $\mu\text{m}$  a dĺžkou 1 až 2 **cm** pracujú ako zdroj laserového žiarenia na vlnovej dĺžke  $\lambda = 1,06$   $\mu\text{m}$  s čerpacím príkonom niekoľko **mW**

# 1.5 KVAPALINOVÉ LASERY

- ❖ **Výhoda - optická homogenita**
  - **Obvod tepla z aktívnej látky metódou cirkulácie kvapaliny v optickom rezonátore a vhodnom chladiči**
  - **Nízka cena**

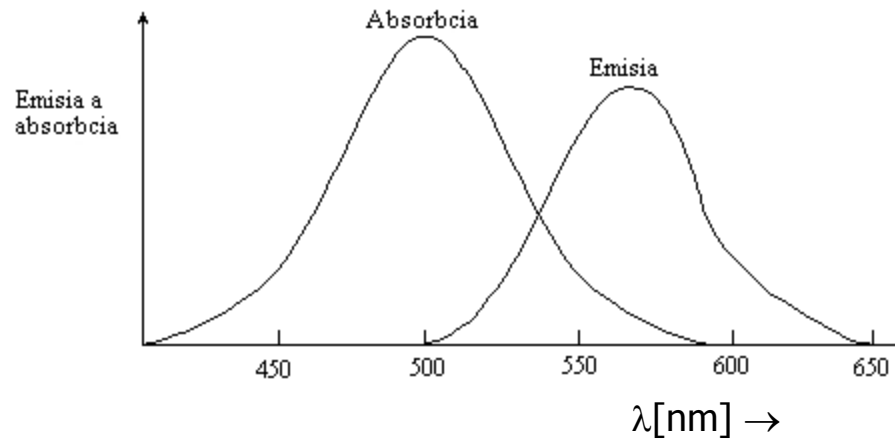
## **Aktívne látky troch druhov:**

- **Roztoky chelátov vzácnych zemín**
- **Roztoky organických farbív**
- **Roztoky neorganických zlúčenín vzácnych zemín**

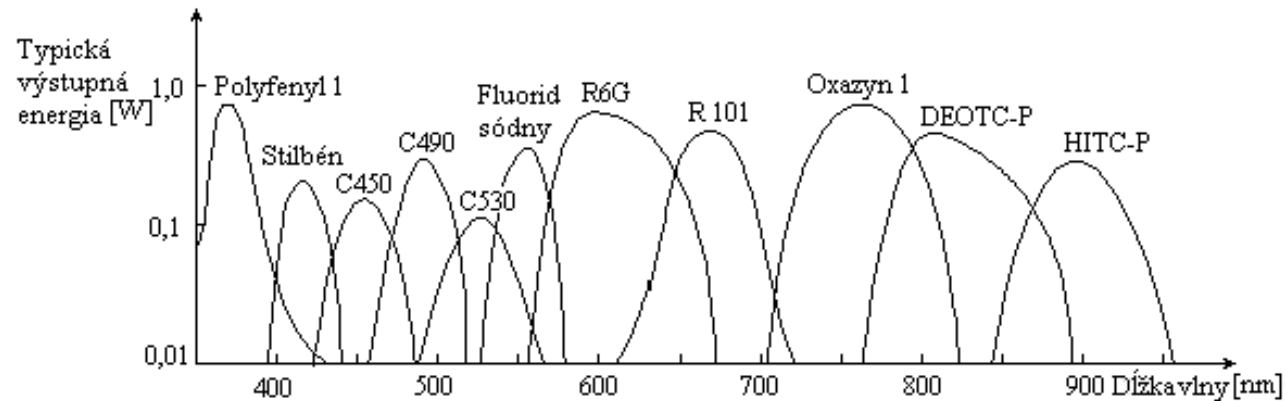
## **Cheláty vzácnych zemín**

- ❖ **Zložité organické komplexy**
  - ❖ **Ióny vzácnych zemín obklopené kyslíkovými atómami, ktoré patria organickým molekulám**
    - Komplexy iónov euróbia s  $\beta$  - diketónami, napr.: Benzolacetanát euróbia (ako roztok v etanole, metanole a dimetilformamide)
- ## **Proces vybudenia chelátu má dve etapy**
- ❖ **V prvej etape energiu čerpaceho zdroja pohlcuje organická časť molekuly**
  - ❖ **V druhej etape organická časť molekuly odovzdá energiu iónu vzácnej zeminy**





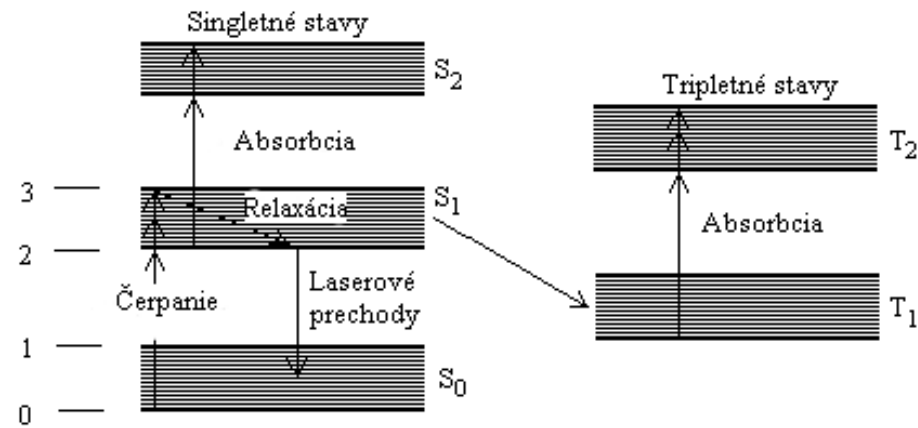
**Obr. 1.42 Absorbancia a emisia (fluorescencia) farbivého lasera.**



