



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 CO₂ 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, Φ – 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 λ

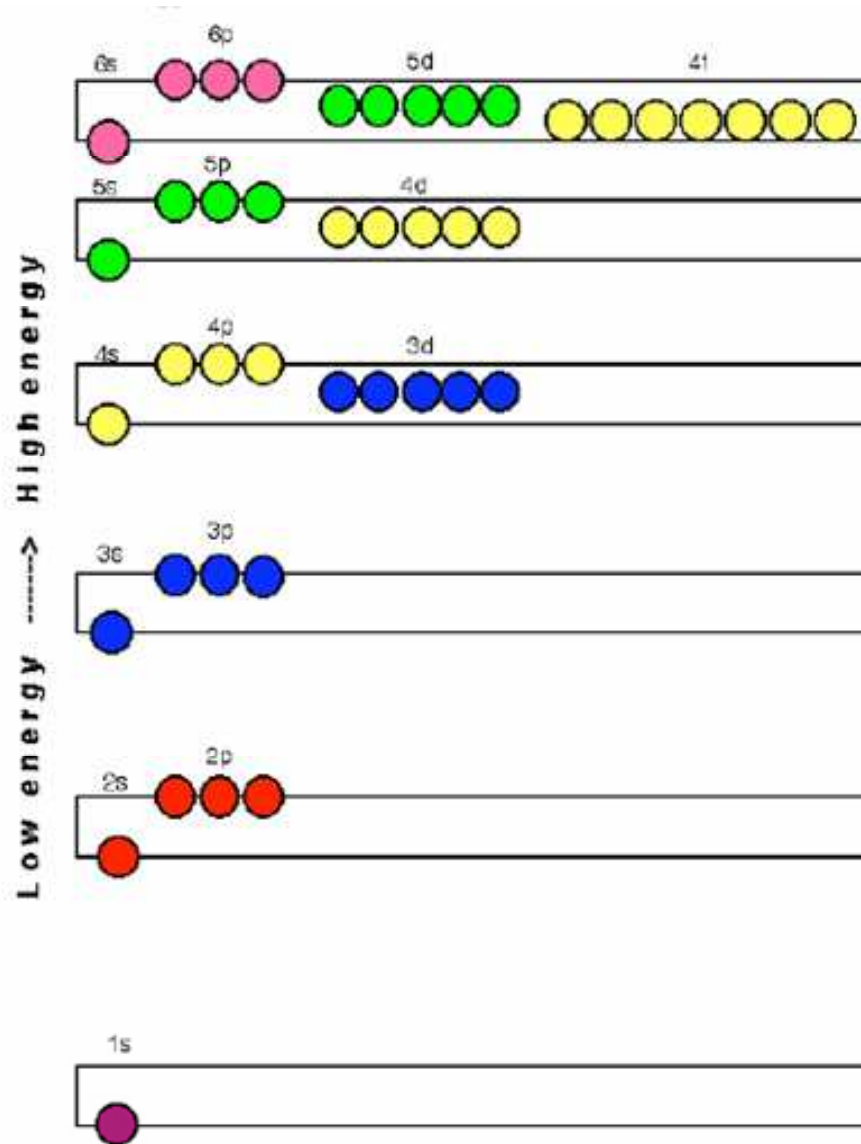
1. Vlnová povaha světla

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 μ 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

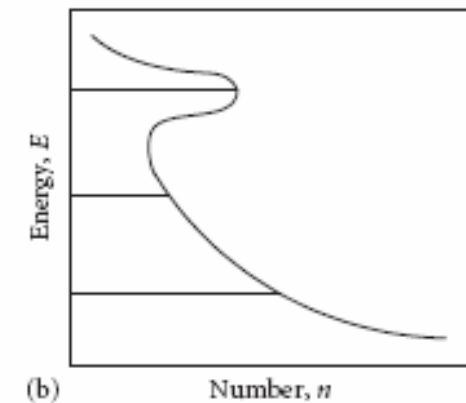
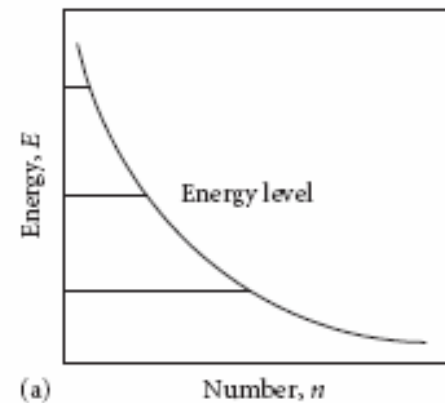
N_i ... počet částic na i -té hladině , $N = \sum N_i$...počet částic v soustavě

