



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost



Univerzita Palackého
v Olomouci

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Inovace a zvýšení atraktivity studia optiky
reg. č.: CZ.1.07/2.2.00/07.0289

Svazková optika

Zdeněk Bouchal

Učební pomůcka pro studenty oboru

Přístrojová optika

2. ročník (1 h př./ 1 h cv. týdně)

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.

Obsah přednášek

- Př. 1: Princip činnosti laseru, základní konstrukční typy a bezpečnostní třídy laserů.
- Př. 2: Význačné vlastnosti laserového záření a přehled aplikací laserů.
- Př. 3: Popis a základní geometrické parametry gaussovského svazku.
- Př. 4: Intenzita gaussovského svazku a přenášený výkon.
- Př. 5: Metody popisu transformace gaussovského svazku.
- Př. 6: Simulace svazkové transformace v optickém programu Oslo Premium.
- Př. 7: Praktické provedení fokusace a kolimace gaussovského svazku, konstrukce a parametry laserových rozšiřovačů.
- Př. 8: Princip a počítačová simulace prostorové filtrace laserového svazku, konstrukce prostorového filtru.
- Př. 9: Vlastnosti záření generovaného laserovou diodou, metody symetrizace eliptického svazku.
- Př. 10: Vlastnosti, realizace a použití besselovských a laguerreovských-gaussovských svazků.
- Př. 11: Princip transformace laserového záření pomocí prostorového modulátoru světla.
- Př. 12: Laboratorní ukázka generace negaussovských svazků, práce se systémem Beam View Analyzer.

Literatura :

- [1] V. Sochor, Lasery a koherentní svazky, ČSAV, Praha 1990.
- [2] B.E.A. Saleh, M.C. Teich, Základy fotoniky, Matfyzpress, UK Praha 1995.
- [3] M. Vrbová a kol., Lasery a moderní optika, Prometheus, Praha 1994.
- [4] J. Ponec, Transformace laserového záření optickými soustavami, UP Olomouc 1989 (skriptum).

Podstata světla

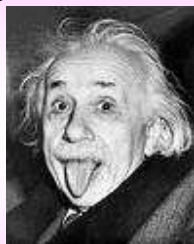


M. Planck:
Světlo je proud
částic (fotonů).



J. C. Maxwell:
Světlo je EM
vlnění.

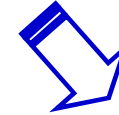
Světlo



A. Einstein, L. de Broglie:
Světlo je současně částice
i vlna – vlnově částicový
dualismus.



Optické záření



Vlnění

Frekvence ν (světlo: $\nu = (3.9 - 7.8) \cdot 10^{14}$ Hz)
Fázová rychlost šíření (vakuum $c = 3 \cdot 10^8$ m/s)
Perioda $T = 1/\nu$
Kruhová frekvence $\omega = 2\pi\nu$
Vlnová délka (vakuum) $\lambda = c/\nu$

Částice (foton)

Energie $W = h\nu$ (světlo: $W = (1.6 - 3.2)$ eV)
($h = 6.62 \cdot 10^{-34}$ Js – Planckova konstanta)

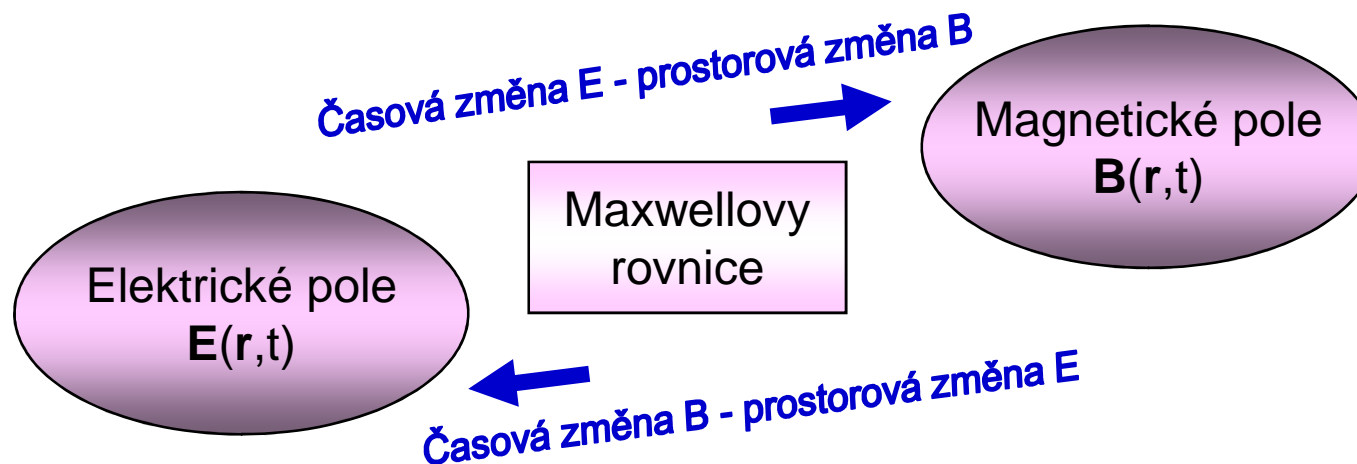
Optické záření

UV záření
(10-380) nm
UVA, UVB, UVC

Světlo
(380 -760) nm

IČ záření
760 nm -1 mm

Elektromagnetická podstata optického záření



Elektrická intenzita

Síla F_e , kterou elektrické pole působí na jednotkový elektrický náboj

$$E = \frac{F_e}{q}$$

Magnetická indukce

Souvisí se silou, kterou magnetické pole působí na elektrický náboj q pohybující se rychlostí v

$$F_m = qv \times B,$$
$$B = \frac{1}{qv^2} F_m \times v.$$

Vznik optického záření

- Optické záření vzniká při přechodu elektronu z vyšší energetické hladiny na nižší.
- Energie vyzářeného fotonu je dána rozdílem energií odpovídajících hladinám přechodu.



Klasické zdroje:
Spontánní emise

X

LASER:
Stimulovaná emise

Spontánní emise

Spontánní emise je kvantový jev při kterém elektron samovolně přechází z excitovaného stavu do stavu základního při současném vyzáření fotonu. Ze základního stavu se do excitovaného stavu atom může dostat např. působením optického záření, elektrickým výbojem nebo chemickou reakcí.



Příklad spontánní emise:

Žárovka

Wolframové vlákno, které je žhaveno elektrickým proudem je zataveno v baňce, kde je vakuum aby neshořelo. Atomy vlákna jsou excitovány vzájemnými srážkami, které vyvolává vysoká teplota.

Stimulovaná emise

Stimulovaná emise je kvantový jev, při kterém dopadající foton stimuluje přechod excitovaného elektronu do základního stavu. V excitovaném stavu setrvává elektron jen velmi krátkou dobu $10^{-3} - 10^{-7}$ s. Je-li jeho přechod na základní hladinu vyvolán (stimulován) fotonem o energii, která odpovídá rozdílu energií hladin, pak foton, který je při přechodu vyzářen má stejnou vlnovou délku (energii), polarizaci a směr jako foton stimulující.

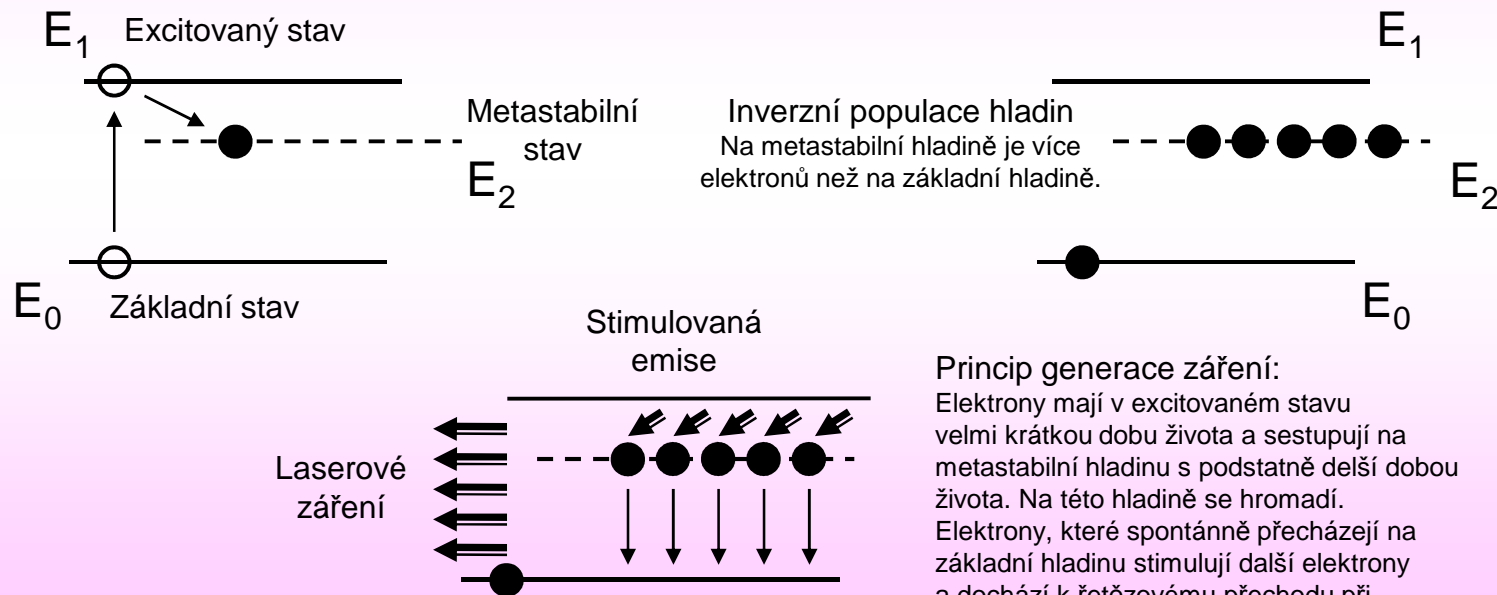


Princip činnosti laseru

LASER - Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (zesilování světla při stimulované emisi záření)

Princip laseru předpověděl A. Einstein v r. 1916, k realizaci došlo až v r. 1960.
Vysvětlení vyzařování laseru lze provést na příkladu aktivní látky s tříhladinovou soustavou kvantových přechodů.

