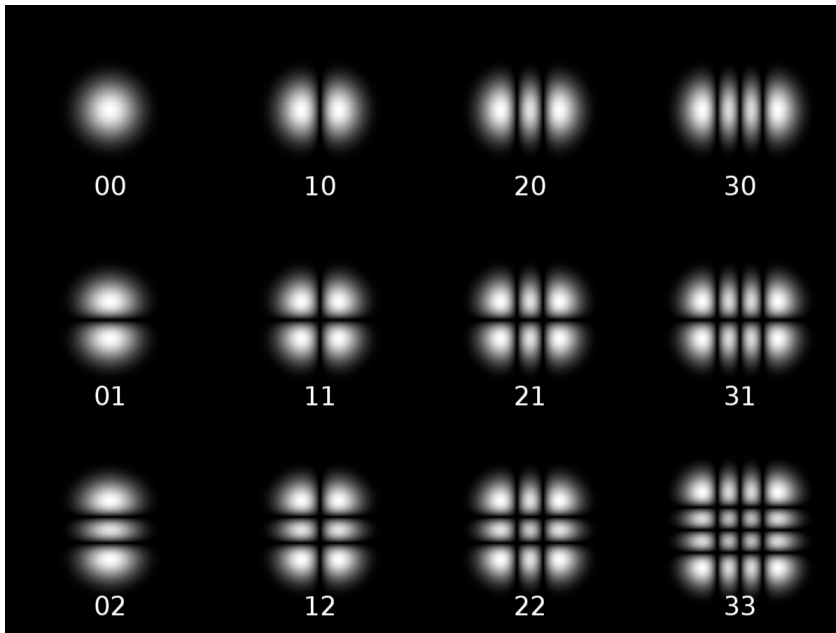


4.4.3 Módy vyšších řádů

Jako vyšší řády postupných módů se označuje řešení, které má tvar gaussovského svazku modulovaného v příčném směru Hermiteovými (pravoúhlá symetrie) nebo Laguerreovými (kruhová symetrie) polynomy. Tradičně se používá pro jednotlivé módy označení TEM_{kl} , které pochází z „transverzální elektromagnetická vlna“, tedy označuje příčnou vlnu. Označení není šťastné, protože zmiňované svazky nejsou striktně příčné (mají nenulovou, i když zpravidla velmi malou, podélnou složku). Gaussův svazek odpovídá módu TEM_{00} .



Obrázek 4.16: Průběh intenzity v příčné rovině pro vybrané Gauss-Hermiteovy svazky [13]

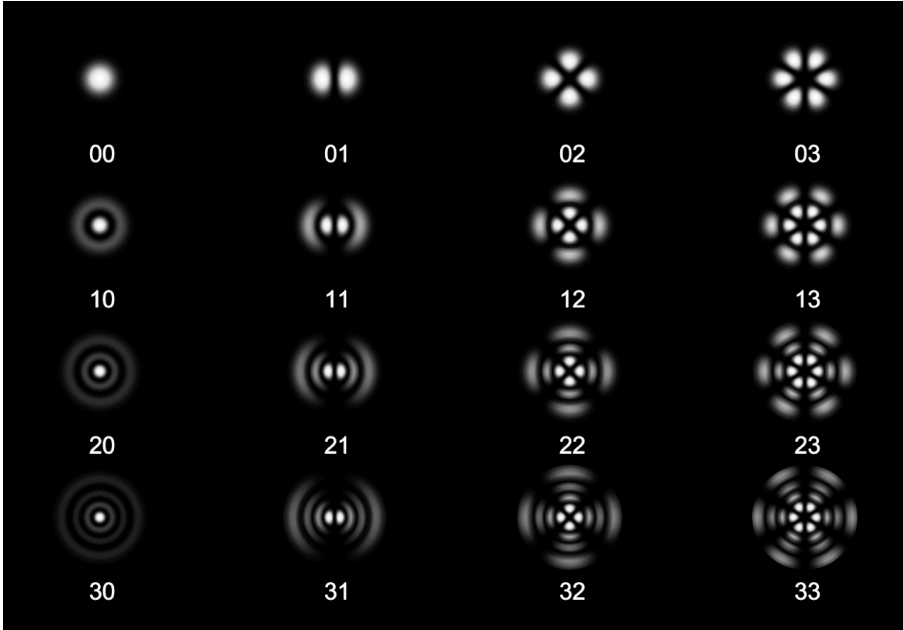
Zde připomínáme pouze výsledky probírané na přednáškách nebo v učebnicích vlnové optiky [12]. Ve tvaru, který odpovídá výrazu pro Gaussův svazek podle rovnice (4.485), můžeme pro amplitudu pole *Gauss-Hermiteova svazku* psát

