



OPTOELEKTRONIKA

ZDROJE SVETLA

Dr.h.c. Prof.RNDr.Ing. Ján TURÁN, DrSc.

Department of Electronics and Multimedia Communications
Faculty of Electrical Engineering and Informatics
University of Technology Košice, Letná 9, 042 00 Košice,
Slovakia

Tel. ++ 421 55 602 29 43, E-mail: jan.turan@tuke.sk

5 ZDROJE SVETLA

5.1 KLASIFIKÁCIA A PARAMETRE ZDROJOV SVETLA

Zdroj svetla (žiarenia):

- **Širokopásmový**
(žiarovky, výbojky)
- **Monochromatický nekoherentný (LED)**
- **Monochromatický koherentný**
(plynový, polovodičový (LD), tuholátkový, farbivý či chemický laser)

Štyri množiny vlastností:

1. **Geometrické** vlastnosti emitovaného svetla
 - Jas (alebo žiara) zdroja svetla
2. **Spektrálne** vlastnosti
 - spektrálna šírka emitovaného svetla, šum
 - Koherencia
3. **Elektro-optické** prenosové charakteristiky
4. **Vplyv okolitého prostredia**
 - Teplota, tlak, žiarenie

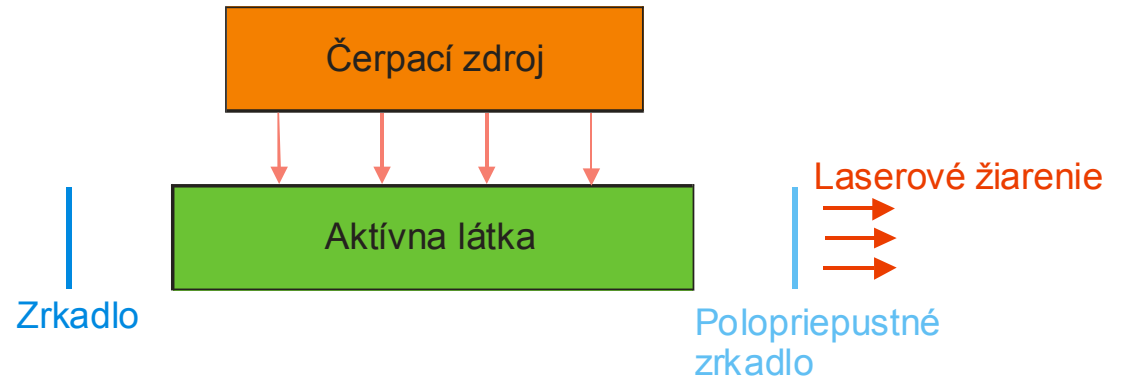
Požiadavky na zdroje (OVKS):

- Účinnosť konverzie (~ 10%)
- Malé rozmery a hmotnosť
- Jednoduchá modulovateľnosť
- Vysoká monochromatickosť
- Generácia svetla (~ 0,85 μm , ~ 1,3 μm a ~ 1,5 μm)
- Čo najužšia smerová charakteristika
- Jednoduché naviazanie
- Teplotná stabilita
- Vysoká spoľahlivosť (čas života 10^5 až 10^6 hod.)
- Nízka cena
- Najlepšie vyhovujú: polovodičové lasery (LD), svetloemitujúce diódy (LED) a tuholátkové lasery **Nd: YAG**, resp. **Nd: sklo**.

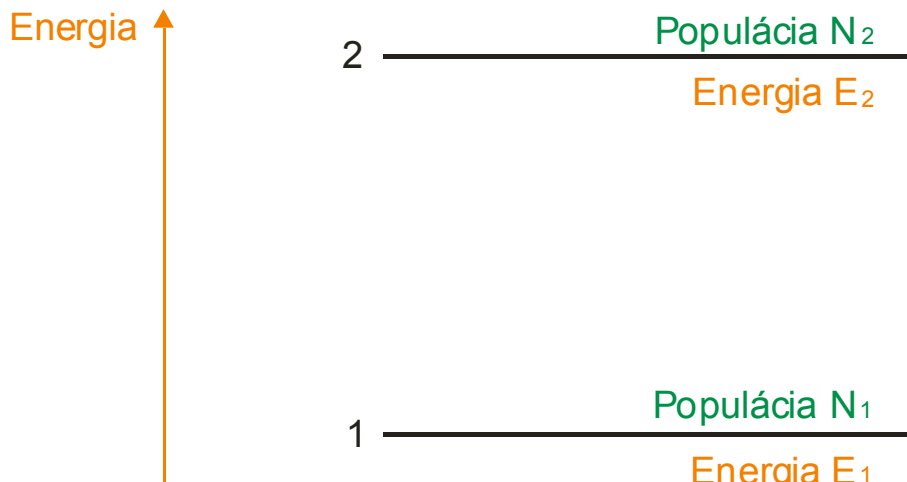
5 ZDROJE SVETLA

5.2 GENERÁCIA ŽIARENIA V LASEROCH

- **LASER** – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
- **Tuholátkové**
- **Polovodičové**
- **Plynové**
- **Kvapalinové,**