Tříhladinový kvantový systém



Princip generace záření:

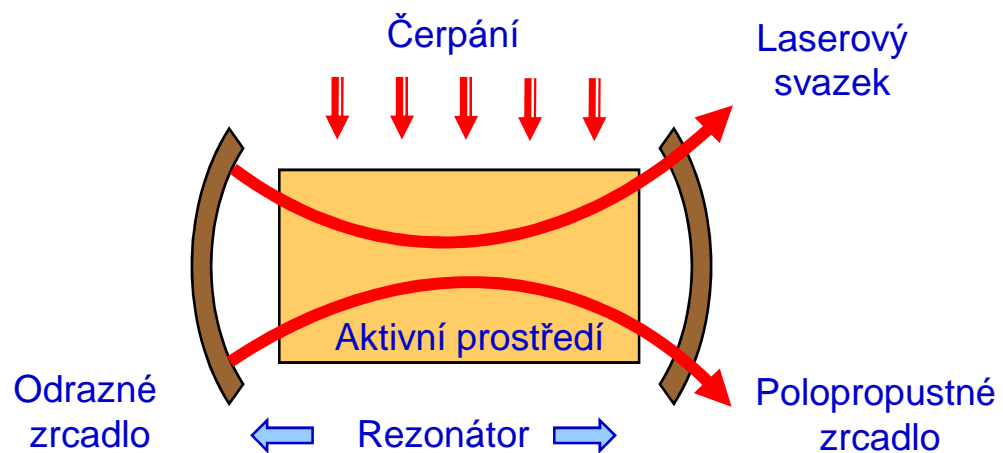
Elektrony mají v excitovaném stavu velmi krátkou dobu života a sestupují na metastabilní hladinu s podstatně delší dobou života. Na této hladině se hromadí. Elektrony, které spontánně přecházejí na základní hladinu stimulují další elektrony a dochází k řetězovému přechodu při současném vyzáření korelovaných fotonů.

Podmínky inverzní populace hladin

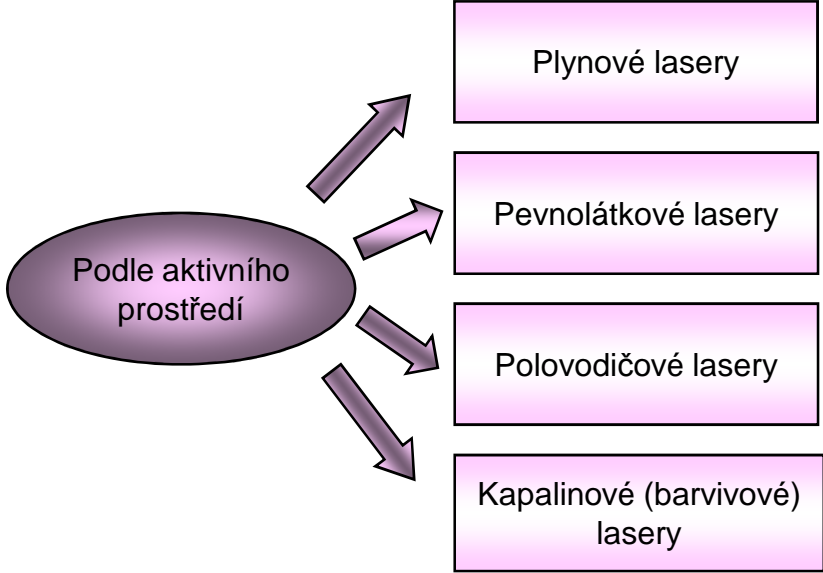
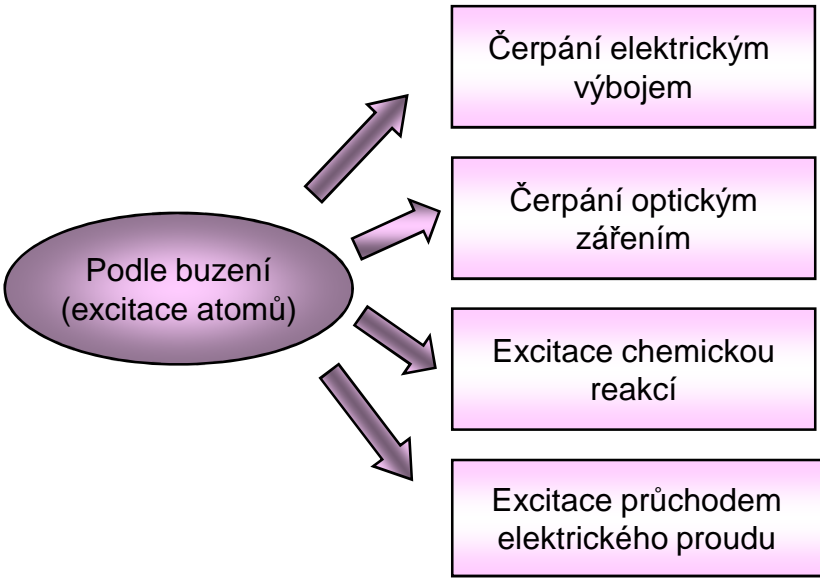
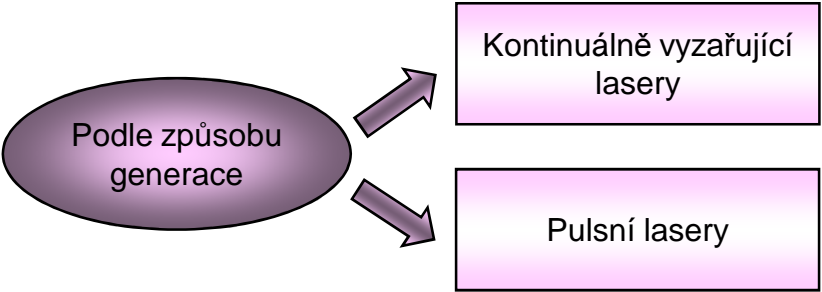
K tomu aby mohla nastat inverzní populace hladin v určitém objemu aktivního prostředí musí být splněny tři podmínky:

- Přímý přeskok elektronů z hladiny s energií E_1 na hladinu s energií E_0 není dovolen (jinak by fotony budící energie samy způsobovaly návrat elektronů na základní hladinu).
- Elektrony musí za velmi krátkou dobu sestupovat nezářivým přechodem z hladiny E_1 na hladinu E_2 (rozdíl energií se mění na ohřev látky). Rozdíl $E_1 - E_2$ musí být malý aby se látka příliš nezahřívala a aby rozdíl $E_2 - E_0$ byl velký a foton vyzářený při stimulovaném přechodu měl co největší energii.
- Aby co nejvíce elektronů rozmístěných v objemu látky mohlo být ve stavu excitace na metastabilní hladině (inverzní populace), musí být doba po kterou se elektrony udrží na hladině E_2 dlouhá ve srovnání s dobou existence elektronů na hladině E_1 (elektrony jsou na E_1 excitovány v nahodilých okamžicích nekoherentním zářením, tento stav rychle opouštějí a na hladině E_2 na sebe „počkají“).

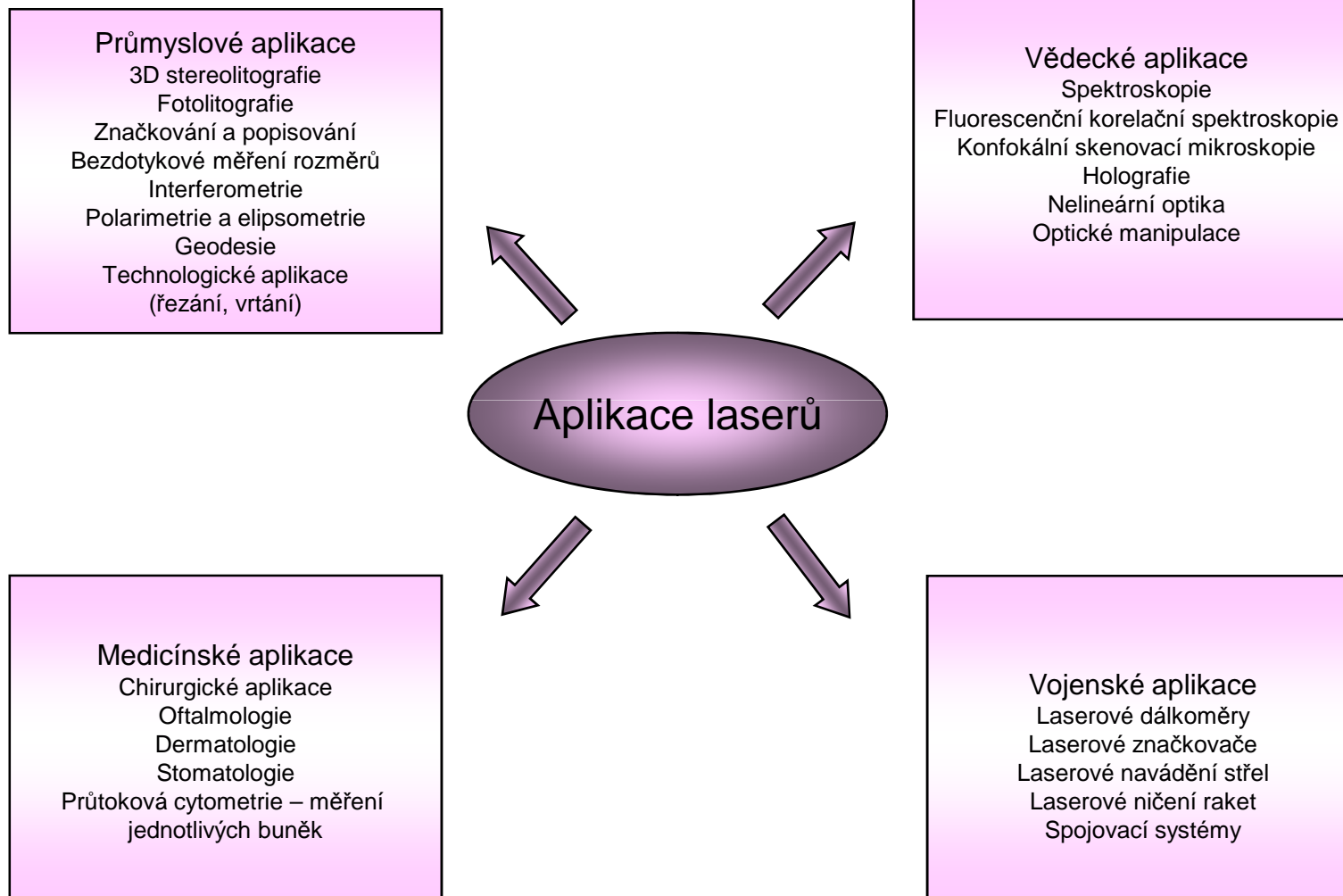
Konstrukce laseru



Rozdělení laserů



Přehled aplikací laserů



Bezpečnostní třídy laserů



TŘÍDA 1

Lasery bezpečné
v provozních podmínkách
(včetně pozorování svazku
optickými přístroji).