$$\begin{aligned} \tilde{E}_{l,m}(x,y,z,t) = E_0 \frac{1}{q} \exp\left(i \frac{kr^2}{2q}\right) \exp[-i(\omega t - kz)] \\ H_l\left(\sqrt{2} \frac{x}{w}\right) H_m\left(\sqrt{2} \frac{y}{w}\right) \exp[-i(l+m)\Phi]. \end{aligned} \quad (4.83)$$

Zde fázový faktor $\Phi(z)$ je opět dán vztahem (4.47), poloměr $w(z)$ vztahem (4.44). Funkce H_l jsou Hermiteovy polynomy řádu l . Podobně pro Gauss-Laguerreovy svazky v cylindrických souřadnicích r, φ, z

$$\begin{aligned} \tilde{E}_{l,p}(r, \varphi, z, t) = E_0 \frac{1}{q} \exp\left(i \frac{kr^2}{2q}\right) \exp[-i(\omega t - kz)], \\ \exp[-i(2p+l)\Phi] \left(\sqrt{2} \frac{r}{w}\right)^l L_p^{(l)}\left(\frac{2r^2}{w^2}\right) \exp[\pm il\varphi] \end{aligned} \quad (4.84)$$

kde $L_p^{(l)}$ jsou Laguerreovy polynomy, p, l jsou celá nezáporná čísla. Oba typy polynomů hrají důležitou roli i jinde ve fyzice, například v kvantové mechanice. Rozložení intenzity vybraných Gauss-Hermiteových a Gauss-Laguerreových svazků je znázorněno na obrázku 4.16 a 4.17.



Obrázek 4.17: Průběh intenzity v příčné rovině vybraných Gauss-Laguerových svazků [14]

V reálných laserech se objevují většinou vyšší módy v podobě gaussovských-hermiteovských svazků, které odpovídají pravoúhlé geometrii průřezu, přestože laserový rezonátor obsahuje zpravidla zrcadla kruhového tvaru, kruhové clony a aktivní prostředí válcového tvaru. Důvodem bývá zavedení dodatečné symetrie seříznutím aktivního prostředí pod Brewsterovým úhlem, nebo as-

tigmatismus související se složitějším rezonátorem.

Z fázových členů ve výrazech pro elektrické pole uvedených svazků dostáváme modifikovanou podmínku pro rezonanci na ose rezonátoru. Vztahy jsou analogické, jen je nutné si uvědomit nahrazení fáze Φ pro gaussovský svazek TEM_{00} takto: $\Phi \rightarrow (l + m + 1)\Phi$ pro TEM_{lm} pro Hermite-Gaussovy svazky, respektive $\Phi \rightarrow (2p + l + 1)\Phi$ pro TEM_{pl} pro Laguerre-Gaussovy svazky. Pak rov. (4.71) přejde na

$$kL - s \arccos \sqrt{g_1 g_2} = n\pi, \quad (4.85)$$

kde

$$s_{Herm \text{ nebo } Laguer} = (l + m + 1) \text{ nebo } (2p + l + 1). \quad (4.86)$$

Pro rezonanční frekvence vychází

$$\nu = \frac{c}{2L} \left(n + \frac{s}{\pi} \arccos \sqrt{g_1 g_2} \right). \quad (4.87)$$