E_i ...energie i -té hladiny,

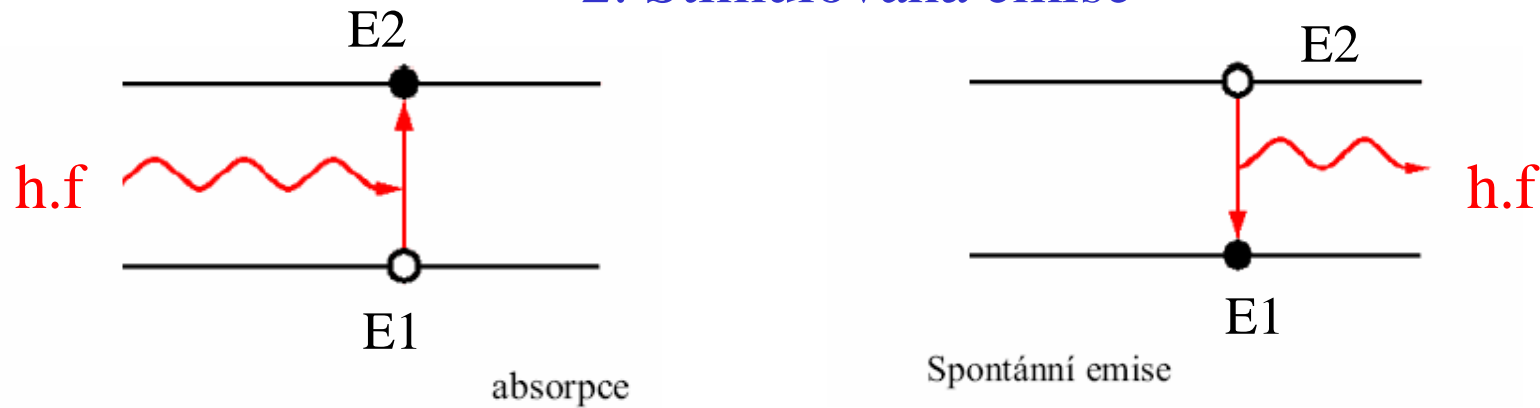
$E = \sum N_i \cdot E_i = 3/2 k T$ ($k = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$) energie soustavy

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 ($W \cdot m^{-2}$)

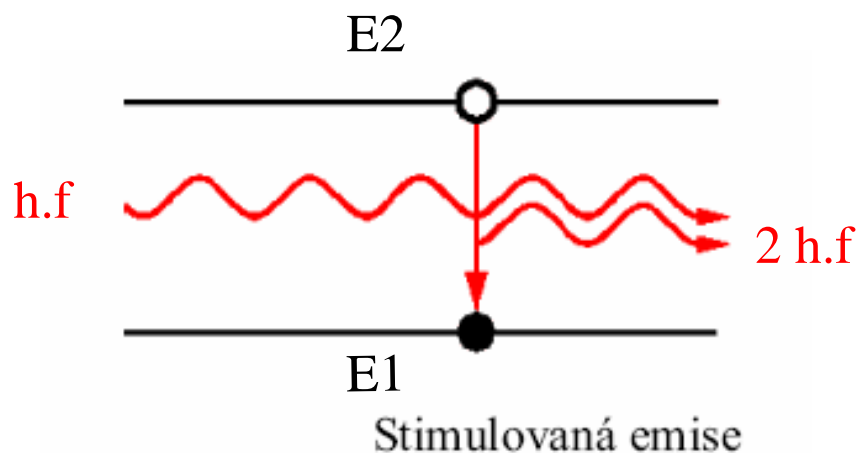
Spontánní emise: omezená doba života částice v excitovaném stavu (do $1\mu s$)