TŘÍDA 1M

Lasery s vlnovou délkou
(302-4000) nm, bezpečné
v provozních podmínkách,
nebezpečné při pozorování
svazku optickými přístroji

Třídy laserů

TŘÍDA 4

Lasery nebezpečné i při
difúzním odrazu, způsobují
poškození pokožky,
nebezpečné pro vznik
požáru.

TŘÍDA 3B

Lasery nebezpečné, jestliže
dojde k přímému ozáření
svazkem.

TŘÍDA 2

Lasery s vlnovou délkou
(400-700) nm, ochrana
v běžných podmínkách
zajištěna mrkacím reflexem.

TŘÍDA 3R

Lasery nebezpečné
při přímém
sledování svazku.

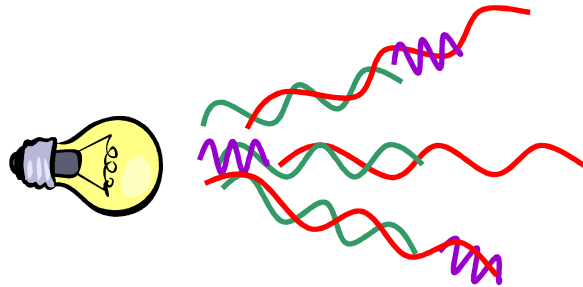
TŘÍDA 2M

Lasery s vlnovou délkou
(400-700) nm, nebezpečné
při sledování svazku
optickými přístroji.

Význačné vlastnosti laserového záření

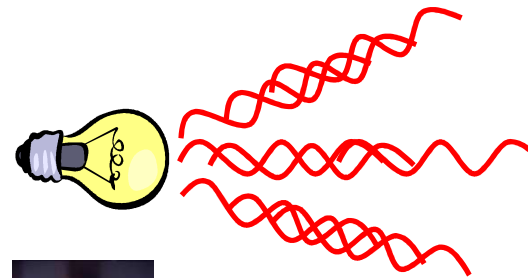
Klasický zdroj

Zdroj přirozeného (bílého) světla



Bílé světlo zahrnuje široké spektrum vlnových délek (barev), které je možno pozorovat při rozkladu hranolem nebo mřížkou.

Zdroj bílého světla s použitým monochromatickým filtrem



Světlo klasických zdrojů (slunce, svíčka, žárovka) není fázově sladěné (je nekoherentní) a od zdroje postupuje ve všech směrech.

Laserový zdroj

Laser



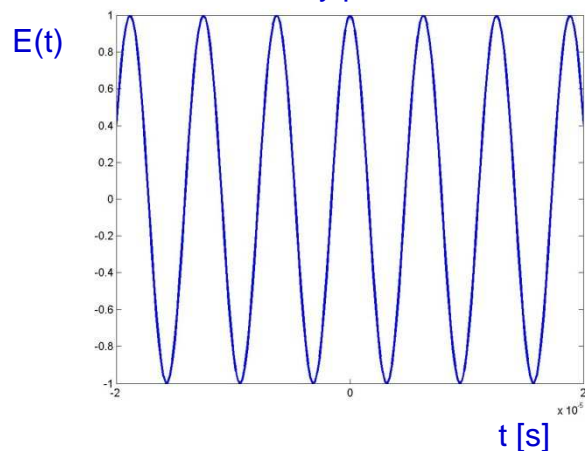
Laser generuje záření jediné vlnové délky (barvy), které je fázově korelované (koherentní) a postupuje prostorem ve tvaru úzkého svazku s malou rozbíhavostí.

- Přednosti laserového záření:
- Monochromaticnost
 - Koherence
 - Dobrá směrovost

Monochromaticity of laser radiation

Monochromatic wave

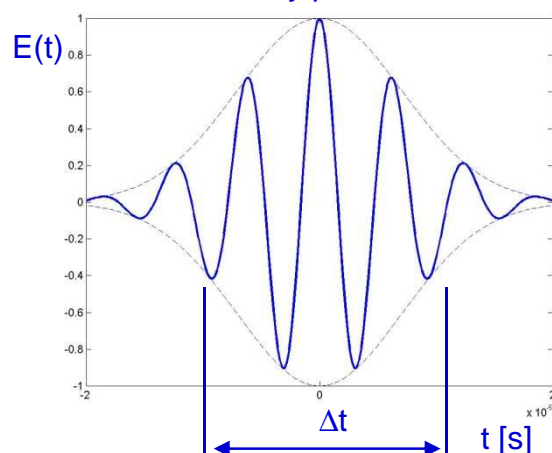
Time course



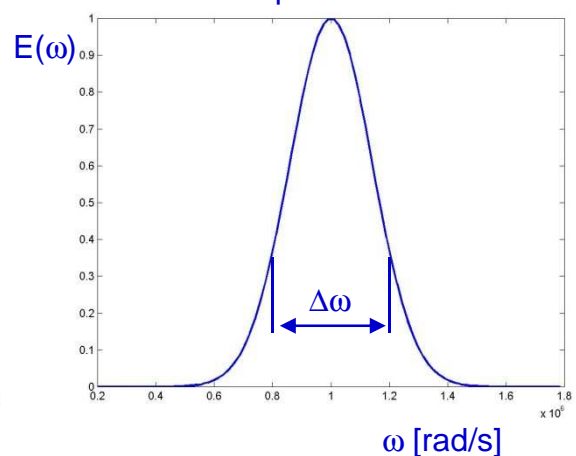
Monochromatic wave is an idealization – amplitude of electric intensity is constant and its oscillations are determined by a single frequency ω_0 . Monochromatic wave cannot be precisely realized because it would have to exist for an infinite time. Radiation emitted by a laser operating in a continuous mode is a good approximation of a monochromatic wave – its spectrum contains frequency components that lie in a very narrow interval of frequencies $\langle \omega_0 - \Delta\omega/2, \omega_0 + \Delta\omega/2 \rangle$.

Wave packet (pulse)

Time course



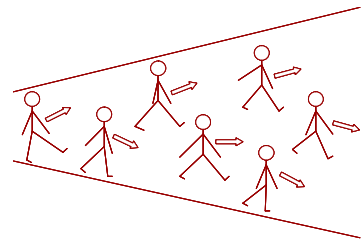
Spectrum



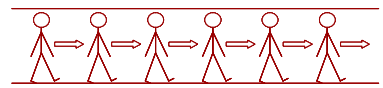
In real radiation the amplitude changes over time and can be defined as a finite duration of the signal Δt . Such radiation corresponds to a spectrum composed of monochromatic components, the amplitudes of which have a significant weight only for frequencies lying in the interval $\Delta\omega$. It can be shown that $\Delta t \cdot \Delta\omega = \text{const.}$, so a short wave packet corresponds to a wide spectrum and vice versa.

Koherence laserového záření

„Nekoherentní“ vojenský útvar:
Vojáci pochodují v různých směrech
a nemají sladěnou fázi kroku.



„Koherentní“ vojenský útvar:
Vojáci pochodují ve stejném směru
a mají sladěnou fázi kroku.



Koherence (korelovanost) světla určuje způsob, jakým se skládají světelné vlny. Vlny plně koherentní mají stálý fázový rozdíl, takže výsledná intenzita je fázovým rozdílem ovlivněna – říkáme, že vlny interferují. V místech, kde mají vlny stejnou fázi, dojde k zesílení (konstruktivní interference), v místech kde jsou v protifázi se zeslabují (destruktivní interference).

Klasifikace koherence

Koherence prostorová

Zkoumá se korelace světla ve dvou různých bodech prostoru

Parametr prostorové koherence:
Koherenční šířka = největší vzdálenost Δx při které světlo ještě interferuje.

Youngův pokus Interferenční obrazec

Laserový svazek Δx

Koherence časová

Zkoumá se korelace vln s časovým zpožděním

Parametr časové koherence:
Koherenční čas (koherenční délka) = největší časové zpoždění Δt (největší rozdíl optických drah ΔL) při kterém světlo ještě interferuje.

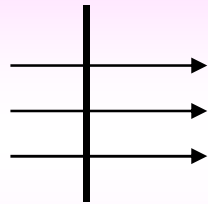
Koherenční délka: $\Delta L = \lambda^2 / \Delta \lambda$

Machův – Zehnderův interferometr

Směřovost laserového záření

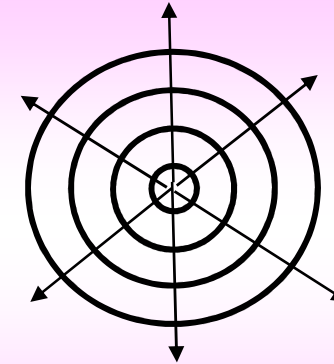
Poloha fotonu (prostorová lokalizace) a jeho hybnost jsou vázány relacemi neurčitosti – tento princip má přímou souvislost s ohybem (difrakcí) optického záření.

