



evropský  
sociální  
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

# Laserové technologie v praxi I.

## Přednáška č.1

### Fyzikální princip činnosti laserů

Hana Chmelíčková, SLO UP a FZÚ AVČR

Olomouc, 2011

## Fyzikální princip činnosti laserů

LASER – kvantový generátor světla

LASER – zkratka z anglického vyjádření principu

Light

Amplification

(by) Stimulated Emission

(of) Radiation

Zesílení (3)

světla (1b) pomocí

stimulované emise (2)

záření (1a)

---

1916 – A.Einstein předpověděl jev stimulované emise

1954 – C.H.Townes sestrojil první MASER

1960 – T. Maiman (USA) sestrojil rubínový laser

1962 – první polovodičový

1963 – RNDr. Karel Pátek, Fyzikální ústav ČSAV, Neodym:sklo

1964 – C.Kumar N.Patel – první plynový CO<sub>2</sub> laser

1965 – chemický laser (reakce H + Cl)

Více viz doporučená literatura (4), kapitola 2, strana 12 - 20

# 1. Vlnová povaha světla

viz.Literatura (1)

Světlo jako elektromagnetické záření (1a) – šíření periodickým střídáním vzájemně kolmé elektrické a magnetické složky

**Rovnice lineárně polarizované elektromagnetické vlny:**

$$E = i_y \cdot E_0 \cdot \cos(\omega t - k \cdot z + \Phi)$$

$$B = i_x \cdot B_0 \cdot \cos(\omega t - k \cdot z + \Phi)$$

$E_0, B_0$  – amplituda elektrického, resp. magnetického pole ( $B_0 = E_0/c$ )

$\omega = 2\pi/T$  - kruhová frekvence,  $k = \omega/c$  – vlnové číslo,  $\Phi$  – fázová konstanta