$$E_2 = hf + E_1$$

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

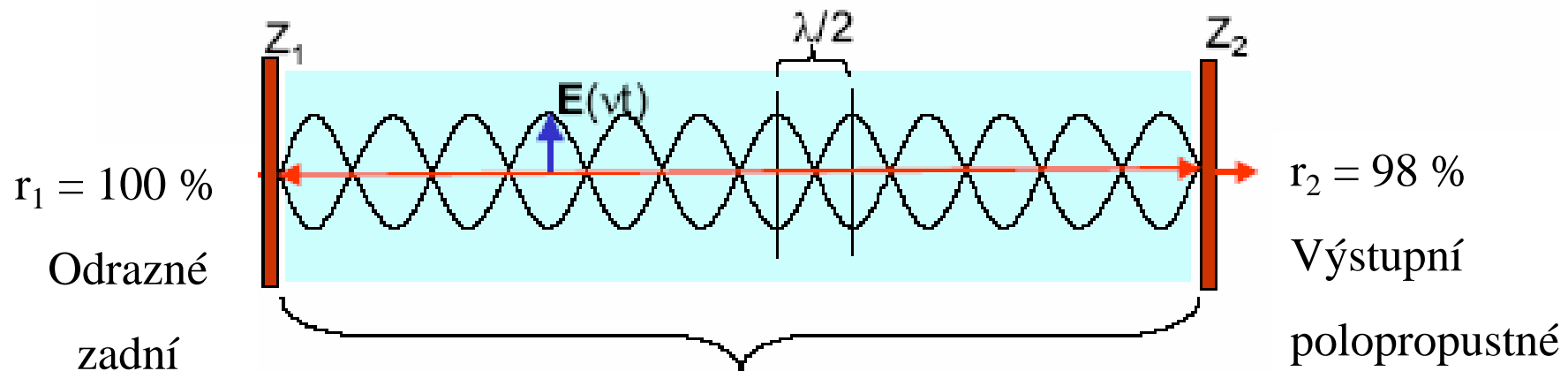
3. Zesílení záření

Záření je v soustavě zesíleno dle vztahu:

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

kde I_0 je počáteční intenzita, α koeficient zisku (závisí na ΔN) a β koeficient ztrát, L délka aktivního prostředí.

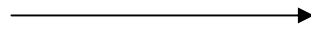
Toto zesílení je dosaženo pomocí optického rezonátoru o délce L , kde dochází k mnohonásobným odrazům na zrcadlech. Délka rezonátoru musí být rovna celému násobku půlvln.



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

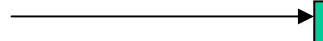
Zisk a ztráta rezonátoru – podmínka generace záření

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



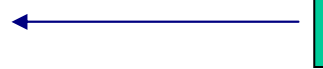
První průchod

$$I_2 = R_1 I_1$$



První odraz

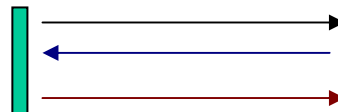
$$I_3 = I_2 e^{(\alpha - \beta) \cdot L}$$



Druhý průchod

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

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



Druhý odraz

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

Podmínky zesílení:

Prahové zesílení α

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

σ (m⁻¹) – 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

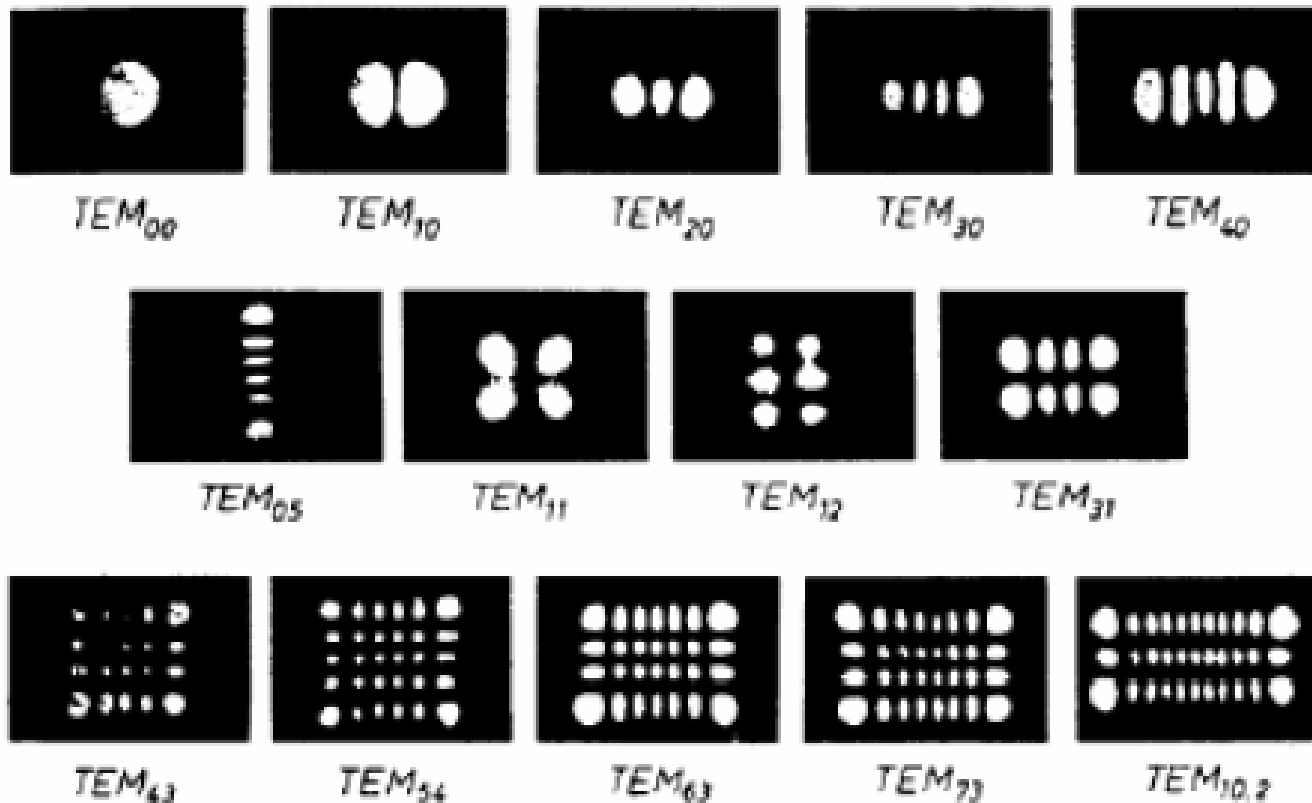
např. $D = 3 \text{ mm}$, $l = 1,064 \text{ mm}$, pak $\Theta = 0,38 \cdot 10^{-3} \text{ rad} = 0,022269^\circ$