Rovinná vlna



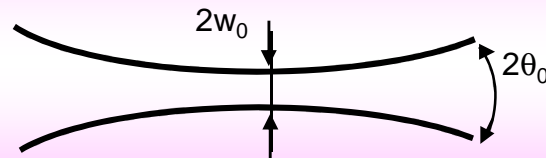
Úplná neurčitost polohy (konstantní amplituda)
⊗
Jednoznačně určená hybnost (směr šíření)

Sférická vlna



Jednoznačnost polohy
⊗
Úplná neurčitost hybnosti (směru šíření)

Laserový svazek

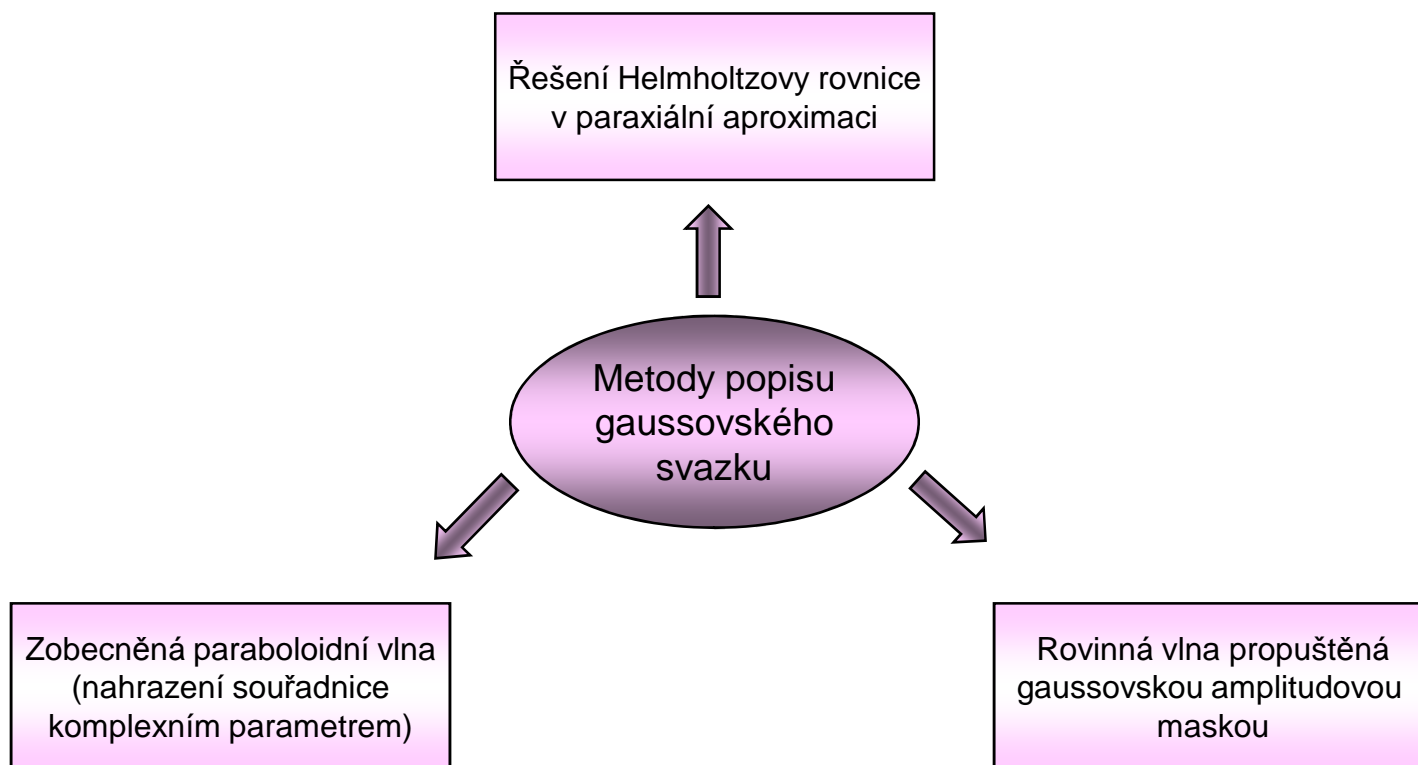


$$w_0 \theta_0 \approx \lambda$$

Čím je svazek užší, tím je jeho rozbíhavost větší.

Gaussovský laserový svazek

Gaussovský svazek má kruhově symetrickou stopu - jeho intenzitní profil je určen Gaussovou funkcí. Je to základní typ svazku, který je vyzářen ideálním laserem.



Popis gaussovského svazku

konstantní
amplituda

osová
amplituda

amplitudový
profil

tvár
vlnoplochy

Gouyův
fázový posuv

oscilační
členy



Komplexní amplituda:
$$U(r, z) = A \frac{w_0}{w} \exp\left(-\frac{r^2}{w^2}\right) \exp\left(i \frac{kr^2}{2R}\right) \exp\left(i \arctg \frac{z}{q_0}\right) \exp(i\omega t - ikz)$$

Intenzita:
$$I(r, z) = I_0 \frac{w_0^2}{w^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{w^2}\right)$$

Parametry svazku

w_0 pološířka (poloměr) pasu svazku

q_0 Rayleighova vzdálenost

w pološířka (poloměr) svazku ve vzdálenosti z od pasu

R poloměr křivosti vlnoplochy

k vlnové číslo

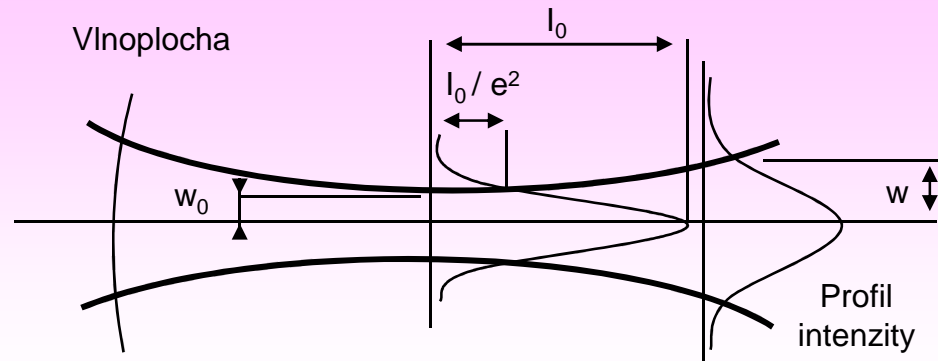
ω kruhová frekvence

$$q_0 = \frac{kw_0^2}{2}$$

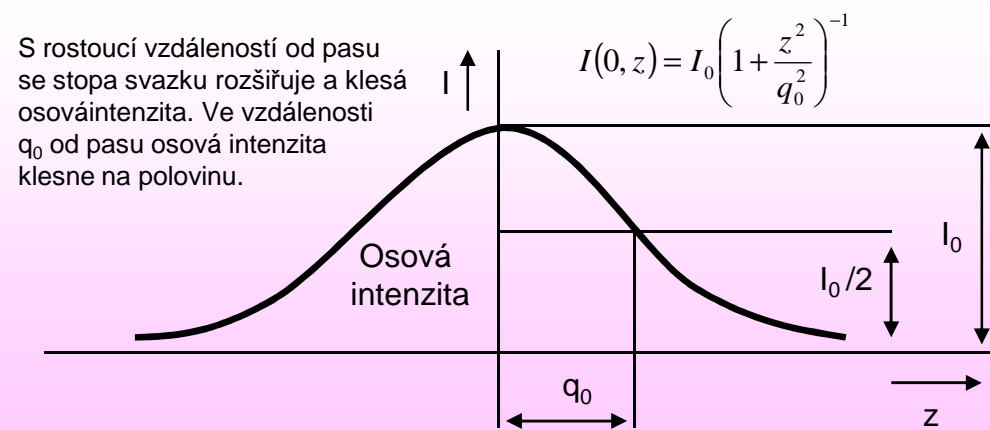
$$w = w_0 \left(1 + \frac{z^2}{q_0^2}\right)^{1/2}$$

$$R = z \left(1 + \frac{q_0^2}{z^2}\right)$$

Znázornění gaussovského svazku

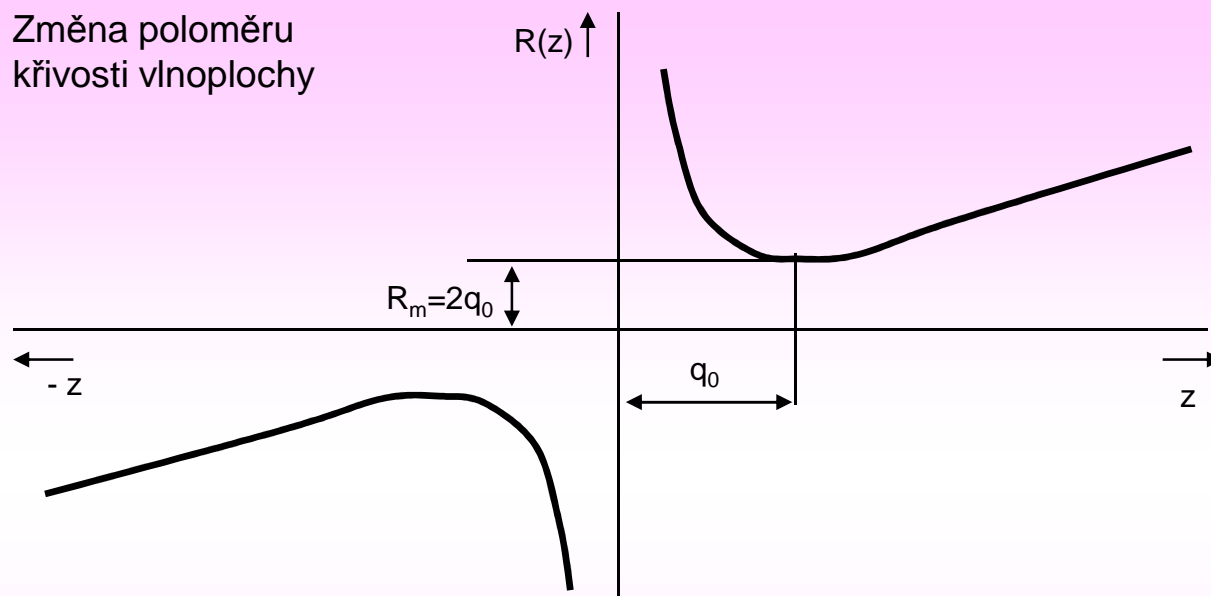


Poloměr pasu svazku je definován jako vzdálenost od osy ve které intenzita poklesne z hodnoty I_0 na hodnotu I_0/e^2 .