Frekvence vlnění

$$f = 1/T = \omega/2\pi \quad (\text{světlo } 10^{15} \text{ Hz})$$

Rychlost šíření světla ve vakuu

$$c = 300\,000\,000 \text{ m/s}$$

**Veličina**

$$c \cdot T = c/f = 2\pi/\omega$$

se nazývá

**Vlnová délka záření  $\lambda$**

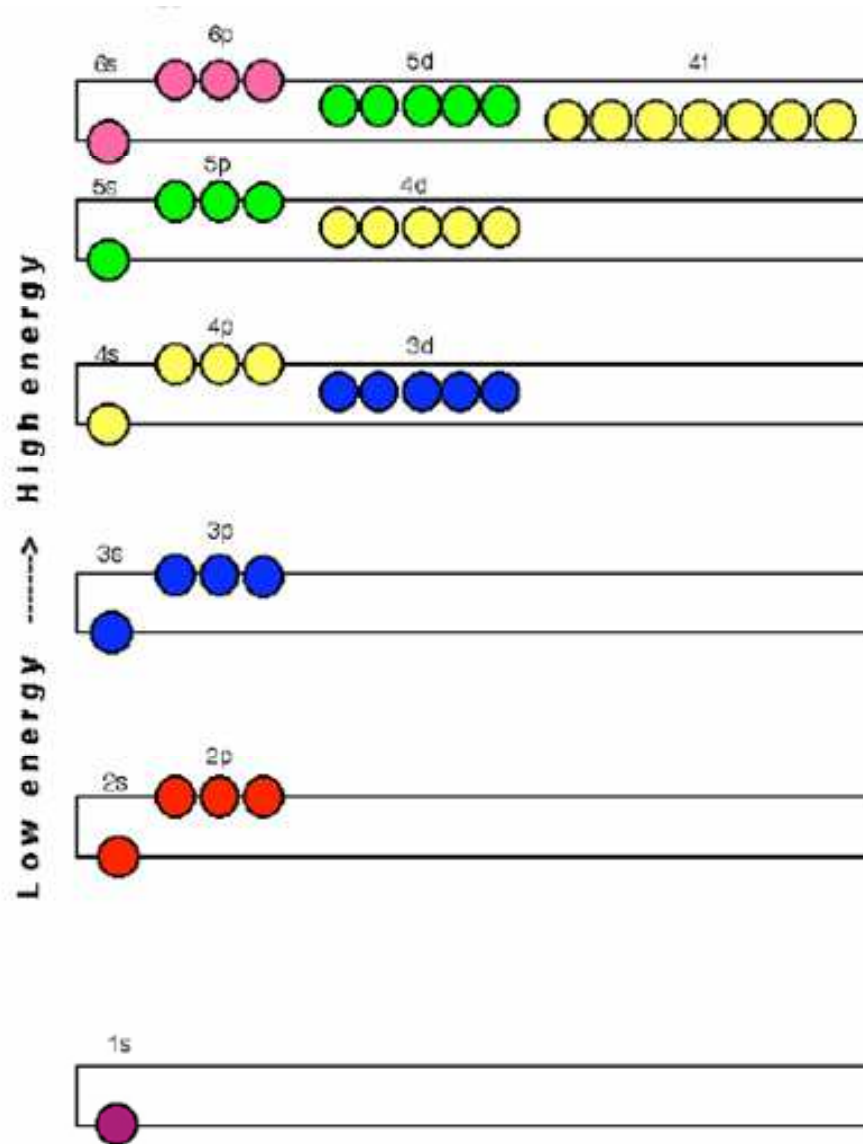
# 1. Vlnová povaha světla

Druhy elektromagnetického záření podle frekvence a vlnové délky:

gama	nad $10^{20}$ Hz	pod $10^{-12}$ m
roentgenové	$10^{18}$ až $10^{20}$ Hz	$10^{-10}$ až $10^{-12}$ m
ultrafialové	$10^{15}$ až $10^{18}$ Hz	$10^{-7}$ až $10^{-10}$ m
viditelné světlo	$10^{14}$ až $10^{15}$ Hz	$10^{-6}$ až $10^{-7}$ m
infračervené	$10^{12}$ až $10^{14}$ Hz	$10^{-4}$ až $10^{-6}$ m
mikrovlny	$10^9$ až $10^{12}$ Hz	$10^{-1}$ až $10^{-4}$ m
televizní vlny	$10^8$ Hz	1 m
radiové vlny	$10^3$ až $10^7$ Hz	$10^5$ až 10 m

Lasery září v oblasti od 100 nm ( $10^{-7}$  m) do 10  $\mu$ m ( $10^{-5}$  m)(1b)

## 2. Stimulovaná emise



Energetické hladiny elektronů

(viz např. Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro SŠ)

Vodík H ..... $1s^1$

Uhlík C..... $1s^2 2s^2 2p^2$

## 2. Stimulovaná emise

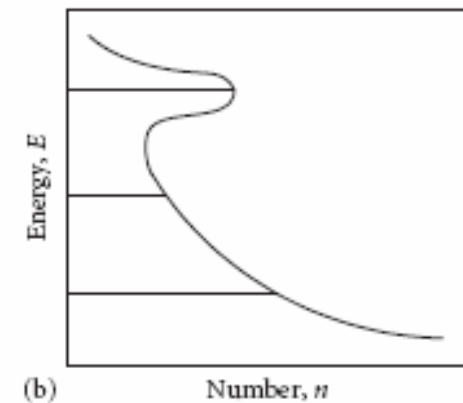
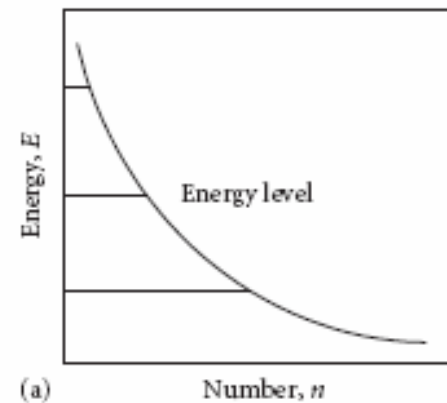
$N_i$  ... počet částic na  $i$ -té hladině ,  $N = \sum N_i$  ...počet částic v soustavě