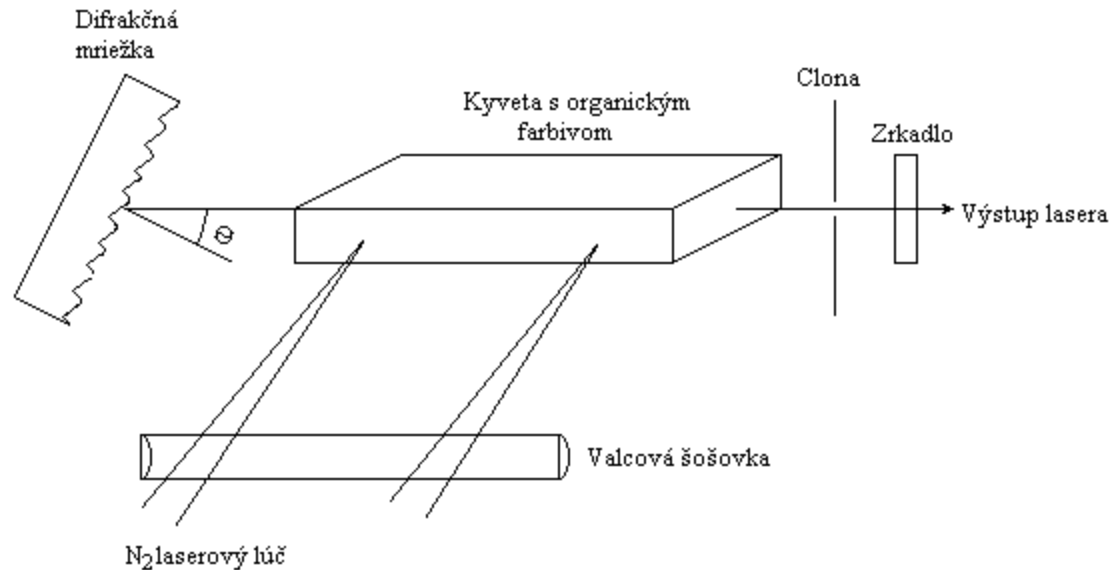
**Obr. 1.43 Relatívne výstupy niektorých hlavných farbivých laserov čerpaných iónovými lasermi.**

- Čerpanie v širokých pásmach
- **Nedostatok**
  - ❖ **Veľmi silne pohlcujú optické žiarenie**
  - ❖ **Zabraňujú prenikaniu žiarenia do hlbších vrstiev aktívnej látky**
  - ❖ **Malá fotochemická stálosť**
- **Výstupná energia chelátových laserov je len jednotky mJ**
- **Vyžaruje vo viditeľnej oblasti svetla od 0,488 do 0,65  $\mu\text{m}$**

- **Organické farbivá majú veľmi široké pásmo luminiscencie**
- Podobné známym farbivám, ktoré sú používané pri farbení textílií, umelých látok, v kozmetickom priemysle
- **Rodamín 6G** obsahuje šesť benzolových jadier a má chemický vzorec  $\text{C}_6\text{H}_{27}\text{N}_2\text{O}_3\text{Cl}$  - molekulová váha je  $\sim 450$  - aktívna látka sa používa metylalkoholový roztok
- **Energetický diagram**
  - Molekuly sú čerpacím zdrojom čerpané zo základného stavu  $\mathbf{S}_0$  do vybudeného stavu  $\mathbf{S}_1$
  - Vibračné a rotačné hladiny
- **Inverzia populácie hladín medzi stavom  $\mathbf{S}_1$  a hornými hladinami  $\mathbf{S}_0$**
- Laserový prechod -  $\mathbf{S}_0, \mathbf{T}_1$
- Celá oblasť nastavenia vlnovej dĺžky pre rôzne organické farbivá je od 350 do 800 **nm**
- Oblasť nastavenia vlnovej dĺžky **pre jeden materiál** je  $\sim 30$  **nm**



**Obr. 1.44 Schéma energetických hladín pre molekuly farbiva.**



**Obr. 1.45 Schéma konštrukcie farbivového lasera čerpaného N<sub>2</sub> laserom.**

- **S – siglentný stav**

- **T – tripletný stav**

## Rýchle čerpace zdroje

- Na čerpanie farbivových laserov sa obyčajne používa žiarenie iných laserov

- **Dusíkový laser s impulzmi ~ 100 ns**

- Preladenie lasera sa uskutočňuje pomocou disperzného prvku

- Difrakčná mriežka - impulzy s výkonom až do 10 **MW**  
s dĺžkou ~ **ns** pri divergencii ~ 2 **mrad**

- **Kontinuálne farbivové lasery**

- ❖ **Rýchly prietok roztoku organického farbiva**

- ❖ **Vyžarujú v oblasti ~ 400 až 800 nm s výstupným výkonom ~ 0,1 až 1 W (najvyšší pre rodamín 6G 1,2 W)**

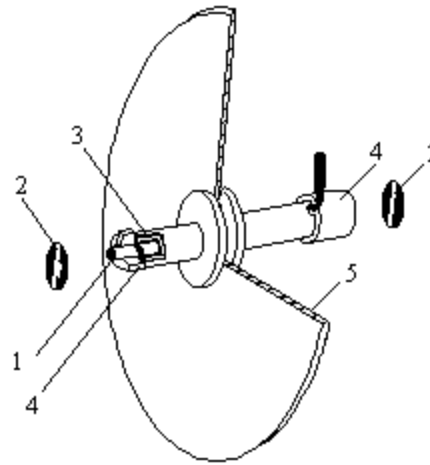
- ❖ **Možnosť preladiteľnosti**

- **Neorganické zlúčeniny vzácnych zemín - roztok chloridu alebo kysličníka neodýmu v oxychloride selénu ( $\text{SeOCl}_2$ )**

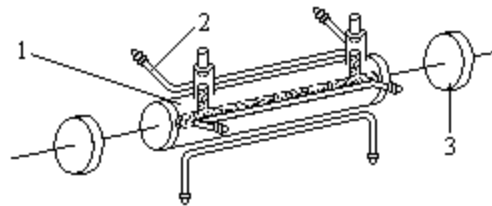
- **jedovatosť a vysoká korozivita**

- **$\text{Nd}^{3+}$  :  $\text{SeOCl}_2$  a  $\text{Nd}^{3+}$  :  $\text{POCl}_3$**  - sú blízke vlastnostiam  **$\text{Nd}^{3+}$  : YAG** alebo  **$\text{Nd}^{3+}$  : sklo laserov**