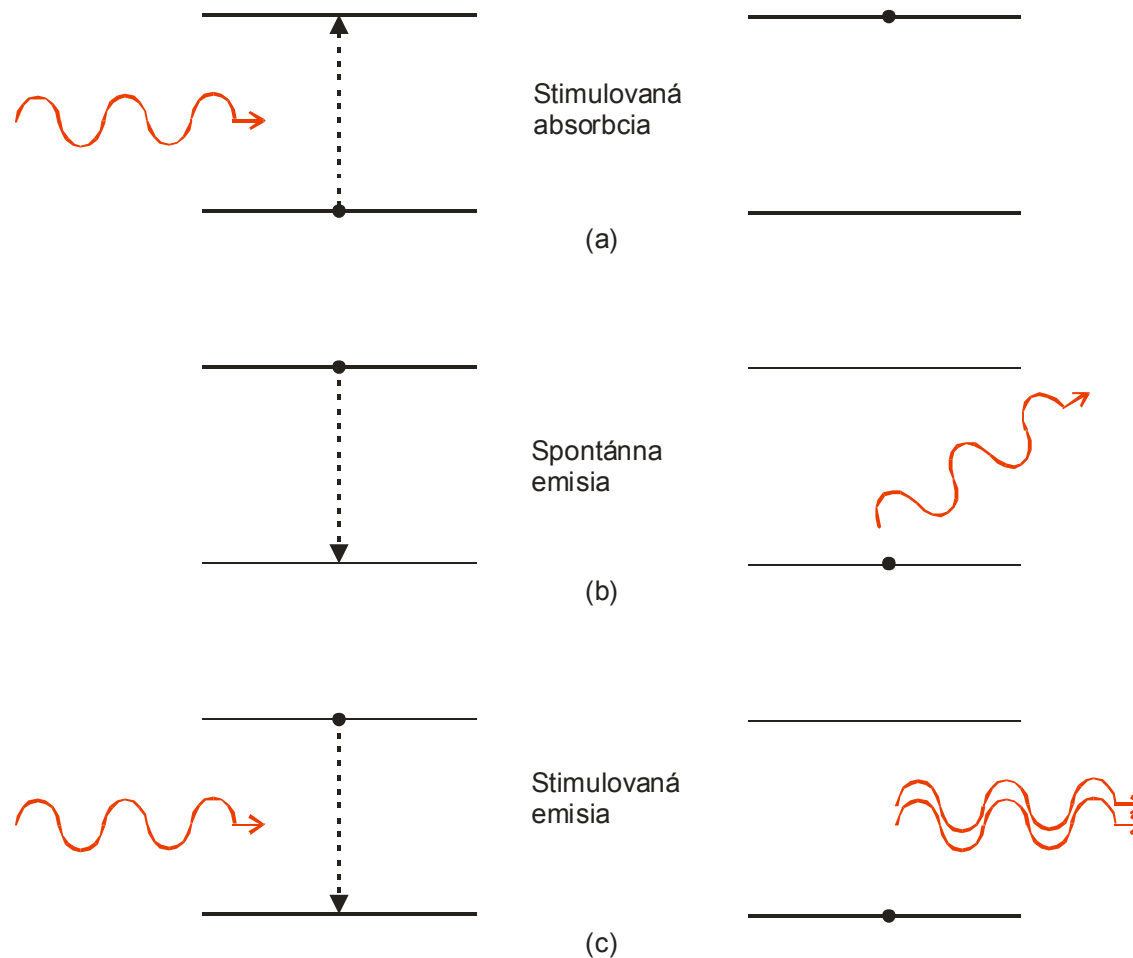
Obr. 5.1 Schéma lasera.



Obr. 5.2 Dvojhladinový systém.

5 ZDROJE SVETLA

5.2 GENERÁCIA ŽIARENIA V LASEROCH



Obr. 5.3 Interakcia žiarenia a látky: (a) absorpcia, (b) spontánna emisia, (c) stimulovaná emisia.

5 ZDROJE SVETLA

5.2 GENERÁCIA ŽIARENIA V LASEROCH

- Dvojhladinový modelový kvantový systém vyhovuje **Bohrovmu vzťahu**

$$h\nu = \hbar\omega = E_2 - E_1$$

- **Absorbcia:** $B_{12} N_1 \rho(\nu)$.
- **Spontánna emisia:** $A_{21}; N_2$.
- **Stimulovaná (indukovaná) emisia:** $B_{21} N_2 \rho(\nu)$.
- Konštanty úmernosti B_{12} , B_{21} a A_{21} – **Einsteinove koeficienty**
- Sústava častica – dutina v **termodynamickej rovnováhe**