Vlnoplocha gaussovského svazku

Změna poloměru
křivosti vlnoplochy



$$R = z \left(1 + \frac{q_0^2}{z^2} \right)$$



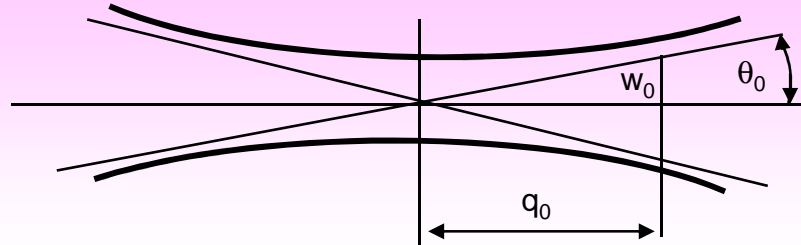
$$z \rightarrow 0: \quad z \rightarrow \infty$$

$$z \rightarrow \infty: \quad z \rightarrow \infty$$

Nejmenší poloměr
křivosti vlnoplochy:

$$\frac{\partial R}{\partial z} = 0 \quad \rightarrow \quad z = \pm q_0, \quad R_m = \pm 2q_0$$

Divergence gaussovského svazku



$$w = w_0 \left(1 + \frac{z^2}{q_0^2} \right)^{1/2}$$

$$z \gg q_0 \rightarrow w = \frac{\theta_0}{q_0} z$$

Úhlová divergence svazku:

$$\theta_0 = \frac{\lambda}{\pi w_0}$$

Výkon gaussovského svazku

Intenzita: $I(r, z) \equiv |U(r, z)|^2 = I_0 \frac{w_0^2}{w^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{w^2}\right)$

Výpočet výkonu z intenzity: $P = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} I(r, z) r dr d\varphi$

Celkový výkon přenášený svazkem:

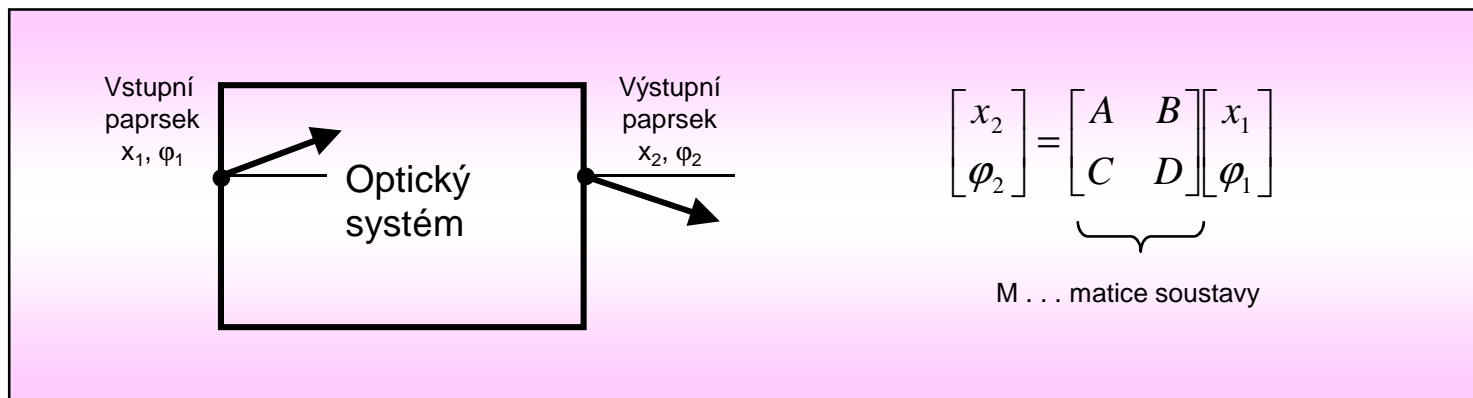
$$P = \frac{1}{2} I_0 \pi w_0^2$$

Výkon svazku omezeného kruhovou clonou
(clona má poloměr ρ a je umístěna ve vzdálenosti z od pasu):

$$P_{KC} = P \left[1 - \exp\left(-\frac{2\rho^2}{w^2(z)}\right) \right]$$

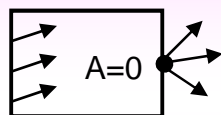
Základy maticové optiky

Pro praktické použití laserových svazků je důležitá jejich prostorová transformace realizovaná pomocí optických systémů. Popis svazkové transformace lze výhodně provést pomocí maticové metody užívané v paprskové optice.



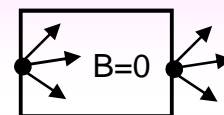
Transformační matice optických systémů

Fokusační systém



$$A=0 \quad x_2 = B\varphi_1$$

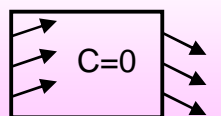
Zobrazovací systém



$$B=0 \quad x_2 = Ax_1$$

A ... příčné měřítko

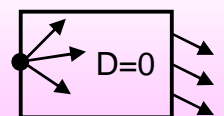
Afokální systém



$$C=0 \quad \varphi_2 = D\varphi_1$$

D ... úhlové zvětšení

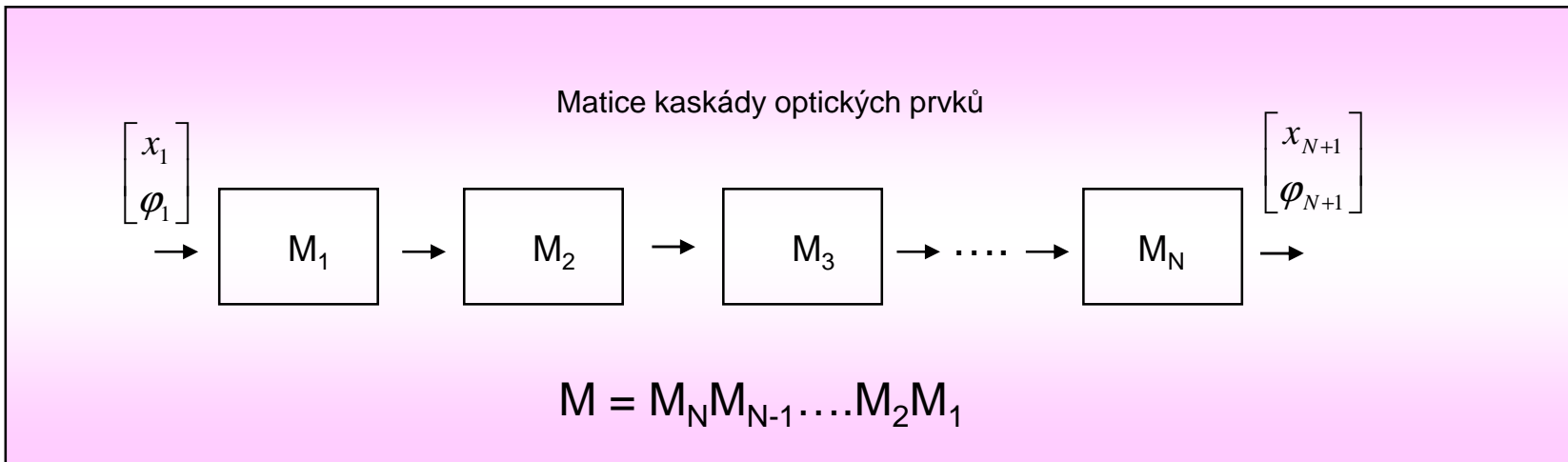
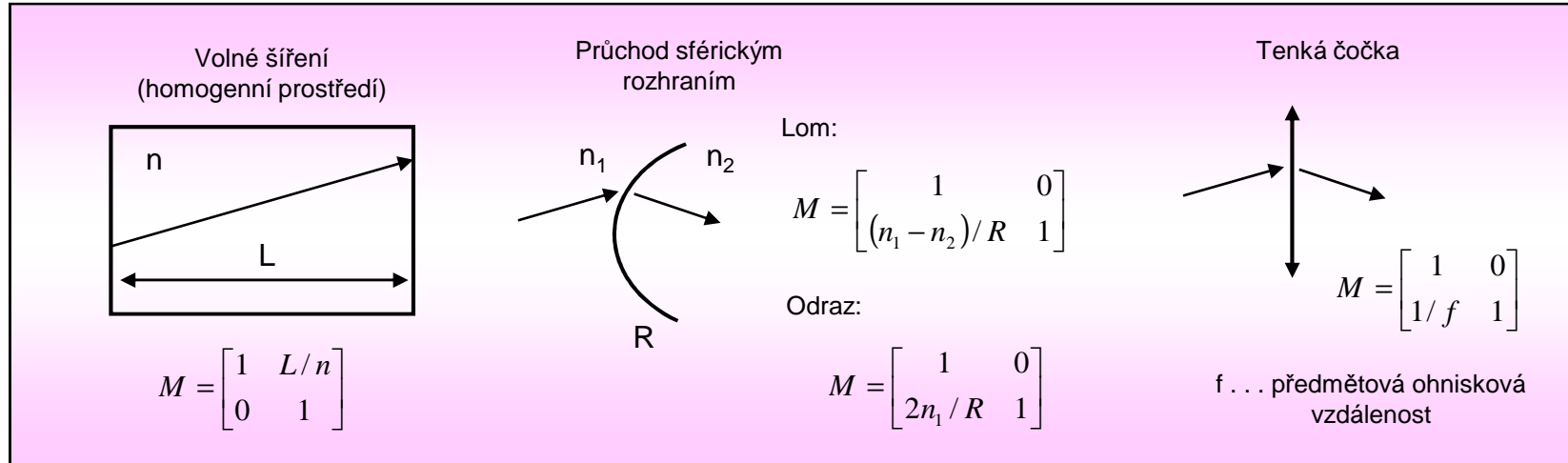
Kolimační systém



$$D=0 \quad \varphi_2 = Cx_1$$

Základní transformační matice

Při sestavení transformačních matic se pracuje s redukovanými úhly – je to poměr úhlu a příslušného indexu lomu $\bar{\varphi}_j = \varphi_j / n_j$
 V tomto případě má transformační matice jednotkový determinant ($D=AD-BC=1$).

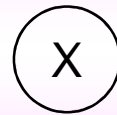


Maticová transformace gaussovského svazku

Gaussovský svazek odpovídá paraxiální (paraboloidní) vlně u které je souřadnice z nahrazena komplexním parametrem $q = z + iq_0$.