- **Možnosti dosiahnutia vyššieho výstupného výkonu a vyššej účinnosti**



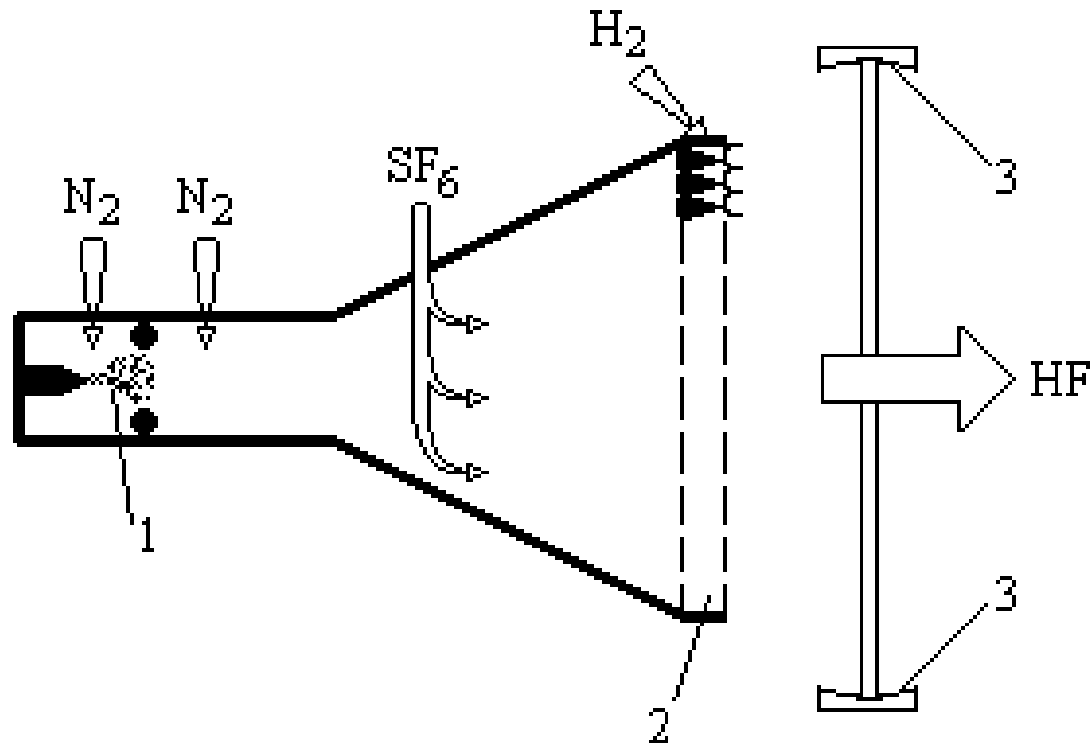
**Obr. 1.46** Farbivový laser čerpaný impulznou výbojkou.



**Obr. 1.47** Konštrukcia kvapalinového lasera.

# 1.6 CHEMICKÉ LASERY

- **Inverzia populácie** hladín vzniká priamo pôsobením elementárnej chemickej reakcie
- V chemickom laseri zahrievaním je molekulový dusík ( $N_2$ ) pomocou elektrického výboja zahriaty v zásobníku na teplotu 2000 K
- **Hexafluorid sírnatý ( $SF_6$ )**
- F preteká **nadzvukovou rýchlosťou** cez systém dýz
- V prúde vodíka ( $H_2$ ) vznikajú vybudené molekuly  **$HF^*$**
- Maximálny výstupný výkon je  **$\sim 4,5$  kW**
- **$HF^*$  - 4,9 až 5,7  $\mu m$**
- **$CO^*$  -4,9 až 5,7  $\mu m$**
- Použité **v miestach bez zdroja elektrickej energie – vojenské aplikácie**



Obr. 1.48 Schéma chemického lasera.

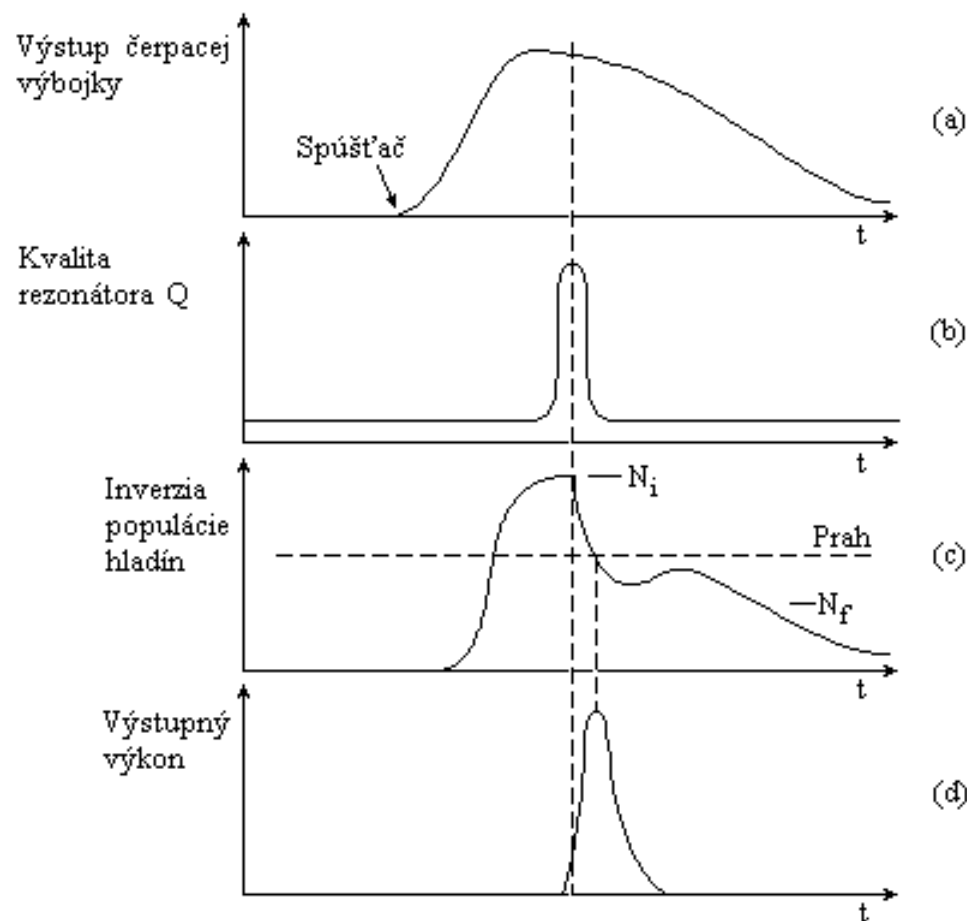


**Tabuľka 1.8 : Chemické lasery**

Chemické reagenty	Reakcie	Aktívna molekula	Pracovná vlnová dĺžka [ $\mu\text{m}$ ]	Výstupný výkon	Chemická účinnosť [%]
$\text{H}_2 - \text{F}_2$	$\text{F} + \text{H}_2 \rightarrow \text{HF}^* + \text{H}$	$\text{HF}^*$	2,6 až 3,6	4500 W (kontinuálne) 2300 J (impulzne)	10
$\text{D}_2 - \text{F}_2$	Podobné ako pre HF	$\text{DF}^*$	3,6 až 5,0	-	-
$\text{H}_2 - \text{Cl}_2$	Podobné ako pre HF	$\text{HCl}^*$	3,5 až 4,1	-	-
$\text{CS}_2 - \text{O}_2$	$\text{O} + \text{CS}_2 \rightarrow \text{CS} + \text{SO}$ $\text{SO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2 + \text{O}$ $\text{O} + \text{CS} \rightarrow \text{CO}^* + \text{S}$ $\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SO} + \text{O}$	$\text{CO}^*$	4,9 až 5,7	25 W (kontinuálne)	2,5
$\text{D}_2 - \text{F}_2 - \text{CO}_2$	$\text{F} + \text{D}_2 \rightarrow \text{DF}^* + \text{D}$ $\text{D} + \text{F}_2 \rightarrow \text{DF}^* + \text{F}$ $\text{DF} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{DF} + \text{CO}^*_2$	$\text{CO}^*_2$	10,6	560 W (kontinuálne)	5
$\text{C}_3\text{F}_7\text{I}$	Fotolýza $\text{C}_3\text{F}_7\text{I} \rightarrow \text{C}_3\text{F}_7 + \text{I}^*$	$\text{I}^*$	1,32	65 J (impulzne) 1,2 GW (max. výkon)	-