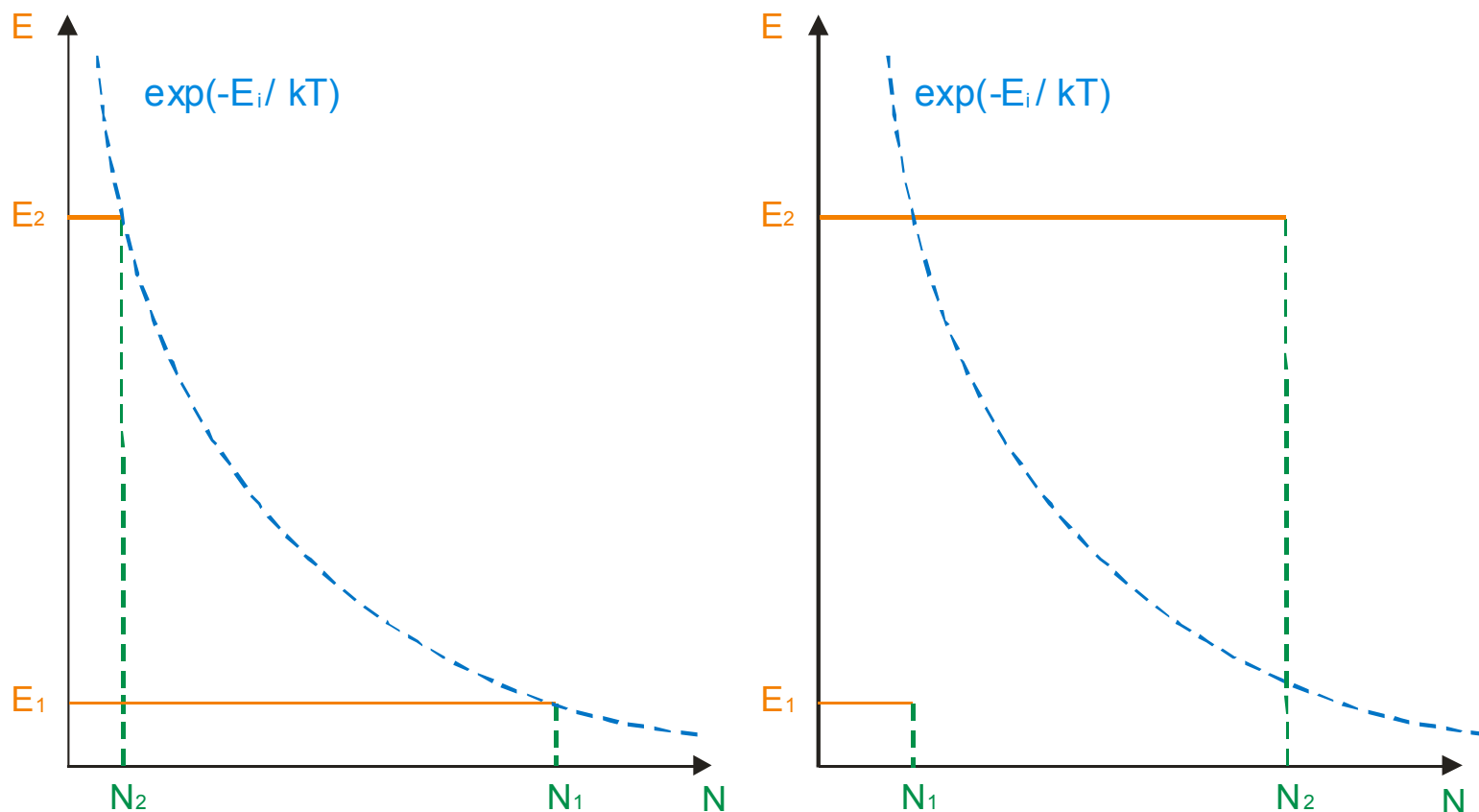
$$B_{12} N_1 \rho(\nu) = A_{21} N_2 + B_{21} N_2 \rho(\nu)$$

- **Maxwell – Boltzmanove rozdelenie**

$$N_j = \frac{g_j N_0 \exp(-E_j / kT)}{\sum_i g_i \exp(-E_i / kT)}$$

5 ZDROJE SVETLA

5.2 GENERÁCIA ŽIARENIA V LASEROCH



Obr. 5.4 Populácia dvojhladinového systému: (a) tepelná rovnováha, (b) inverzia populácie hladín.

5 ZDROJE SVETLA

5.2 GENERÁCIA ŽIARENIA V LASEROCH

- **Pre dvojhladinový systém**

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{g_1}{g_2} \exp\left(\frac{E_2 - E_1}{kT}\right) = \frac{g_1}{g_2} \exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right)$$

$$\rho(\nu) = \frac{A_{21}/B_{21}}{\left[\frac{g_1}{g_2} \frac{B_{12}}{B_{21}} \exp(h\nu/kT) \right] - 1}$$

- **Planckov zákon**

$$\rho(\nu) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1}$$

5 ZDROJE SVETLA

5.2 GENERÁCIA ŽIARENIA V LASEROCH

- Porovnaním dostaneme tzv. **Einsteinove vzt'ahy**

$$B_{12} = \frac{g_2}{g_1} B_{21} \quad \frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi h\nu}{c^3}$$