4.5 Selekcce módů rezonátoru

4.5.1 Selekcce příčných módů

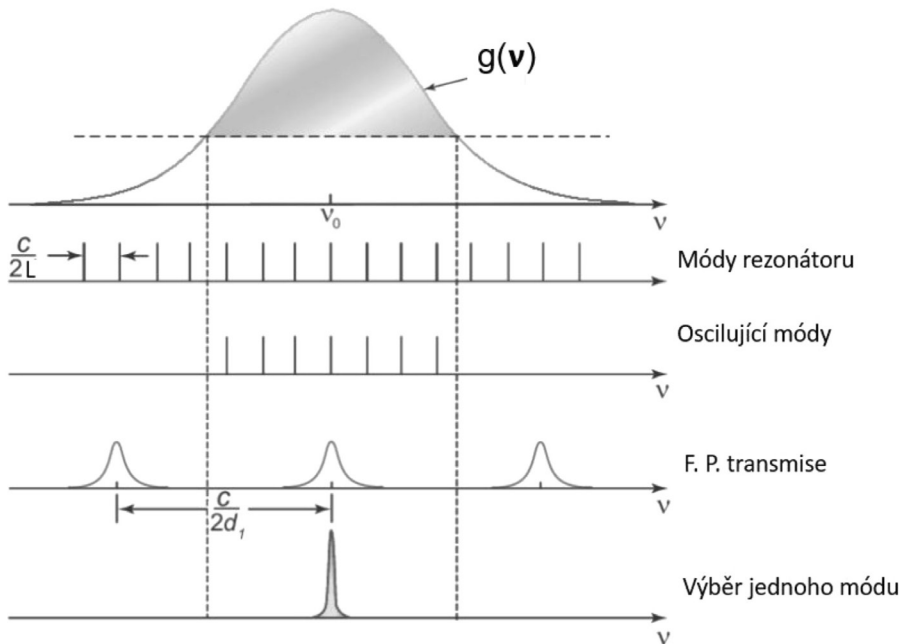
Pro aplikace laserů se většinou požaduje „hezký“ výstupní svazek, který se blíží svými vlastnostmi gaussovskému svazku. Proto se v laserovém rezonátoru vybírá základní příčný mód nejnižšího řádu, TEM_{00} . Tato selekcce se provádí standardně umístěním clony vhodného průměru do rezonátoru. Dojde tak k nastavení situace, kdy ztráty vyšších příčných módů převažují natolik nad ztrátami základního módu, že nad prahem je pouze mód základní. Mění se tak vlastně Fresnelovo číslo rezonátoru. Někdy dochází k selekci díky omezená příčného průřezu v rezonátoru některým optickým prvkem, např. aktivním prostředím, mluví se pak o měkké apertuře (na rozdíl od apertury tvrdé, tvořené kovovou clonkou).

4.5.2 Selekcce podélných módů

V laseru může také oscilovat řada podélných módů. Pro získání menší spektrální šířky výstupního svazku je vhodné provést výběr malého počtu podélných módů. Ideálně je možné vybrat od jediný, mluví se o *jednomódovém laseru* (i jeden mód má ale konečnou spektrální šířku).

V nehomogenně rozšířeném laseru může oscilovat řada spektrálně ekvi-

distantně vzdálených podélných módů (hřeben). Jeden mód lze vybrat vhodným „laděním“ laseru, tedy zavedením spektrálně selektivního prvku do rezonátoru. Příkladem může být vložení Fabry-Perotova etalonu vhodné tloušťky, jak je uvedeno na obrázku 4.18. Spektrální polohu maxim Airyho funkce lze nastavit jeho úhlovým natáčením vůči ose rezonátoru. Pro kontinuální lasery někdy stačí vložit planparalelní destičku (křemen nebo safír například), jejíž Airyho funkce má malou modulaci, ale vzhledem k úrovni čerpání blízko nad prahem může po vhodném natočení k selekci jednoho módu postačovat.



Obrázek 4.18: Selekcce podélných módů pomocí Fabry-Perotova etalonu vloženého do rezonátoru. V horní části je znázorněn pás zesílení laseru a čárkovaně úroveň ztrát, pod ním spektrum podélných módů rezonátoru, níže spektrum oscilujících módů (které jsou nad prahem), dále spektrum propustnosti Fabry-Perotova interferometru vloženého do rezonátoru, výsledkem je výběr jediného podélného módu