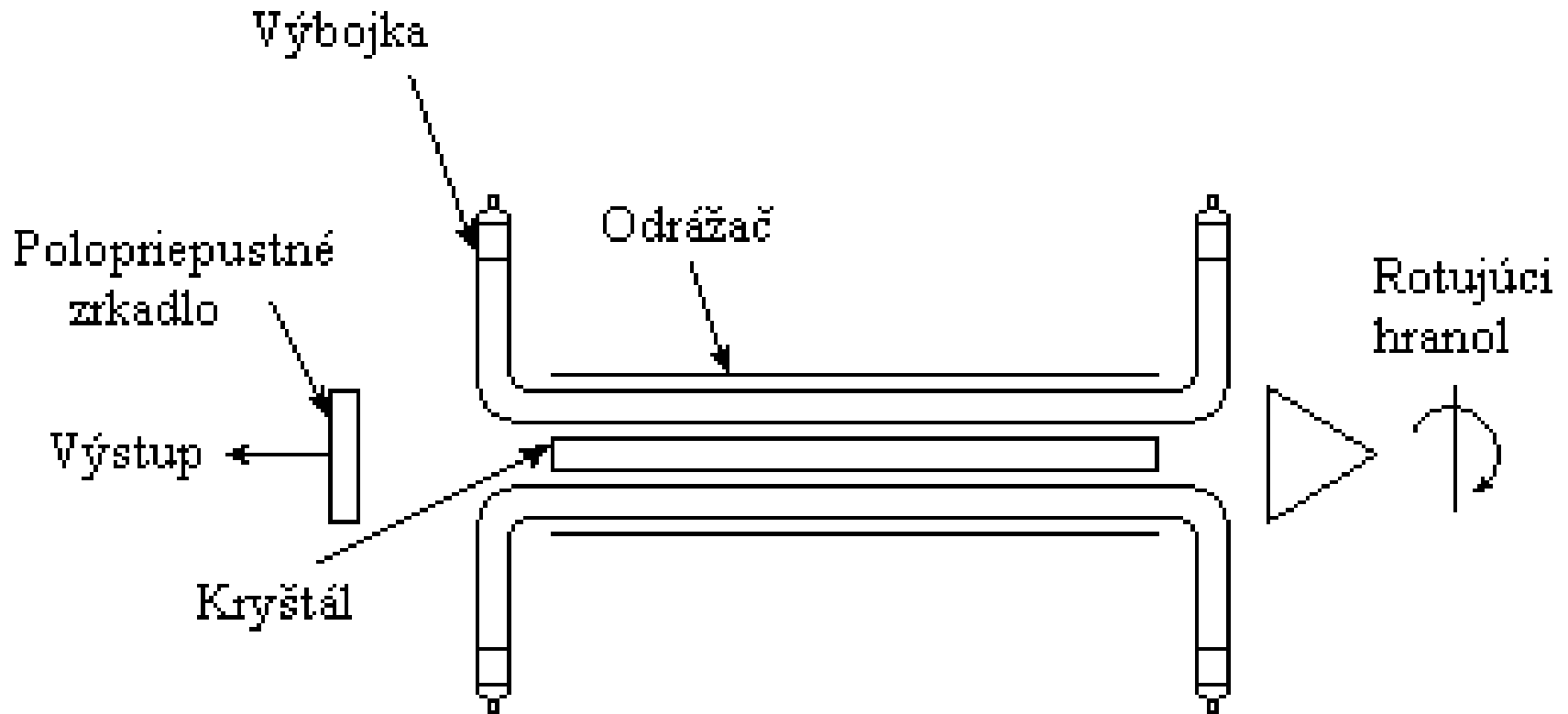
## 1.7 MODULÁCIA LASEROVÉHO ŽIARENIA – Q LASERY

- **Modulácia**
- **Pôsobenie informáciu prenášajúceho signálu na žiarenie lasera**
  - ❖ Zmenou indexu lomu optického prostredia
  - ❖ Rozštiepením alebo posunutím pracovných hladín energie atómov a molekúl
- **Fázová, amplitúdová, polarizačná alebo frekvenčná modulácia**
- **Zeemanov a Starkov jav**
- **Rozdeľujeme**
  - ❖ **Vnútrorezonátorové** (vnútorné)
  - ❖ **Vonkajšie** (mimorezonátorové)
- **Optické kľúče**
  - ❖ Rotujúce zrkadlo (optický hranol)
  - ❖ Elektrooptický kľúč
  - ❖ Pasívny kľúč
  - ❖ Akusticko-optický kľúč
- **Q – laser - Rotujúci hranol**
- **Porroho hranol**