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



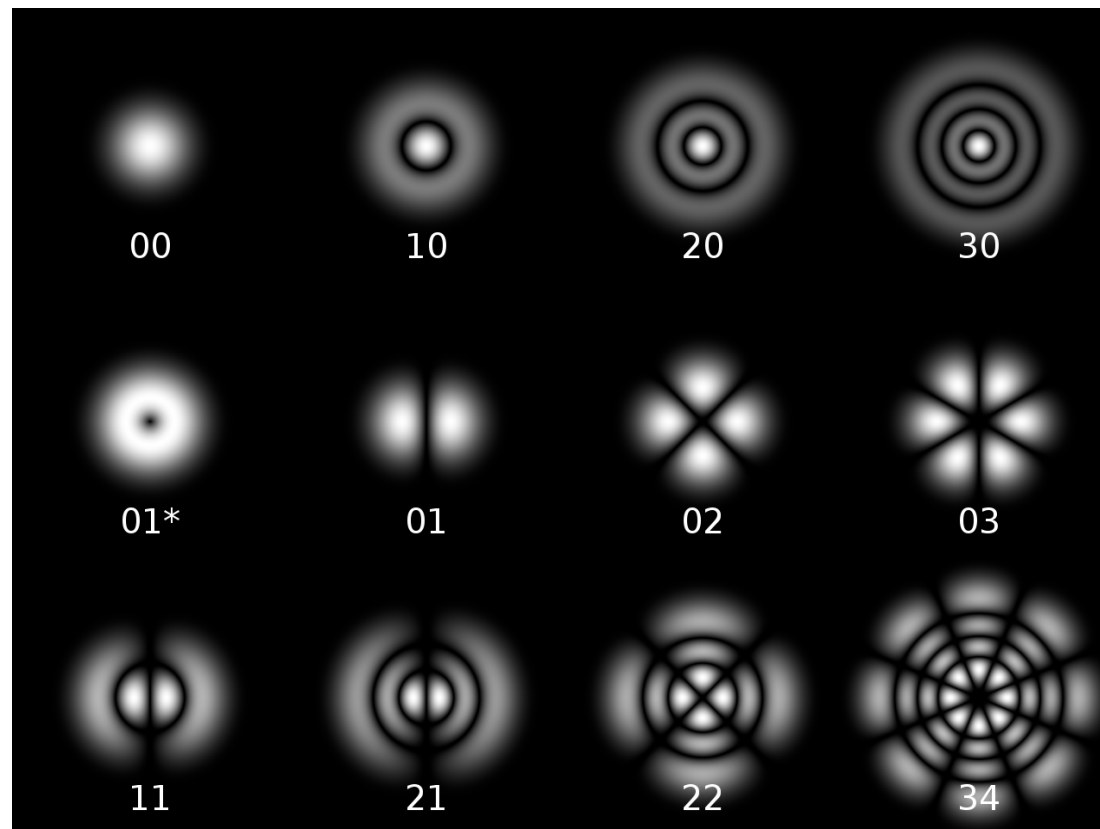
TEM_{mn}, TEM_{pf} – příčné elektromagnetické módy