Paraboloidní vlna

$$U = \frac{A}{z} \exp\left(-i \frac{kr^2}{2z}\right)$$



Gaussovský svazek

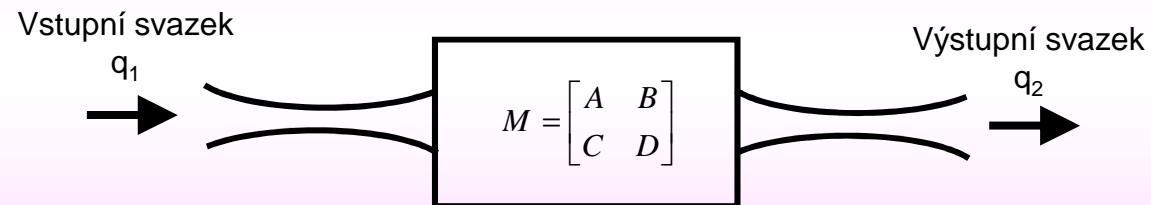
$$U = \frac{A}{q} \exp\left(-i \frac{kr^2}{2q}\right)$$

Komplexní parametr: $q = z + iq_0$

Vztah komplexního parametru a geometrických parametrů svazku

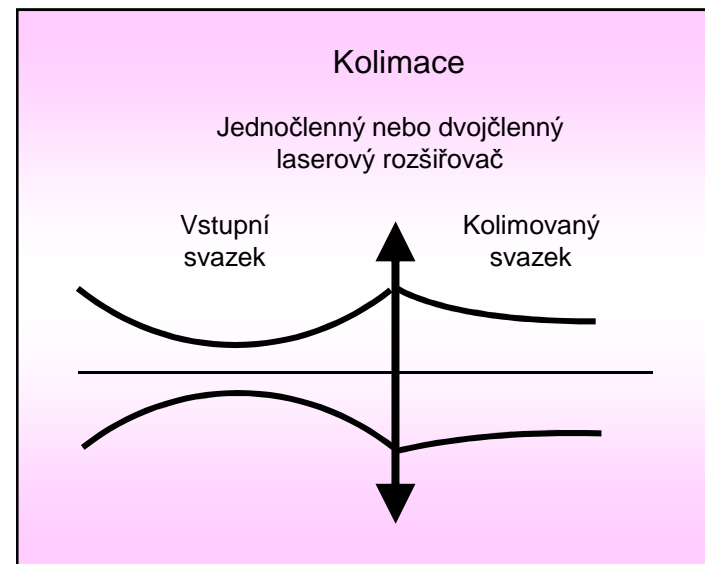
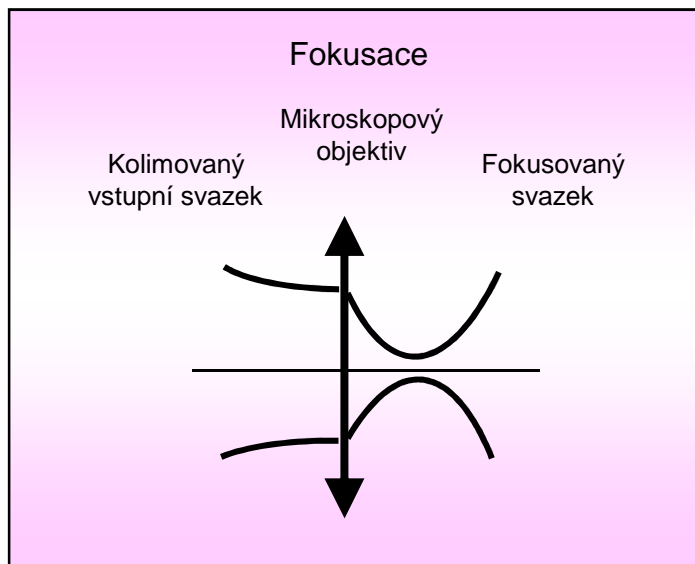
$$\frac{1}{q} = \frac{1}{R} - i \frac{2}{kw^2}$$

Maticová transformace komplexního parametru

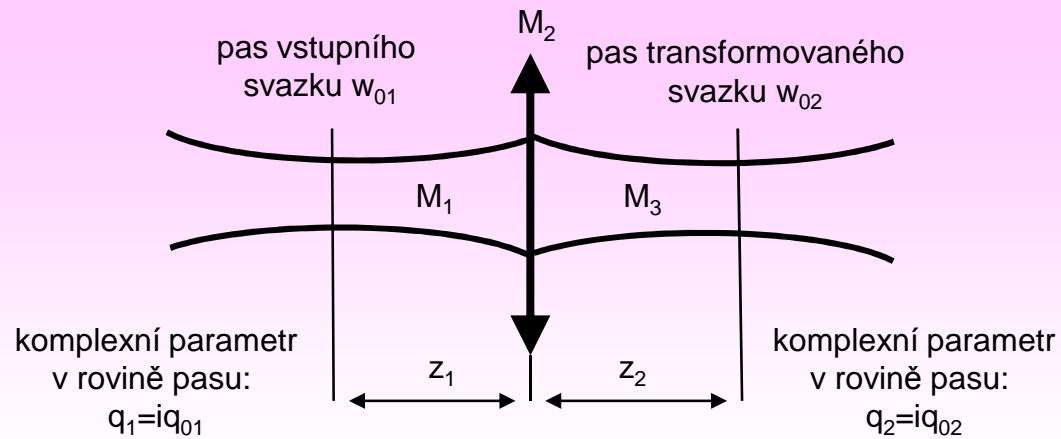


$$q_2 = \frac{Aq_1 + B}{Cq_1 + D}$$

Typy transformace gaussovského svazku



Transformace gaussovského svazku čočkou



Maticová transformace mezi rovinami pasu:

$$M \equiv \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = M_3 M_2 M_1$$

Vyjádření komplexního parametru transformovaného svazku v rovině pasu

$$q_2 = iq_{02} \quad \text{X} \quad q_2 = \frac{ACq_{01}^2 + BD + iq_{01}}{C^2q_{01}^2 + D^2}$$

Porovnání reálné a imaginární části:

Reálná část \longrightarrow určuje polohu pasu transformovaného svazku

Imaginární část \longrightarrow určuje poloměr pasu transformovaného svazku

Výsledky transformace svazku čočkou

Poloha pasu transformovaného svazku

$$1 + \frac{z_1}{f'} = \left[\left(1 + \frac{z_1}{f'} \right)^2 + \left(\frac{q_{01}}{f'} \right)^2 \right] \left(1 - \frac{z_2}{f'} \right)$$

Poloha pasu transformovaného svazku z_2 je určena polohou pasu vstupního svazku z_1 a jeho Rayleighovou vzdáleností q_{01} .

Poloměr pasu transformovaného svazku

$$w_{01} = w_{02} \left[\left(1 + \frac{z_1}{f'} \right)^2 + \left(\frac{q_{01}}{f'} \right)^2 \right]^{1/2}$$

Poloměr pasu transformovaného svazku w_{02} je určen poloměrem pasu vstupního svazku w_{01} a jeho polohou z_1 .

Zápis transformace pomocí příčného měřítka „m“

Přeznačení polohy pasu:

Poloha pasu vstupního svazku vzhledem k předmětovému ohniskovému bodu: $l_1 = f' + z_1$

Poloha pasu výstupního svazku vzhledem k obrazovému ohniskovému bodu: $l_2 = f' - z_2$

$$w_{02} = m \cdot w_{01}, \quad \theta_2 = \frac{1}{m} \cdot \theta_1, \quad m = \frac{f'}{\sqrt{l_1^2 + q_{01}^2}}$$

$$l_2 = m^2 \cdot l_1$$

Speciální případ:

Pas vstupního svazku je v předmětové ohniskové rovině čočky

$$l_1 = 0, \quad l_2 = 0, \quad m = \frac{f'}{q_{01}}$$

Fokusace a kolimace svazku čočkou

Fokusace svazku

Pas vstupního svazku na čočce: $z_1=0$

$$z_2 = \frac{f'}{1 + \left(\frac{f'}{q_{01}}\right)^2} \quad w_{02} = \frac{w_{01}}{\left[1 + \left(\frac{q_{01}}{f'}\right)^2\right]^{1/2}}$$

Předpoklad dobře kolimovaného vstupního svazku $q_{01} \gg f'$:

$$z_2 \approx f' \quad w_{02} = \frac{f' \lambda}{w_{01} \pi} = f' \theta_{01}$$

Pro dosažení malé stopy fokusovaného svazku je třeba použít objektiv s malou f' (mikroobjektiv) a dostatečně rozšířit vstupní svazek (poloměr pasu fokusovaného svazku je úměrný úhlové divergenci vstupního svazku).

Kolimace svazku

Podmínka pro optimální kolimaci:

$$\frac{dz_2}{dz_1} = 0, \quad \left(\frac{d^2 z_2}{dz_1^2} < 0\right) \rightarrow$$

$$\rightarrow z_1 = -(f' + q_{01})$$

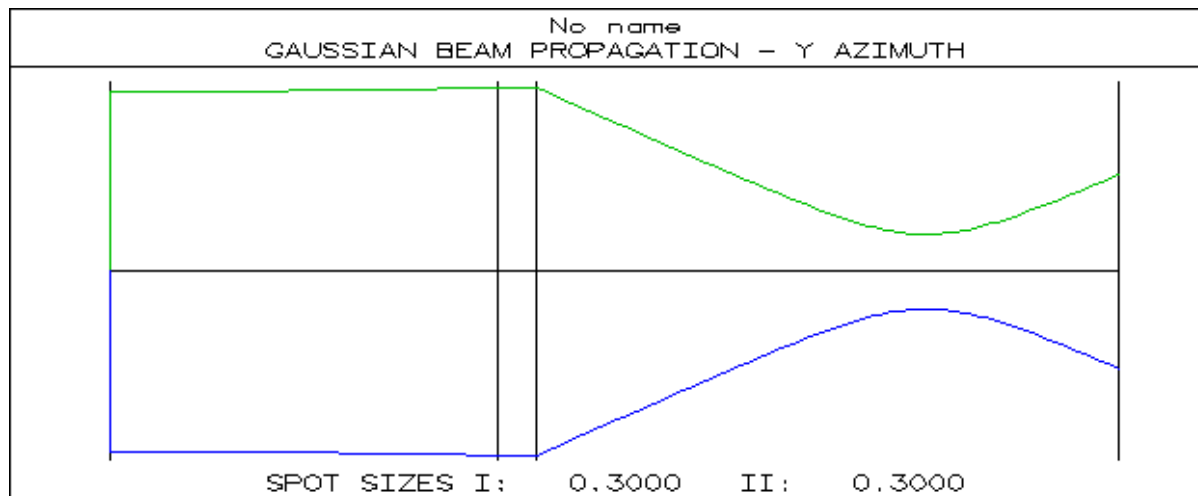
Vstupní svazek s danou Rayleighovou vzdáleností q_{01} je optimálně kolimován čočkou dané ohniskové vzdálenosti f' tehdy, když pas vstupního svazku je ve vzdálenosti $-(f' + q_{01})$ před čočkou.