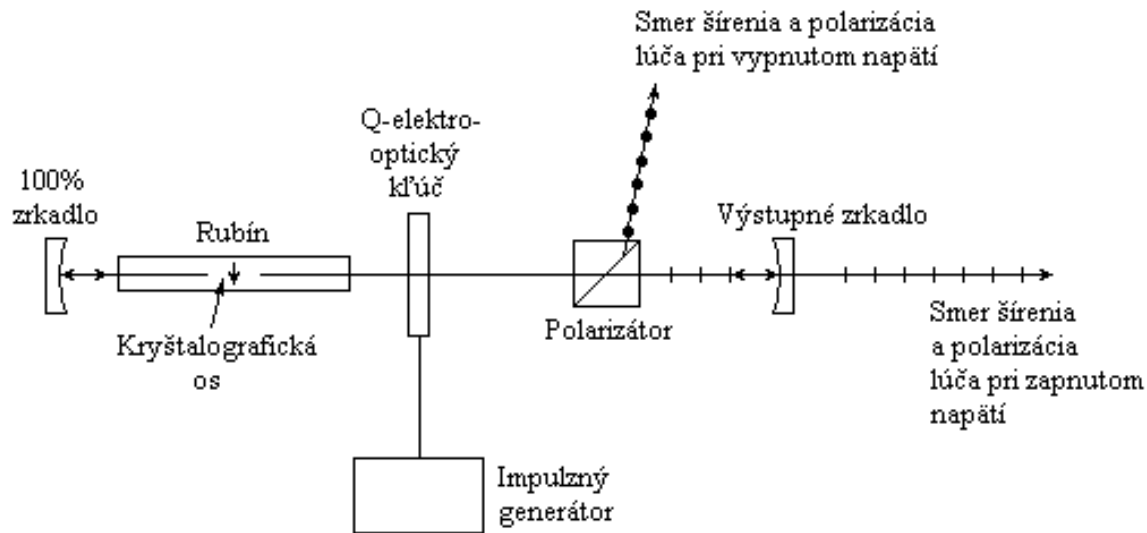


**Obr. 1.51 Práca Q-lasera: (a) výstup čerpacej výbojky; (b) kvalita rezonátora  $Q$ ; (c) inverzia populácie hladín; (d) výstupný výkon – tzv. Q-impulz.**

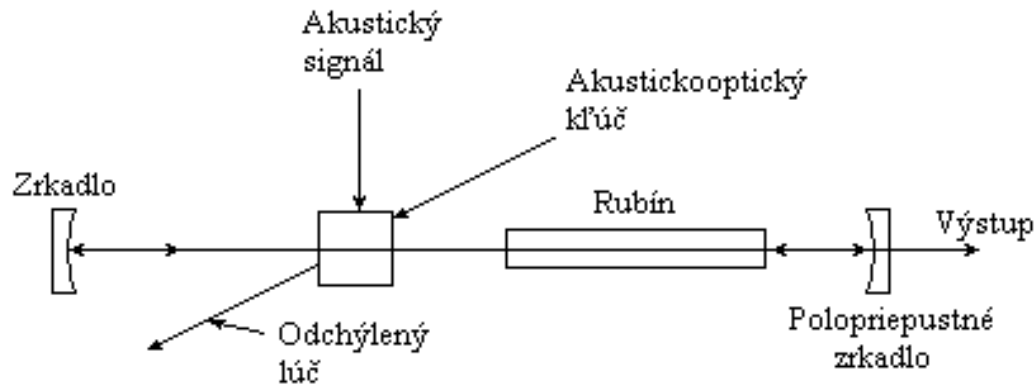
- **Rubínový laser**
  - **Voľný režim práce**
  - **Energia impulzu 10 J**
  - **Dĺžka impulzu  $5 \cdot 10^{-4}$  s**
  - **Špičkový výkon  $2 \cdot 10^4$  W**
  - **Q Laser energia impulzu 1 J, dĺžka impulzu  $5 \cdot 10^{-8}$  s a špičkový výkon  $2 \cdot 10^7$  W**
- **Elektrooptické a akusticko-optické modulátory**
  - ❖ Elektrooptický jav používa kerrov jav v kvapalinách (v nitrobenzole) a lineárny pockelsov jav v niektorých monokryštáloch (**KDP** a **ADP**)
- **Akusticko-optické modulátory** kvality sa používajú pre **Nd : YAG** lasery
- **Pasívne optické kľúče** na báze presvecovaných organických farbív – nasýtenie všetkých molekúl farbiva
  - **Ftalocianín chlóralumínia alebo DDI**  
(t. j. 1. 1' - dietyl – 2.2' - dikarbocianid)
  - **Rozpúšťadlá** - acetón, nitrobenzol, acetónnitril a chlórnaftalén
  - **Nd : sklo lasery** - organické farbivá 9740 a 9860
  - **Najlacnejšie modulátory kvality**
  - **Nemôžu byť synchronizované s vonkajším signálom**



**Obr. 1.52 Q-laser s rotujúcim hranolom.**



**Obr. 1.53 Q-laser s elektrooptickým kľúčom.**



**Obr. 1.54 Q-laser s akustickooptickým kľúčom.**

**Tabuľka 1.9 : Q LASERY**

<b>Typ kľúča</b>	<b>Cena</b>	<b>Stabilita od impulzu k impulzu</b>	<b>Rýchlosť prepnutia</b>	<b>Profil intenzity lúča</b>	<b>Poznámka</b>
<b>Rotujúce zrkadlo</b>	<b>Stredná</b>	<b>Stredná</b>	<b>Pomalá</b>	<b>Dobrý</b>	Dnes sa používa menej často
<b>Elektrooptický prvok</b>	<b>Vysoká</b>	<b>Dobrá</b>	<b>Vysoká</b>	<b>Dobrý</b>	Používa sa pre rubínový laser
<b>Akusticko-optický prvok</b>	<b>Vysoká</b>	<b>Dobrá</b>	<b>Stredná</b>	<b>Dobrý</b>	Používa sa pre Nd : YAG laser
<b>Presvietené farbivo</b>	<b>Nízka</b>	<b>Vynikajúca</b>	<b>Stredná</b>	<b>Vyhovujúci</b>	Používa sa pre rubínový a Nd : sklo laser