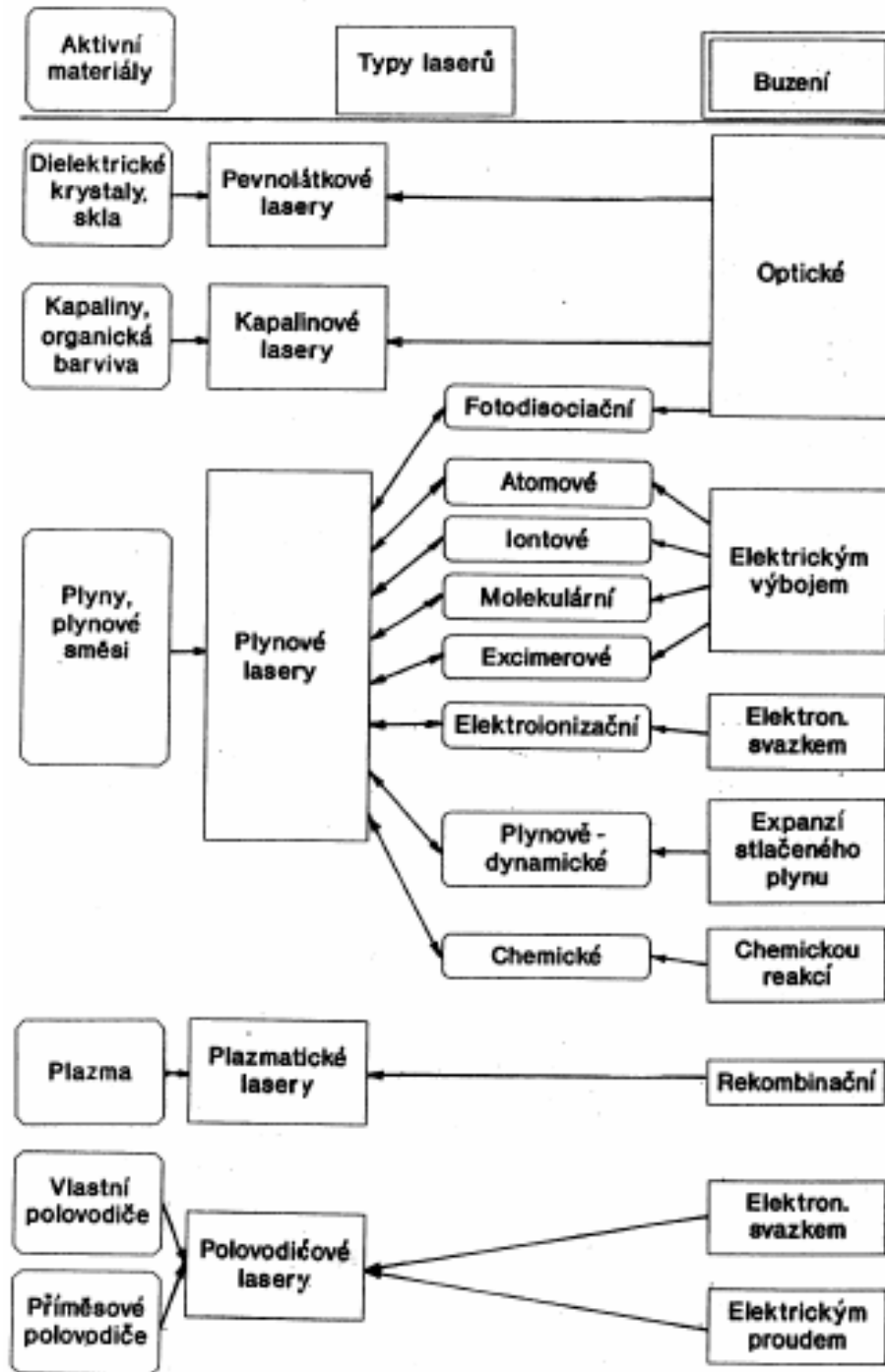
Stacionární rozložení intenzity elmg. pole na zrcadlech rezonátoru

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 fotonky 3, MATFYZPRESS, vydavatelství MFF UK Praha, 1991

Doporučená:

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