$E_i$  ...energie  $i$ -té hladiny,

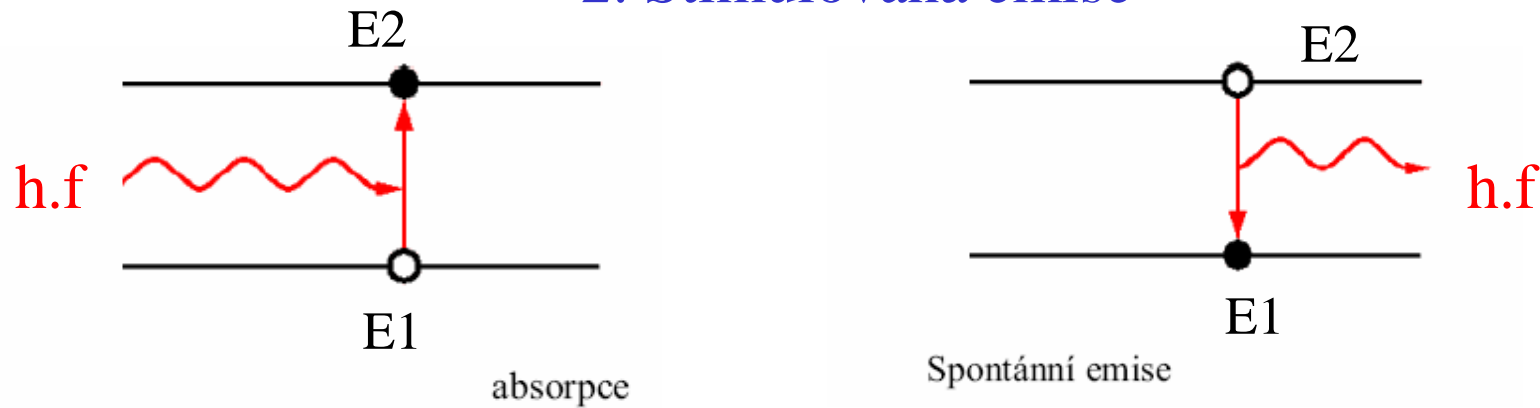
$E = \sum N_i \cdot E_i = 3/2 k T$  ( $k = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ ) ..... energie soustavy

Maxwell – Boltzmannova rovnice pro normální populaci energetických hladin

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{\frac{-(E_2 - E_1)}{k \cdot T}}$$



## 2. Stimulovaná emise



Absorpce (pohlčení) elmg. záření: elementární kvantum energie - foton

$$\Delta E = h \cdot f = hc/\lambda \quad E_1 + hf = E_2$$

Počet absorpcí:  $B_{12}N_1I/c$ ,  $B_{12}$  – Einsteinův koeficient absorpce,  
 $I$  – intenzita elmag. záření ( $W \cdot m^{-2}$ )

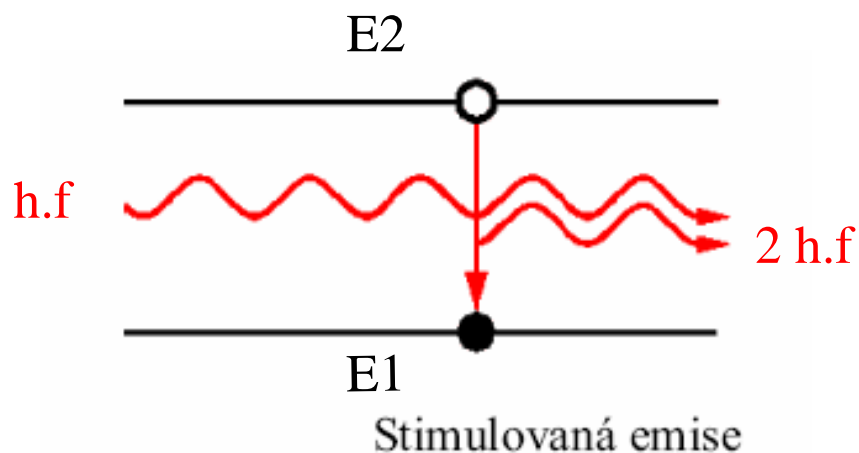
Spontánní emise: omezená doba života částice v excitovaném stavu (do  $1\mu s$ )

$$E_2 = hf + E_1$$

Počet spontánních emisí:  $A_{21} \cdot N_2$ ,  $A_{21}$  - Einsteinův koef. spont. emise,

Planckova konstanta :  $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$  frekvence elmg.vlny  $f = (E_2 - E_1) / h$

## 2. Stimulovaná emise



$$hf + E_2 = E_1 + 2hf$$

Počet stimulovaných emisí:

$$B_{21} \cdot N_2 \cdot I/c$$

$B_{21}$  – Einsteinův koeficient  
stimulované emise

Zjednodušení  $B_{12} = B_{21}$ , a v termodynamické rovnováze  $N_2 \ll N_1$ , počet stimulovaných emisí je mnohem menší než počet absorpcí (soustava zvyšuje svou teplotu) a dochází k utlumení záření