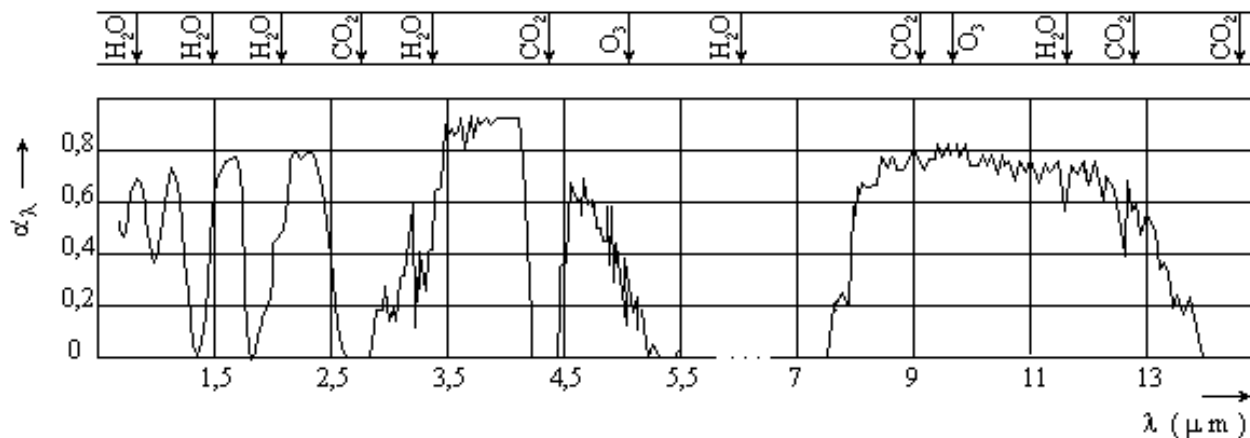
## 1.8 LASEROVÁ TECHNOLOGIA

- **Parametre pre ohodnotenie laserov**
  - Výstupný výkon
  - Režim práce (kontinuálny, impulzový – dĺžka impulzu a ich opakovacia frekvencia, Q- laser)
  - Príkon Účinnosť
  - Rozmery Hmotnosť
- **Význačné vlastnosti optického žiarenia laserov**
  - Žiarenie koherentné
  - Žiarenie je smerové
  - Žiarenie je veľmi intenzívne
- **Klasické zdroje svetla veľkej intenzity**
  - Rádovo  $10^4$  až  $10^5$  W/m<sup>2</sup>
  - Elektrické pole s malou -  $10$  až  $10^2$  V/m
- **Laserové žiarenie**
  - Rádovo  $10^{12}$  až  $10^{13}$  W/m<sup>2</sup>
  - Elektrické pole -  $10^7$  až  $10^9$  V/m



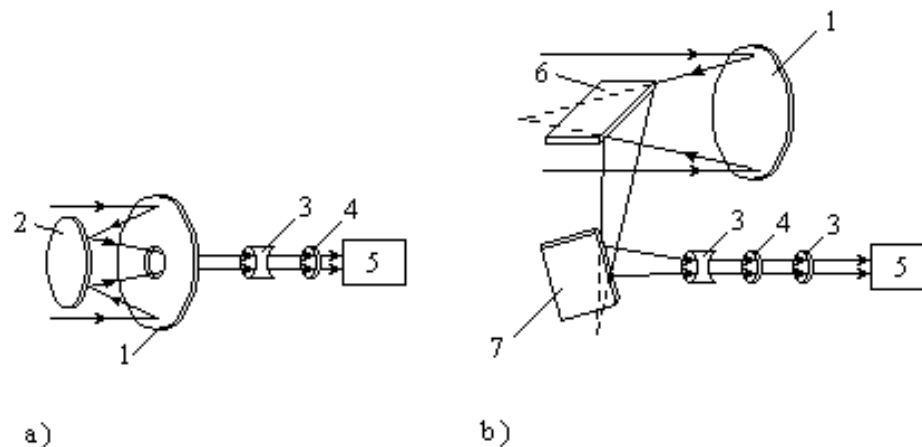


**Obr. 1.55** Bloková schéma optického komunikačného systému.

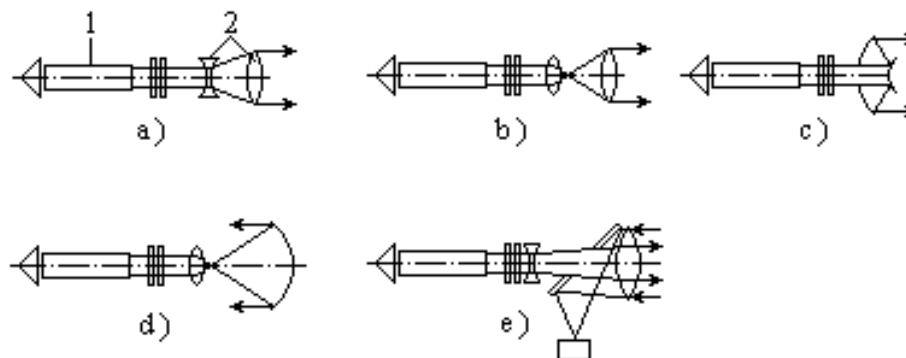


**Obr. 1.57** Útlm optického žiarenia vo vzduchu.

- **Účinnosť laserov**
  - Plynové lasery He – Ne a Ar<sup>+</sup> ( ~ 0,01 až 0,1% )
  - Molekulový CO<sub>2</sub> laser - ( ~ 10 až 30% )
  - Tuholátkové lasery - okolo 1% (Rubínový ~ 0,75%, Nd : sklo ~ 1,02%, Nd : YAG ~ 3%)
- **Najväčšiu účinnosť** - na kryogémne teploty chladené injekčné polovodičové lasery ~ 50%  
(Pri izbovej teplote ~ 5%)
- **Voľný režim práce lasera** - milisekundový impulz - 0,1 do 1 ms
- **Modulácia činiteľa kvality** - rázy, ps impulzy s dĺžkou ~ 10<sup>-12</sup> s
  - Najvyššie hodnoty okamžitých výkonov ~ 10<sup>12</sup> W až 10<sup>14</sup> W
  - Energia rádovo 10 J sa vyžiarí za čas 10<sup>-11</sup> s
- **Impulzový režim práce** - Nd:YAG lasery a CO<sub>2</sub> lasery
- **Vznikajú impulzy** s dĺžkou ~ 10 až 100 μs, s opakovacou frekvenciou 1 až 10 kHz a s výstupným výkonom ~ 10<sup>6</sup> až 10<sup>8</sup> W



**Obr. 1.58 Prijímače optických komunikačných systémov.**



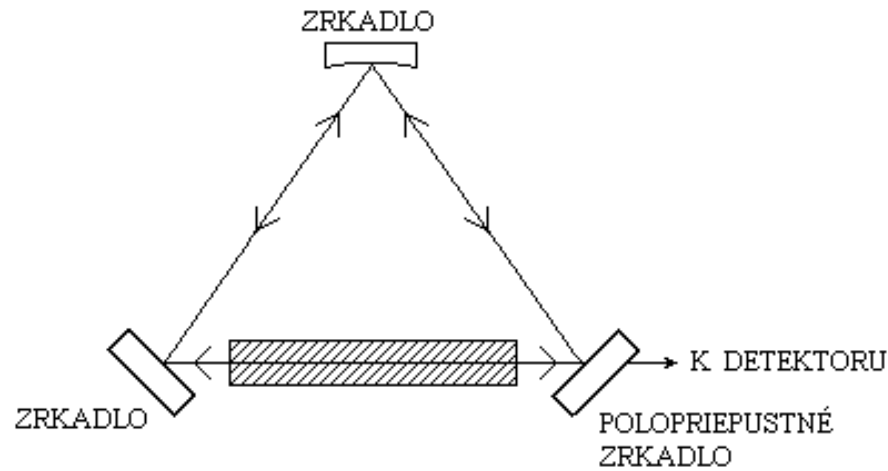
**Obr. 1.59 Konštrukcia optických antén.**