- Pomer rýchlosti spontánnej emisie ku rýchlosti stimulovanej emisie

$$R = \frac{A_{21}}{\rho(\nu)B_{21}} = \exp(h\nu/kT) - 1$$

- **Absorbcia žiarenia** v látke $I = I_0 \exp(-\alpha x)$

- **Koeficient absorbcie** $\alpha = \left(\frac{g_2}{g_1} N_1 - N_2 \right) \frac{B_{21} h \nu_{21} n}{c}$

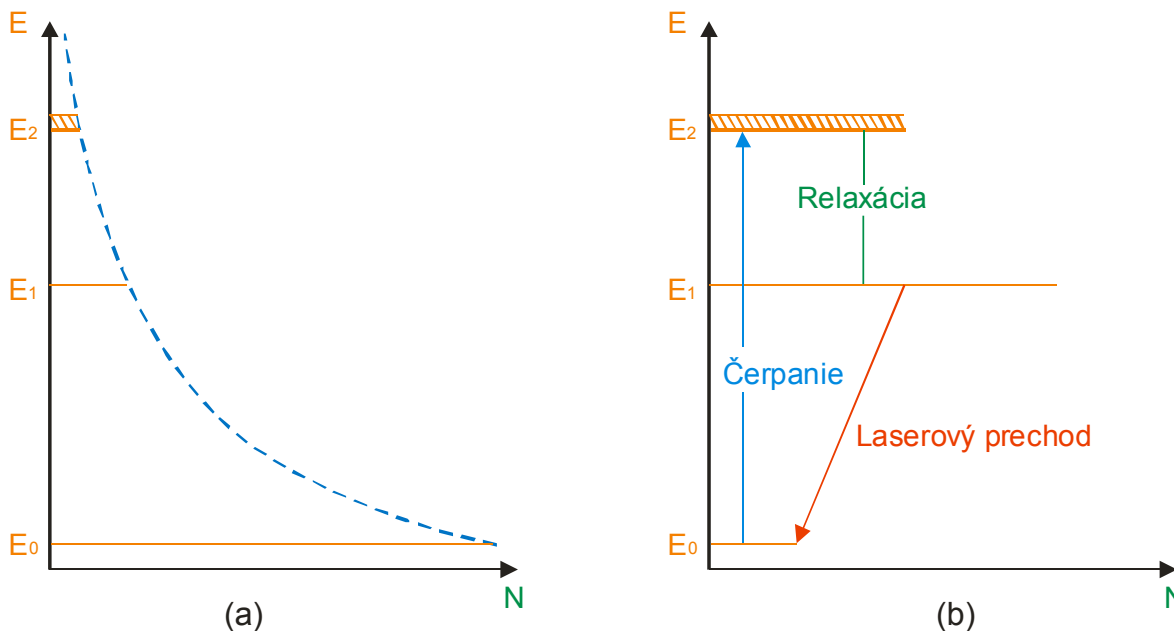
5 ZDROJE SVETLA

5.2 GENERÁCIA ŽIARENIA V LASEROCH

- **Zosilnenie žiarenia** v látke

$$I = I_0 \exp(\gamma x) \quad \gamma = \left(N_2 - \frac{g_2}{g_1} N_1 \right) B_{21} \frac{h\nu_{21} n}{c}$$