Pro zesílení záření nutno zajistit trvale nerovnost  $N_2 > N_1$  – **inverzní populaci energetických hladin** – buzení, čerpání vnějším zdrojem energie



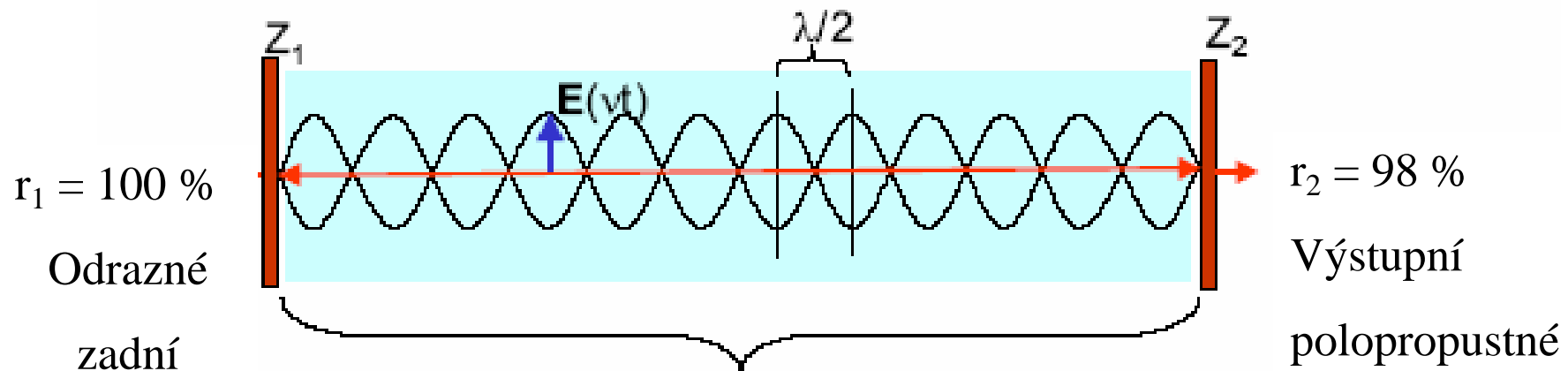
### 3. Zesílení záření

Záření je v soustavě zesíleno dle vztahu:

$$I = I_0 \cdot e^{(\alpha - \beta)L},$$

kde  $I_0$  je počáteční intenzita,  $\alpha$  koeficient zisku (závisí na  $\Delta N$ ) a  $\beta$  koeficient ztrát,  $L$  délka aktivního prostředí.

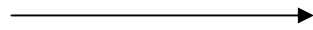
Toto zesílení je dosaženo pomocí optického rezonátoru o délce  $L$ , kde dochází k mnohonásobným odrazům na zrcadlech. Délka rezonátoru musí být rovna celému násobku půlvln.



$$L = m \cdot \lambda/2 = m \cdot c/2f$$

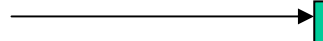
## Zisk a ztráta rezonátoru – podmínka generace záření

$$I_1 = I_0 e^{(\alpha - \beta) \cdot L}$$



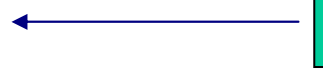
První průchod

$$I_2 = R_1 I_1$$



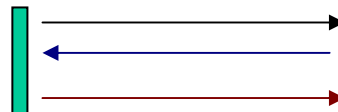
První odraz

$$I_3 = I_2 e^{(\alpha - \beta) \cdot L}$$



Druhý průchod

$$I_4 = R_2 I_3 = R_2 R_1 I_0 e^{2(\alpha - \beta) \cdot L}$$



Druhý odraz

$$R_2 R_1 e^{2(\alpha - \beta) \cdot L} \geq 1$$

$$\alpha_{\text{prah}} = \beta + \frac{1}{2L} \ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right) = \sigma \cdot (N_2 - N_1)$$

Podmínky zesílení:

Prahové zesílení  $\alpha$

$$u_e = h \cdot f \cdot \frac{N_2 - N_1}{2} = \frac{h \cdot f \cdot \alpha}{2\sigma}$$