Fokusace gaussovského svazku v programu OSLO

Gaussian Beam Tracing

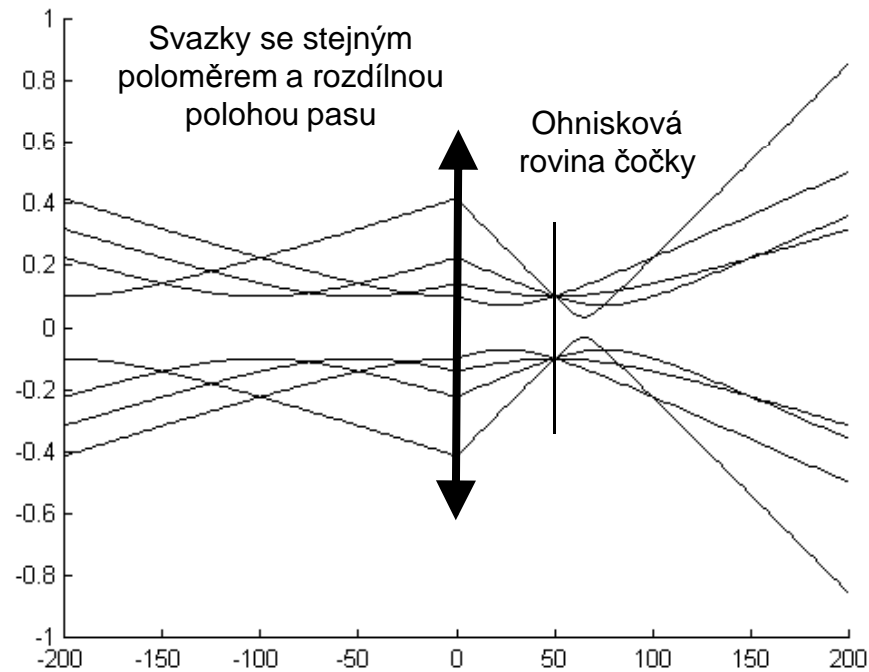
Beam Specification Surface: Beam Evaluation Surface:

	Solution I	Solution II		Solution I	Solution II
Spot size (w) *	<input type="text" value="0.300000"/>	0.300000	Spot size (w)	0.161653	0.161653
Waist ss (w0) *	<input type="text" value="0.300000"/>	0.300000	Waist ss (w0)	0.062336	0.062336
Waist dist (z)	<input type="text" value="0.000000"/>	0.000000	Waist dist (z)	-49.712164	-49.712164
Wvf radius (R)	<input type="text" value="0.000000"/>	0.000000	Wvf radius (R)	-58.395574	-58.395574
Diverg. (rad)	0.000623	0.000623	Diverg. (rad)	0.003000	0.003000
Rayleigh range	481.216112	481.216112	Rayleigh range	20.776696	20.776696
wavelength number of beam		<input type="text" value="1"/>	Evaluation surface shift	<input type="text" value="0.000000"/>	
wavelength		0.587560	Beam meridian:	<input checked="" type="radio"/> y-z	<input type="radio"/> x-z
M-squared		<input type="text" value="1.000000"/>	<input type="button" value="Print beam data in text window"/>		
<input type="checkbox"/> Plot beam spot size			<input checked="" type="radio"/> slider-wheel design		<input type="radio"/> Current graphics window



Transformace gaussovského svazku v prostředí MATLAB

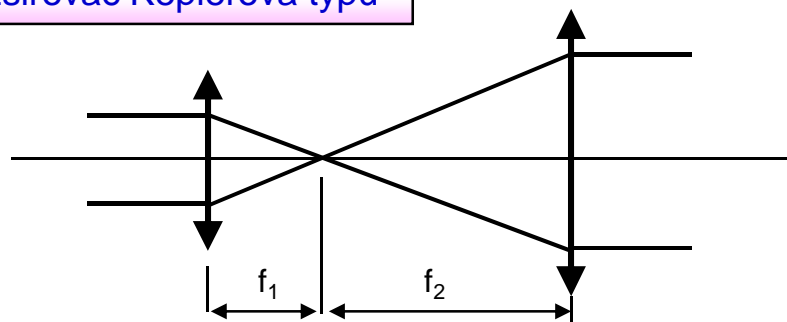
Z vlastnosti Fourierovy transformace, kterou čočka opticky realizuje je zřejmé, že gaussovské svazky, které mají před čočkou stejnou pološířku pasu jsou transformovány tak, že v ohniskové rovině čočky vytvářejí gaussovskou stopu stejné pološířky. Tato vlastnost zůstává zachována pro různé polohy pasu před čočkou.



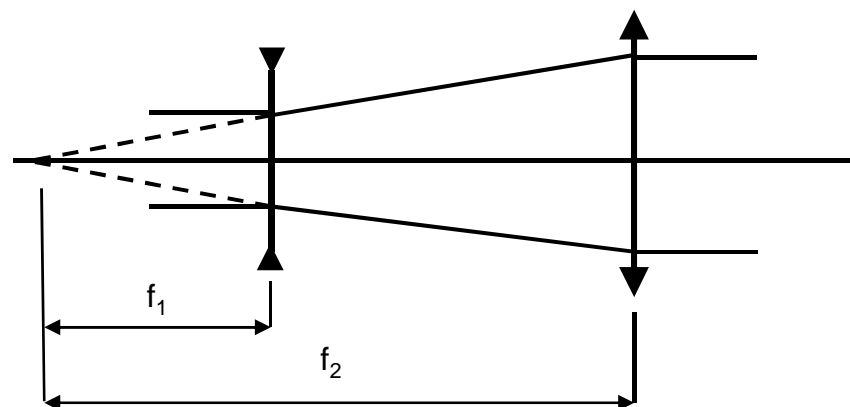
Kolimace svazku dvoučlenným systémem

Pro efektivní kolimaci laserového svazku se používají dvoučlenné optické systémy. Protože požadované zmenšení úhlové divergence je spojeno s rozšířením stopy svazku, říká se těmto systémům laserové rozšiřovače. Jsou konstruovány jako dalekohledové systémy Keplerova nebo Galileova typu. Jejich základním parametrem je zvětšení, které definuje míru rozšíření výstupního svazku.

Rozšiřovač Keplerova typu

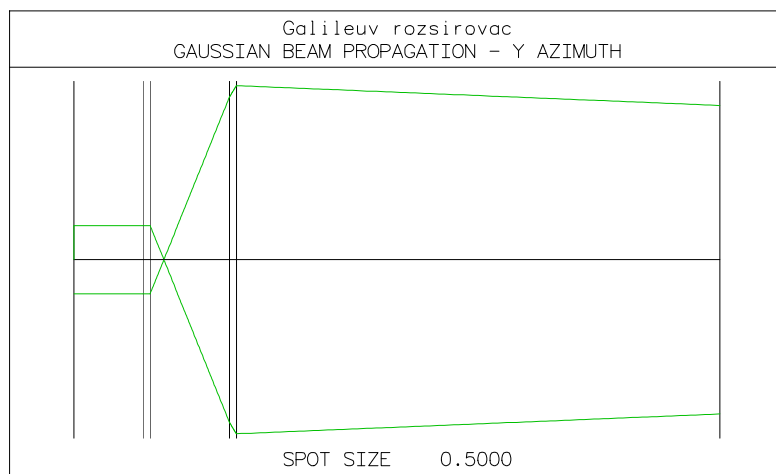


Rozšiřovač Galileova typu

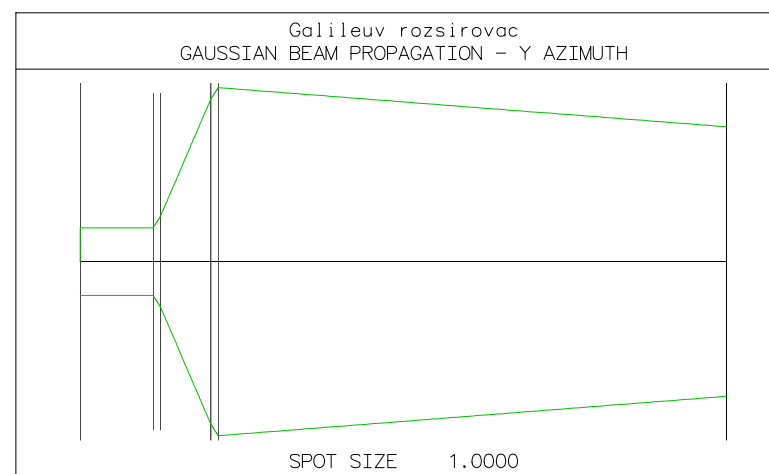


Rozšíření svazku – výpočet v programu OSLO

Rozšiřovač Keplerova typu



Rozšiřovač Galileova typu



Realizace rozšíření laserového svazku

Laserové rozšiřovače firmy Edmund Optics



Běžné typy rozšiřovačů (zvětšení 2x – 20x)

Justovatelné rozšiřovače pro CO₂ laser.
Umožňují kompenzovat rozbíhavost nebo sbíhavost
nekolimovaného vstupního svazku.