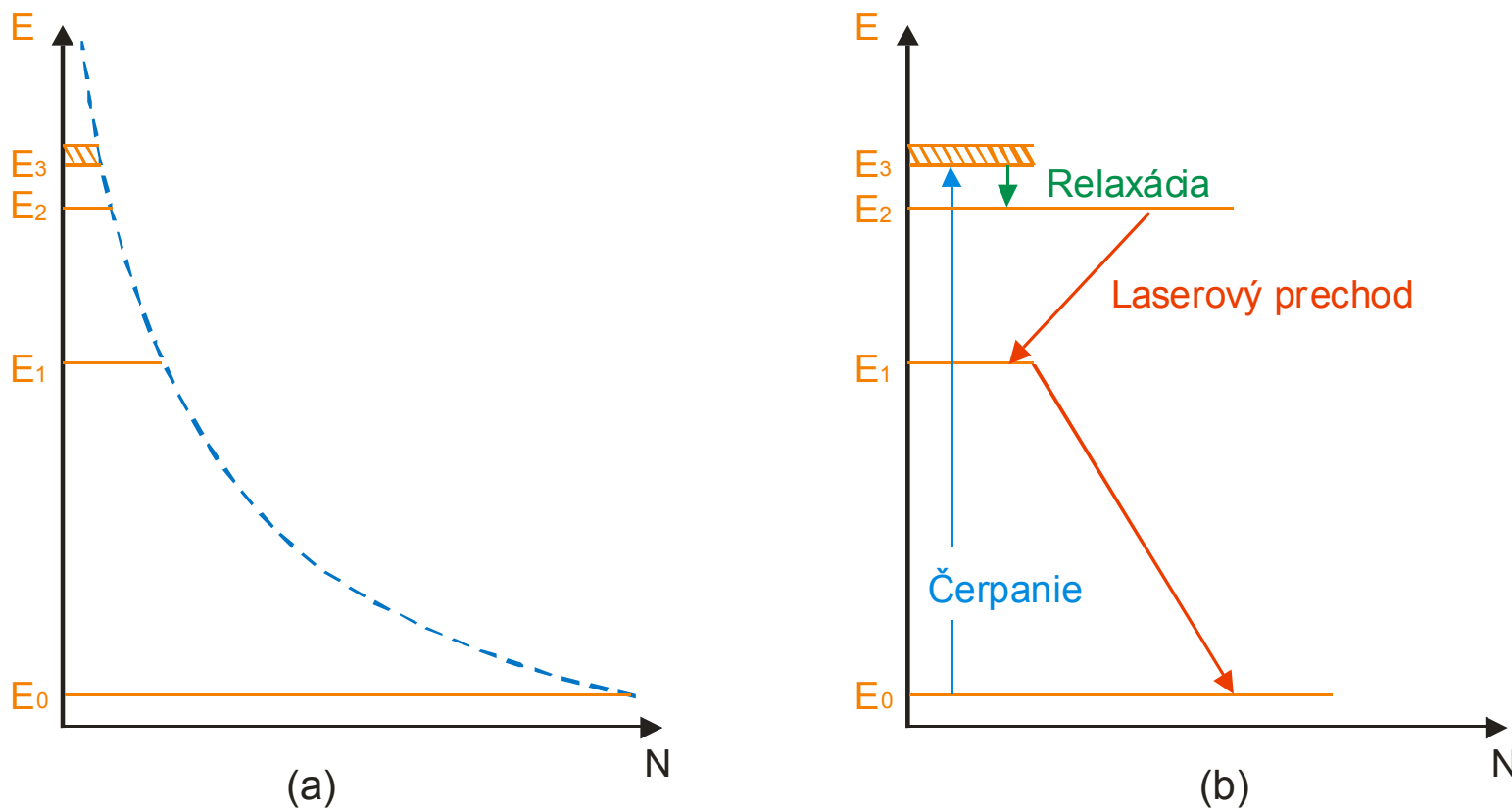
- Inverzia populácie hladín – **troj alebo štvorhladinový systém**



Obr 5.5
Populácia energetických
hladín v trojhladinovom
systéme:
(a) Boltzmannova
distribúcia bez čerpania (b)
distribúcia po čerpaní.

5 ZDROJE SVETLA

5.2 GENERÁCIA ŽIARENIA V LASEROCH



Obr 5.6 Populácia energetických hladín v štvorhladinovom systéme: (a) Boltzmannova distribúcia bez čerpania, (b) distribúcia po čerpaní.

5 ZDROJE SVETLA

5.2 GENERÁCIA ŽIARENIA V LASEROCH

Fabryho – Perotov rezonátor - celkové straty v laserovom systéme:

- Prechod cez zrkadlá
- Absorbcia a rozptyl na zrkadlách
- Absorbcia v aktívnej látke
- Rozptyl na optických nehomogenitách
- Difrakčné straty na zrkadlách

- **Intenzita lúča** $I = I_0 \exp(\gamma - \alpha)L$

- **Celkový zisk** $G = R_1 R_2 \exp\{2(\gamma - \alpha)L\}$

- **Prahový zisk lasera** ($G = 1$)

$$\gamma_{th} = \alpha + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2}$$

5 ZDROJE SVETLA

5.2 GENERÁCIA ŽIARENIA V LASEROCH

Účinnosť laserov:

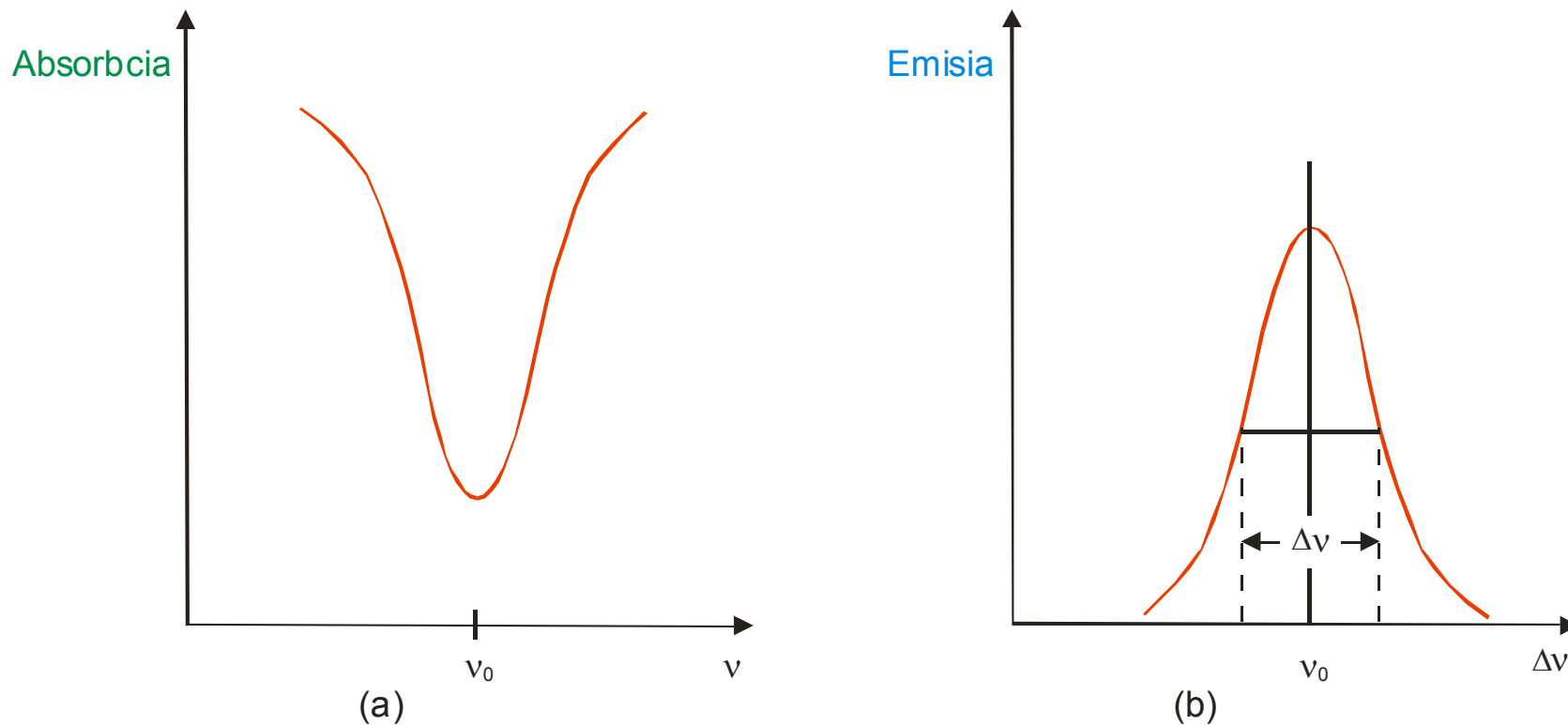
- **He – Ne** a **Ar⁺** (~0,01 až 0,1%)
- Molekulový **CO₂** laser (~ 10 až 30 %)
- Tuholátkové lasery okolo 1% (rubínový ~ 0,75%, **Nd: sklo** ~ 1,02%, **Nd: YAG** ~ 3%)
- **Najväčšia účinnosť** – na kryogénne teploty ochladené injekčné polovodičové lasery ~ 50% (pri izbovej teplote ~ 5%)

Šírka spektrálnej čiary:

- Nenulová spektrálnu šírka – **Gaussovský** alebo **Lorentzovský tvar**
- Prirodzená šírka spektrálnej čiary – určená **Heisenbergovým princípom neurčitosti**
- Homogénne rozšírenie spektrálnej čiary – **Lorentzovský tvar**
- Nehomogénne rozšírenie spektrálnej čiary (napr. vplyvom **Dopplerovho javu** v plynoch) – **Gaussovský tvar**

5 ZDROJE SVETLA

5.2 GENERÁCIA ŽIARENIA V LASEROCH



Obr. 5.7 Prenosové krivky pre: (a) absorbciu a (b) emisiu v mikrosystéme.

- 5 ZDROJE SVETLA

- 5.2 GENERÁCIA ŽIARENIA V LASEROCH

- **Koeficient zisku**
$$\gamma(\nu) = \left(N_2 - \frac{g_2}{g_1} N_1 \right) \frac{B_{21} h \nu n g(\nu)}{c}$$

- **Lorentzovská krivka**

$$\text{Ak } \nu = \nu_0$$

$$g_L(\nu) = \frac{\Delta\nu}{2\pi} \left[(\nu - \nu_0)^2 + \left(\frac{\Delta\nu}{2} \right)^2 \right]^{-1} \quad g_L(\nu_0) = \frac{2}{\pi \Delta\nu}$$

- **Gaussova krivka**

$$\text{Ak } \nu = \nu_0$$

$$g_G(\nu) = \frac{2}{\Delta\nu} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \exp \left[-(\ln 2) \left(\frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu/2} \right)^2 \right] \quad g_G(\nu_0) \cong \frac{1}{\Delta\nu}$$

5 ZDROJE SVETLA

5.2 GENERÁCIA ŽIARENIA V LASEROCH

- **Zmena intenzity žiarenia** v aktívnej látke

$$I(\nu, x) = I(\nu, 0) \exp \{ \gamma(\nu) x \}$$

- **Prah lasera**

$$\gamma(\nu) \equiv \gamma_{th} = \alpha + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2}$$