$\sigma$  (m<sup>-1</sup>) – účinný průřez pro stimulovanou emisi

$u_e$  – extrahovatelná energie

z rezonátoru

## Vlastnosti laserového záření

**Monochromatické** – stimulované záření má stejnou frekvenci/vlnovou délku jako absorbované, eventuální šum utlumí rezonátor

**Časově a prostorově koherentní** – stimulované fotony mají stejný směr, fázi a polarizaci

Vysoká směrovost (**nízká rozbíhavost – divergence**)

$$\Theta = b \cdot \lambda / D_0 = 2 \cdot \arctg (D_z - D_0) / 2z$$

koeficient  $b = 1,1$ ,  $D_0$  výstupní apertura (určuje průměr výstupního svazku)

$D_z$  – průměr svazku ve vzdálenosti  $z$

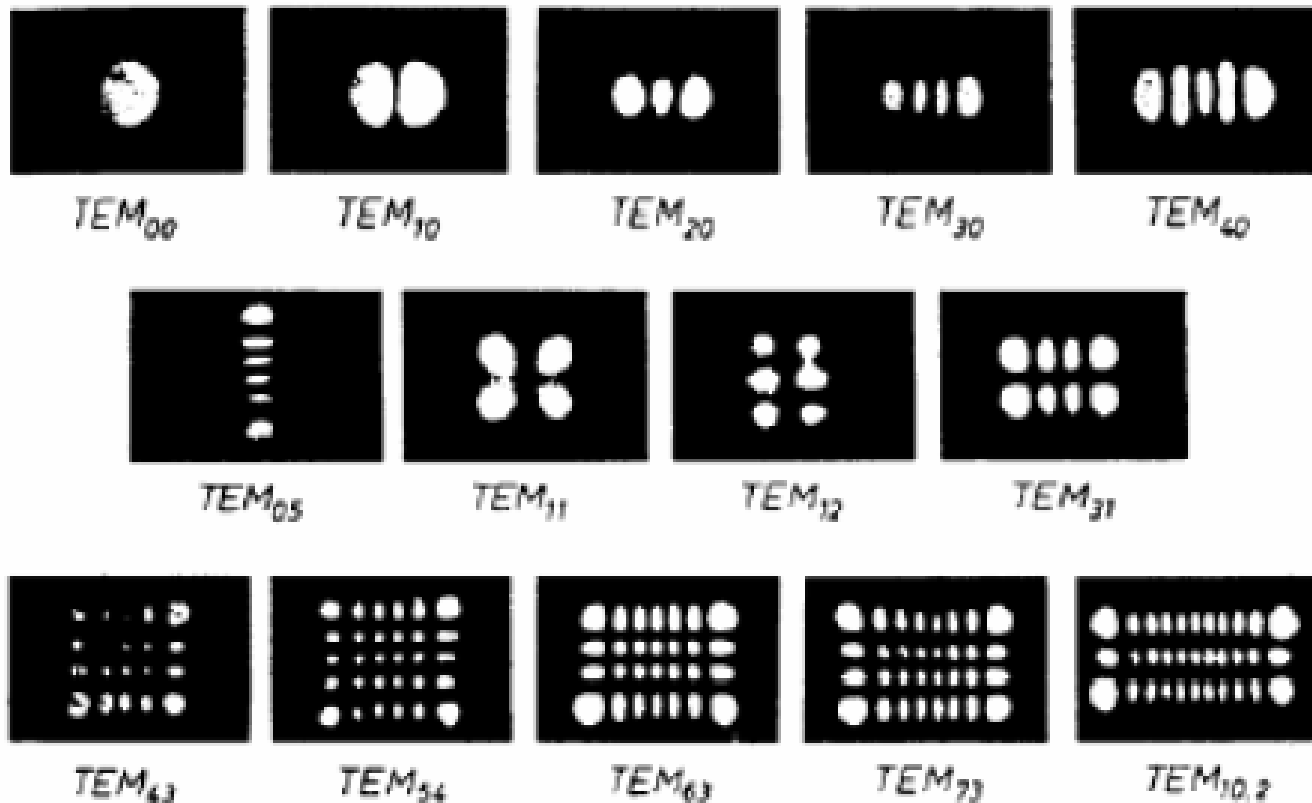
např.  $D = 3 \text{ mm}$ ,  $l = 1,064 \text{ mm}$ , pak  $\Theta = 0,38 \cdot 10^{-3} \text{ rad} = 0,022269^\circ$