- **Optické komunikácie**
- **Mimo zemskej atmosféry**
  - **Spoje superd'alekého dosahu**
- **Pozemské podmienky – viditeľnosť, FSO, WO, VLC**
  - **Absorpcia a rozptyľovania svetla v atmosfére vplyvom poveternostných podmienok (hmly, snehu, dažďa)**
  - **Znečistenie atmosféry (dymu, prachu, rôznych plynov)**
  - **Vzdušné víry (turbulencie)**
  - **Vlnenie teplého vzduchu**
- **Žiarenie silne tlmené**

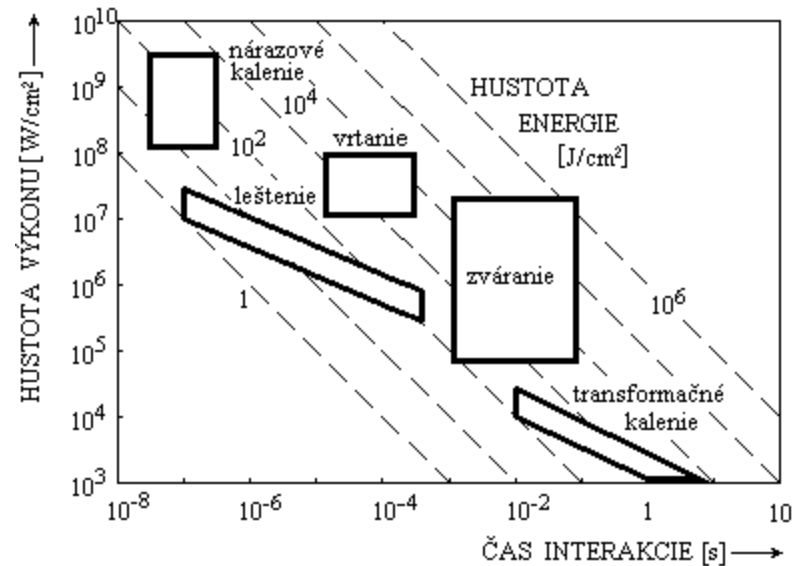
$$\alpha_{\lambda} = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 \quad (1.8.1)$$

kde  $\alpha_1$  je molekulárna absorpcia,  $\alpha_2$  rozptyl na časticiach a  $\alpha_3$  rozptyl v dôsledku turbulencie atmosféry

- **Použitie optických vlnovodov – Svetlovodov**
- **Optické vlákna**
- **Lokácia a navigácia**
- **Optický lokátor**
- **Lidar - Light Detection and Ranging**
- **Laserový gyroskop**

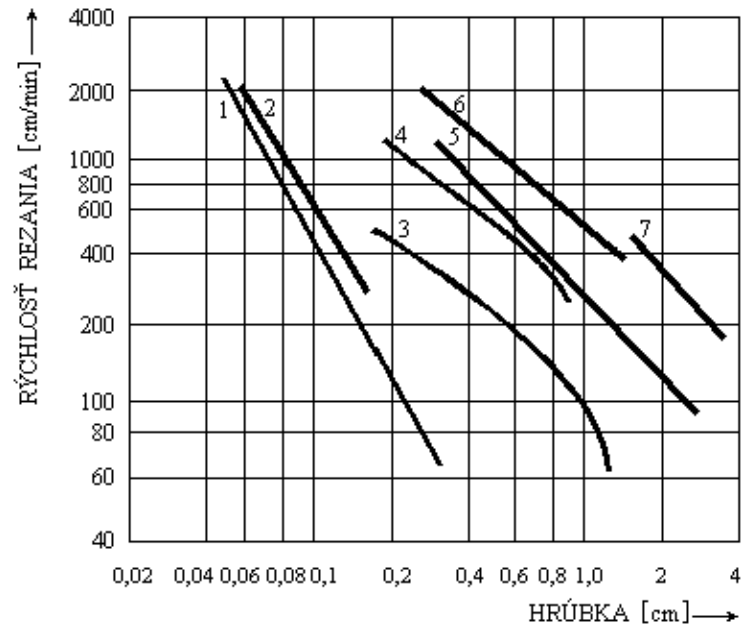


Obr. 1.60 Schéma gyroskopu s kruhovým laserom.

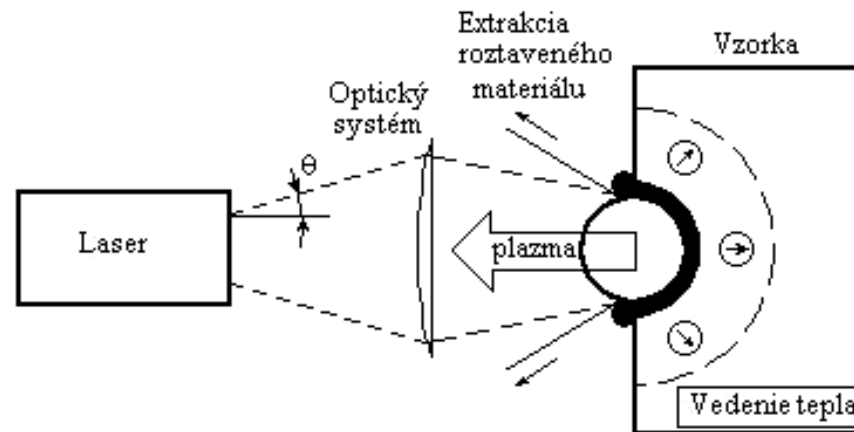


Obr. 1.61 Oblasti použitia laserového lúča na opracovanie materiálov.

- **Technológia a kontrolné meranie**
  - **Rezať, vŕtať, leštiť zvärať, kalit', označovať, opracovávať aj tie najtvrdšie materiály**
  - **1200 W CO<sub>2</sub> laser pracuje s vidom TEM<sub>00</sub>**
- **Výhody lasera v priemyselných aplikáciách pri porovnaní s klasickými technológiami**
  - **Adaptabilné**
  - **„Bezkontaktný“ nástroj**
  - **Prevádzka je tichá**
  - **Laserový zväzok je možné deliť**
  - **Veľká presnosť**
  - **Tepelne ovplyvnená oblasť je malá**
  - **Technologický proces možno automatizovať**
  - **Prípravné práce a nastavovanie sú časovo málo náročné**