Použitím $A_{21} = 1 / \tau_{21}$ dostaneme

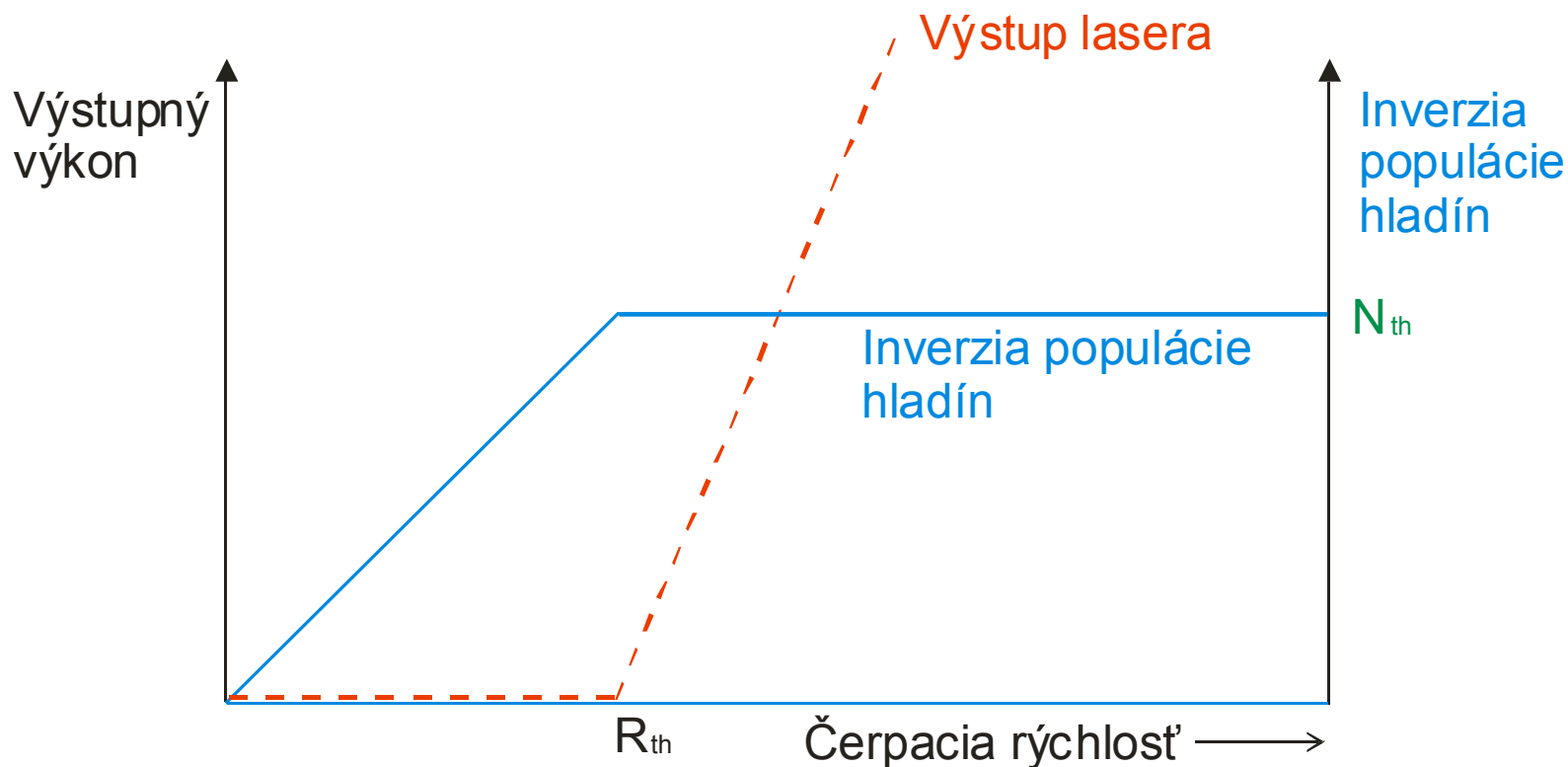
$$N_{th} = \left(N_2 - \frac{g_2}{g_1} N_1 \right)_{th} = \frac{8 \pi \nu^2 \gamma_{th} \tau_{21} n^2}{c^2 g(\nu)}$$

- **Gaussova krivka**

$$N_{th} = \frac{8 \pi \nu_0^2 \gamma_{th} \tau_{21} \Delta \nu n^2}{c^2}$$

5 ZDROJE SVETLA

5.2 GENERÁCIA ŽIARENIA V LASEROCH



Obr. 5.8

Závislosť inverzie populácie hladín a výstupného výkonu lasera od čerpacej rýchlosti.

5 ZDROJE SVETLA

5.2 GENERÁCIA ŽIARENIA V LASEROCH

- **Rýchlostné rovnice**

$$\frac{dN_2}{dt} = \mathfrak{R}_2 - N_2 A_{21} - \rho(\nu) B_{21} (N_2 - N_1)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = \mathfrak{R}_1 + N_2 A_{21} + \rho(\nu) B_{21} (N_2 - N_1) - N_1 A_{10}$$

- **Stacionárny stav**

laserového systému

$$N_2 - N_1 = \mathfrak{R}_2 \left(\frac{1 - A_{21}/A_{10}}{A_{21} + \rho(\nu) B_{21}} \right)$$