# $TEM_{mn}, TEM_{pf}$ – příčné elektromagnetické módy

Stacionární rozložení intenzity elmg. pole na zrcadlech rezonátoru

Význam indexů:

kartézská s.s.-  $m, n$  – počet nul intenzity v rovině kolmé na směr šíření záření v ose  $x, y$



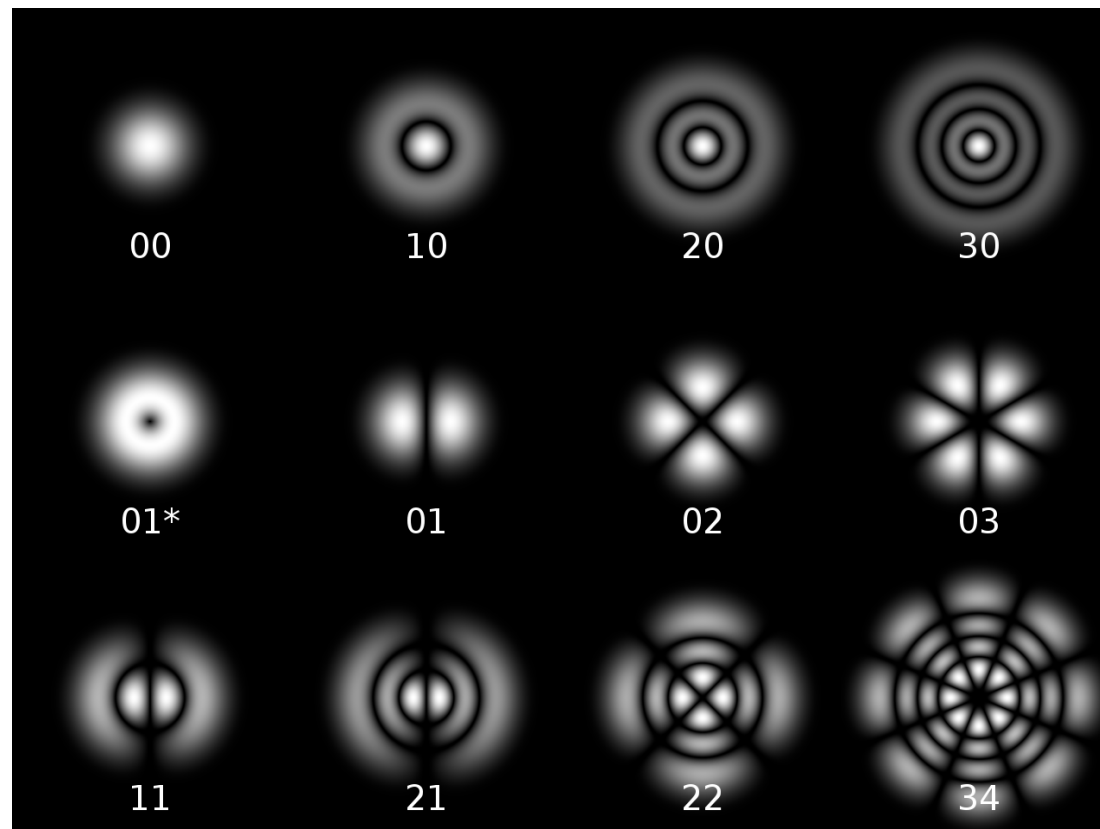
## $TEM_{mn}, TEM_{pf}$ – příčné elektromagnetické módy