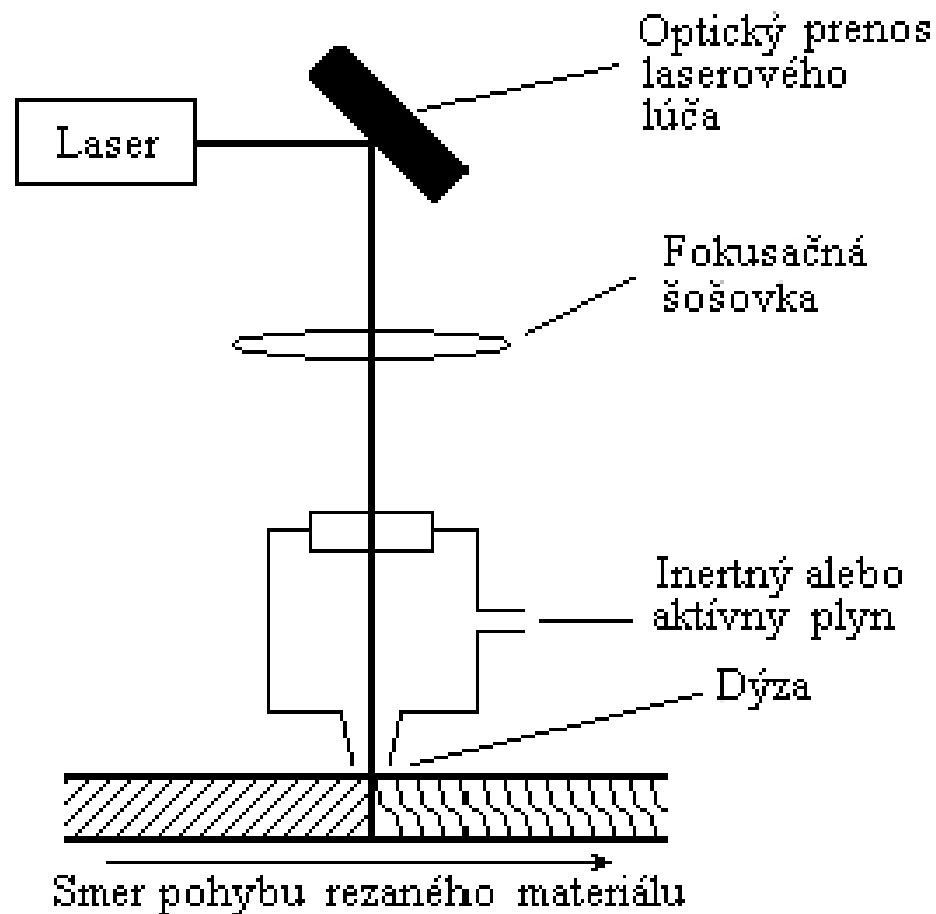
**Obr. 1.62 Rýchlosť rezania rôznych materiálov laserom.**



**Obr. 1.63 Schéma interakcie laserový lúč – materiál.**

- **Nevýhody**
  - Pomerne vysoká zavádzacia cena
  - Potreba dovozu náhradných dielov, predovšetkým optického systému
  - Požiadavka vysoko kvalifikovanej údržby
  - Prísne bezpečnostné opatrenia
- **Hlavné prednosti lasera pri rezaní**
  - Veľké rezné rýchlosti
  - Rezané hrany majú veľmi dobrú akosť povrchu a obyčajne nevyžadujú ďalšie úpravy
  - Tvarové rezy vyžadujú len veľmi malé zaoblenie
  - Okrajová oblasť ocele tepelne ovplyvnená laserom je veľmi úzka
- **Povrchová úprava materiálu**
  - Transformačné spevnenie
  - Tepelné spracovanie povrchu s natavením
  - Dolegovanie v rôznych formách
- **Tri základné metódy obrábania využitím lasera**
  - Sústruženie s predhrevom pomocou lasera  
**(LAM – Laser - Assisted Machining)**
  - Sústruženie laserom  
**(LM – Laser Machining)**
  - Sústruženie laserom s lokálnym nastavením  
**(LMLM – Laser Machining by Localised Melting)**





**Obr. 1.64 Schéma zariadenia na delenie materiálu laserom.**

Tabuľka 1.11 : Rýchlosť rezania laserom

<b>Materiál</b>	<b>Hrúbka [mm]</b>	<b>Rýchlosť rezania [m/min]</b>
<b>Mäkké drevo</b>	<b>25</b>	<b>2,0</b>
<b>Tvrdé drevo</b>	<b>25</b>	<b>1</b>
<b>Koža (6 vrstiev)</b>	<b>12</b>	<b>1,1</b>
<b>Pertinax</b>	<b>9</b>	<b>12</b>
<b>Prírodná pryž</b>	<b>25</b>	<b>0,7</b>
<b>Mäkká oceľ</b>	<b>0,9</b>	<b>8</b>
<b>Mäkká oceľ</b>	<b>4,2</b>	<b>4,5</b>
<b>Korozivzdorná oceľ 18/8</b>	<b>2</b>	<b>4</b>
<b>Korozivzdorná oceľ 18/8</b>	<b>6,3</b>	<b>2,1a</b>
<b>Nástrojová oceľ</b>	<b>2</b>	<b>7,8</b>
<b>Nástrojová oceľ</b>	<b>6,5</b>	<b>2,0</b>
<b>Hliník</b>	<b>1,6</b>	<b>2,4</b>
<b>Hliník</b>	<b>4</b>	<b>0,5</b>
<b>Dural</b>	<b>3,5</b>	<b>0,6</b>
<b>Oceľ Cr – Mo</b>	<b>0,25</b>	<b>30</b>
<b>Titan</b>	<b>3,5</b>	<b>0,4</b>
<b>Pozn.: Uvedené údaje zodpovedajú maximálnej akosti rezu skôr než maximálnej rýchlosti rezu.</b>		

- **Meracie a kontrolné aplikácie** – meranie vzdialeností, posunutí, deformácií
- **Medicína a biológia**
  - **Veľmi presný a účinný chirurgický nástroj**
  - **Liečivé účinky rozostreného alebo rastrovaného laserového žiarenia s malou intenzitou**
  - **Ihly v akupunktúre**
  - **Génová manipulácia**
- **Chémia** - účinnosť fotochemickej reakcie
- **Holografia**
  - **1947 maďarský fyzik D. Gábor**
  - **Nobelova cena 1974**
  - **Sledovanie rýchle sa pohybujúcich predmetov**
  - **Rozpoznávanie obrazcov**
  - **Záznam a modelovanie mikrovlnových a deformačných polí**
  - **Výroba holografických optických prvkov**
  - **Záznam číslicovej aj analógovej (obrazovej) informácie**  
**- Holografická pamäť**

- **Veda a technika**

- **Diagnostika plazmy**
- **Laserová spektroskópia**
- **Ohrev plazmy**
- **Separácia iónov**
- **Laserové optické pamäti**
- **Nelineárna optika**
- **Tvorba etalónov**
- **Výskum fyzikálnych vlastností materiálov**
- **Systemy pre spracovanie signálov**