- **Aktívne látky** – aby platilo

$$\tau_{21} \gg \tau_{10} \Rightarrow \left(1 - A_{21}/A_{10} \right) \approx 1$$

Metastabilná hladina

5 ZDROJE SVETLA

5.2 GENERÁCIA ŽIARENIA V LASEROCH

- Pod prahom lasera a pre **prahový výkon** čerpania \mathfrak{R}_{th} možno písať

$$N_{th} = (N_2 - N_1)_{th} = \mathfrak{R}_{th} \left(\frac{1 - A_{21}/A_{10}}{A_{21}} \right)$$

V jednoduchšom tvare

$$\mathfrak{R}_{th} = N_{th} A_{21} = \frac{N_{th}}{\tau_{21}}$$

- Celkový čerpací výkon**

$$P_{th} = \frac{E_3 N_{th}}{\tau_{21}}$$

Dosadením

$$P_{th} = \frac{E_3 8 \pi \nu_0^2 \gamma_{th} \tau_{21} \Delta \nu n^2}{\tau_{21} c^2} = \frac{E_3 8 \pi \nu_0^2 \gamma_{th} \Delta \nu n^2}{c^2}$$

5 ZDROJE SVETLA

5.2 GENERÁCIA ŽIARENIA V LASEROCH

- **Výstupný výkon lasera**
$$W = W_0 \left(\frac{P}{P_{th}} - 1 \right)$$

- **Rezonančná podmienka** pre Fabryho – Perotov rezonátor

$$q \frac{\lambda}{2n} = L$$

q – vidové číslo

- **Rad diskretných frekvencií**
$$\nu = \frac{qc}{2nL}$$

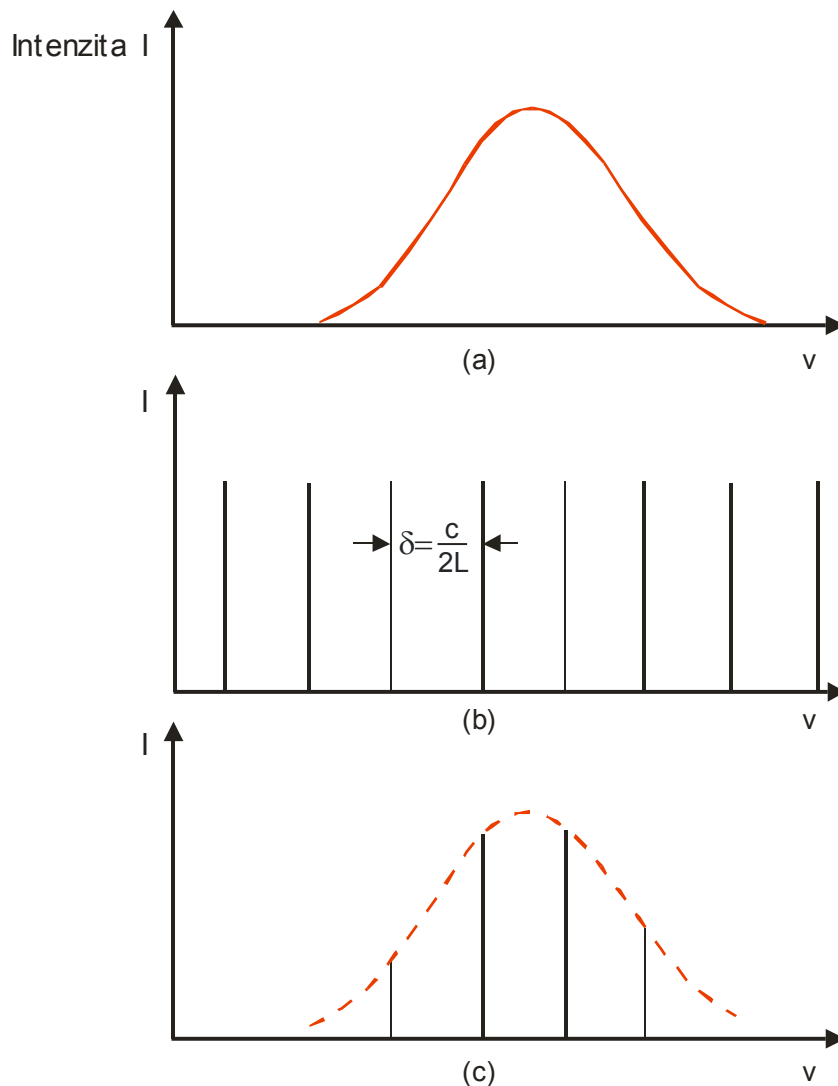
- **Pozdĺžne vidy**
$$\delta \nu = \frac{c}{2nL}$$

- **Priečne (transverzálne) vidy – TEM_{ln}**

$$w(z) = w_0 \left[1 + \left(\frac{2z}{r} \right)^2 \right]^{1/2}$$

5 ZDROJE SVETLA

5.2 GENERÁCIA ŽIARENIA V LASEROCH



Obr. 5.9
Spektrálna šírka aktívnej látky
(a),
pozdĺžne vidy rezonátora (b),
generácia lasera (c).