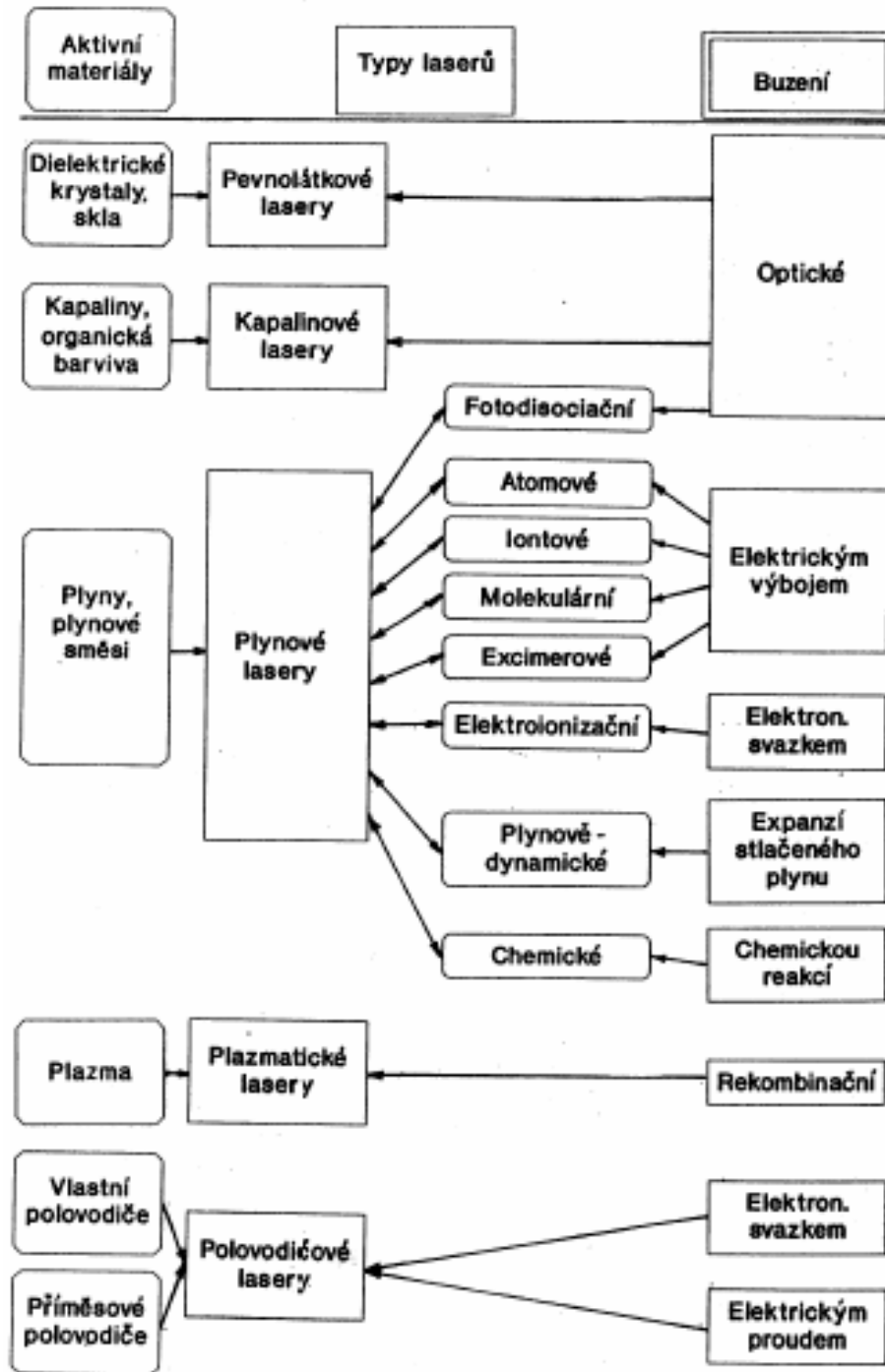
Stacionární rozložení intenzity elmg. pole na zrcadlech rezonátoru

Význam indexů:

Válcová s.s. – p,f – počet nul intenzity v radiálním a úhlovém směru

$TEM_{00}$  – základní gaussovský mód





## Klasifikace laserů – dle různých kritérií

- dle vlnové **délky**: IČ, VIS, UF, RTG
- dle typu energetických **hladin**: molekulární, elektronové, jaderné
- dle časového **režimu**: impulsní, pulsní, kontinuální
- dle typu **buzení**
- dle **výkonu**: nízko výkonové, vysokovýkonové
- dle **chlazení**: vzduch, voda – vzduch, voda – voda

## Doporučená literatura:

### Základní:

- 1.M. VRBOVÁ, H. JELÍNKOVÁ, P.GAVRILOV: Úvod do laserové techniky, Vydavatelství ČVUT, 1998
- 2.M. VRBOVÁ: Lasery a moderní optika – oborová encyklopedie, nakladatelství Prométheus, 1994
- 3.B.E.A. SALEH, M.CARLTEICH: Základy fotoniky 3, MATFYZPRESS, vydavatelství MFF UK Praha, 1991

### Doporučená:

- 4.ION, J.C. *Laser processing of engineering material*. 1st ed. Oxford: Elsevier, 2005.