Laserové rozšiřovače firmy Meopta Přerov



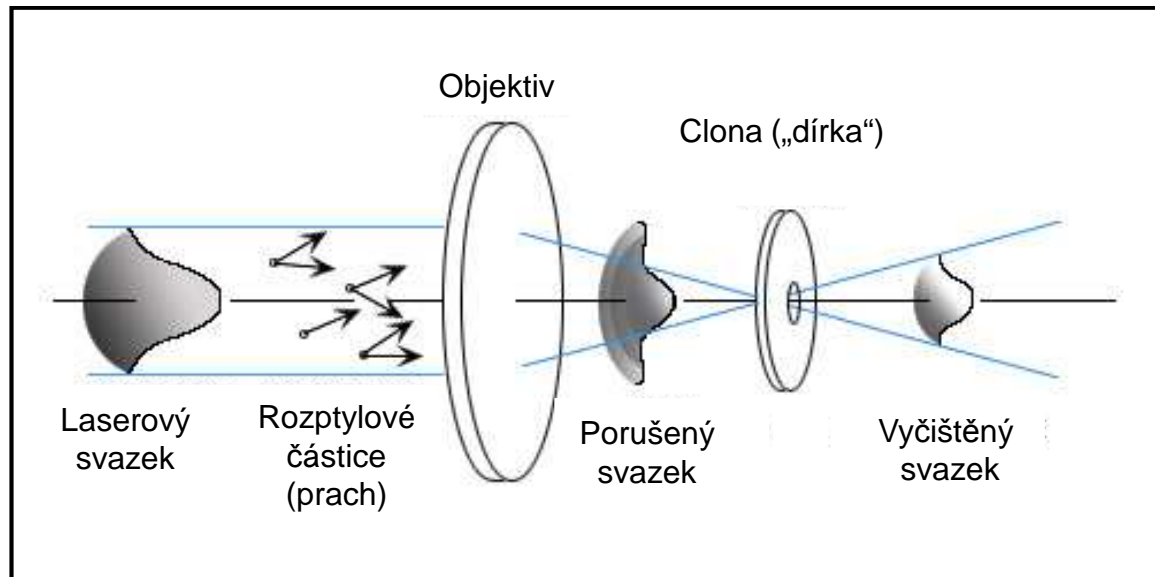
Zvětšení 1.4x, 1.6x, 1.8x a 2x

Prostorová filtrace gaussovského svazku

Prostorová filtrace je metoda, která umožňuje s využitím principů Fourierovské filtrace ovlivnění prostorové struktury elektromagnetického záření. Tato metoda se využívá v zobrazovací optice pro cílené ovlivnění obrazu vytvářeného optickým systémem. Ve svazkové optice lze prostorovou filtraci využít pro „vyčištění“ laserového svazku, jehož intenzitní profil byl narušen náhodnými vlivy (například průchodem rozptylujícím prostředím).

Princip metody:

Porušený svazek je mikroskopovým objektivem fokusován do roviny ve které je umístěna clona s průměrem několika mikrometrů. Struktura, která odpovídá gaussovskému profilu svazku je po fokusaci soustředěna uvnitř otvoru clony, zatímco struktura odpovídající šumu má vysokofrekvenční charakter a je lokalizována daleko od osy svazku a zachycena clonou. Za clonou se tedy šíří svazek s gaussovským profilem zbaveným šumu.

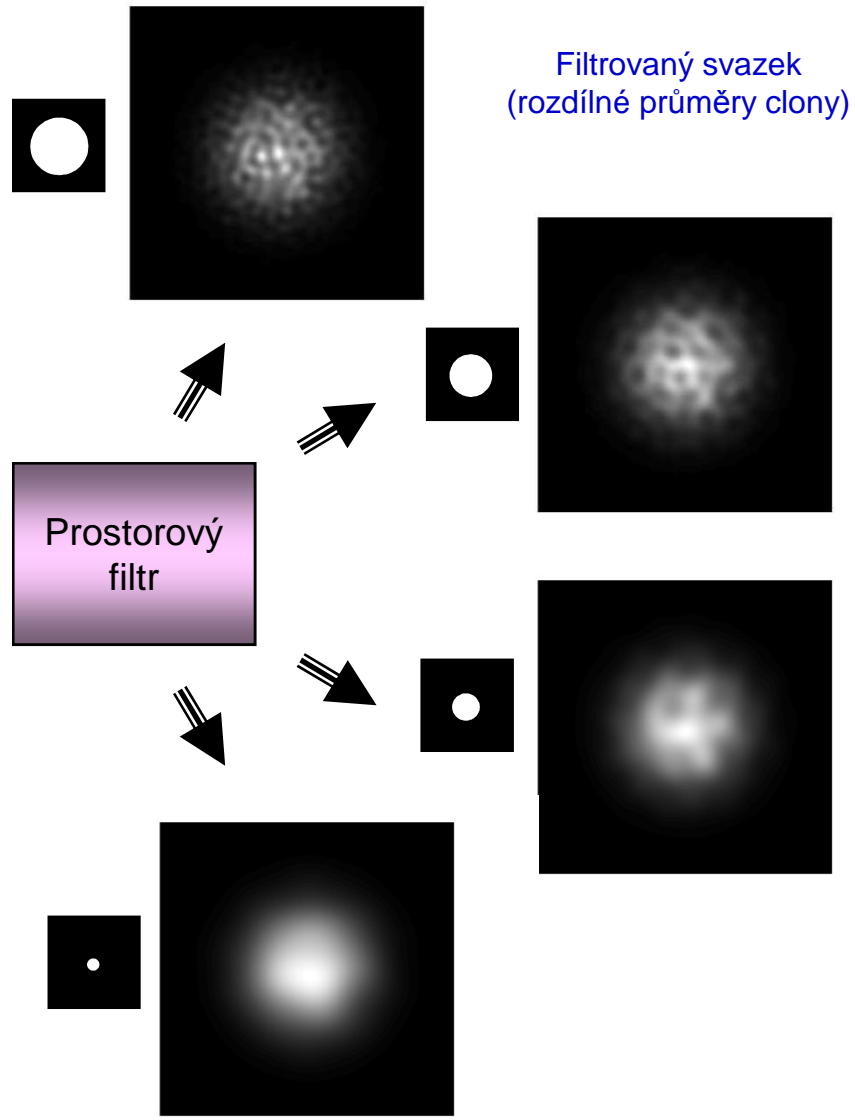
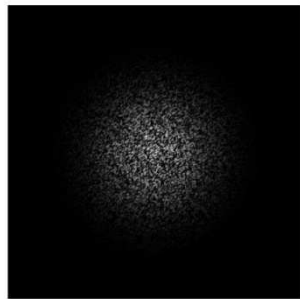


Simulace prostorové filtrace v prostředí MATLAB

Ideální gaussovský svazek



Porušený svazek



Filtrovaný svazek (rozdílné průměry clony)

Realizace prostorové filtrace

Prostorový filtr se dodává jako kompaktní celek, který zahrnuje mikroskopový objektiv a sadu přesně vyrobených clon o různých průměrech. Fokusaný svazek se musí přesně trefit do otvoru clony (její průměr je několik mikrometrů). Aby to bylo justážně zvládnutelné, je clona umístěna na stolku s 3D posuvy.



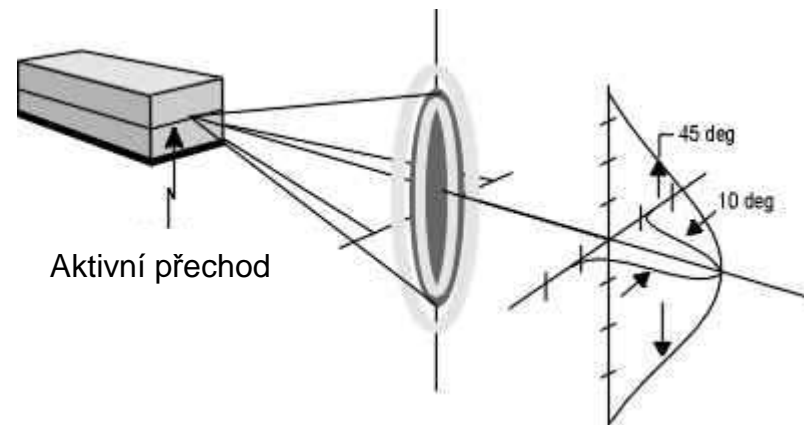
Cena kompaktního 3D prostorového filtru je přibližně 1000 Euro.

Parametry objektivu a clony musejí být vzájemně přizpůsobeny – výpočet je možné provést pomocí demonstračního programu, který je dostupný na webových stránkách firmy Newport:

<http://www.newport.com/OpticalAssistant/SpatialFilterPinhole.aspx>

Svazek laserové diody

Svazek laserové diody má eliptickou stopu a různé úhly rozbíhavosti ve dvou navzájem kolmých rovinách. Navíc je to svazek astigmatický – pasy ve dvou navzájem kolmých rovinách mají rozdílnou polohu. Pro aplikace je nutné svazek symetrizovat a eliminovat astigmatismus.



Úprava svazku

Symetrizace pomocí
anamorfortických hranolů

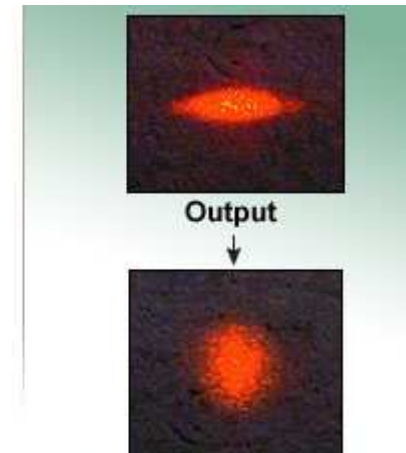
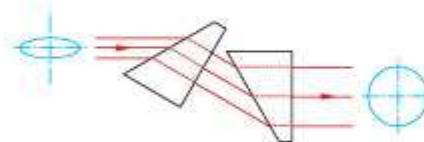
Odstranění astigmatismu
pomocí válcových čoček

Realizace symetrizace svazku laserové diody

- ▶ Transform Elliptical Laser Diode Beams Into Nearly Circular Beams
- ▶ Magnification From 2.0 up to 4.0
- ▶ Available with two Broadband AR Coatings
- ▶ Material: SF11



Pre-Aligned/Mounted



Related Products

Laser Diode Collimation Tubes



Cylindrical Lenses



Laser Diodes

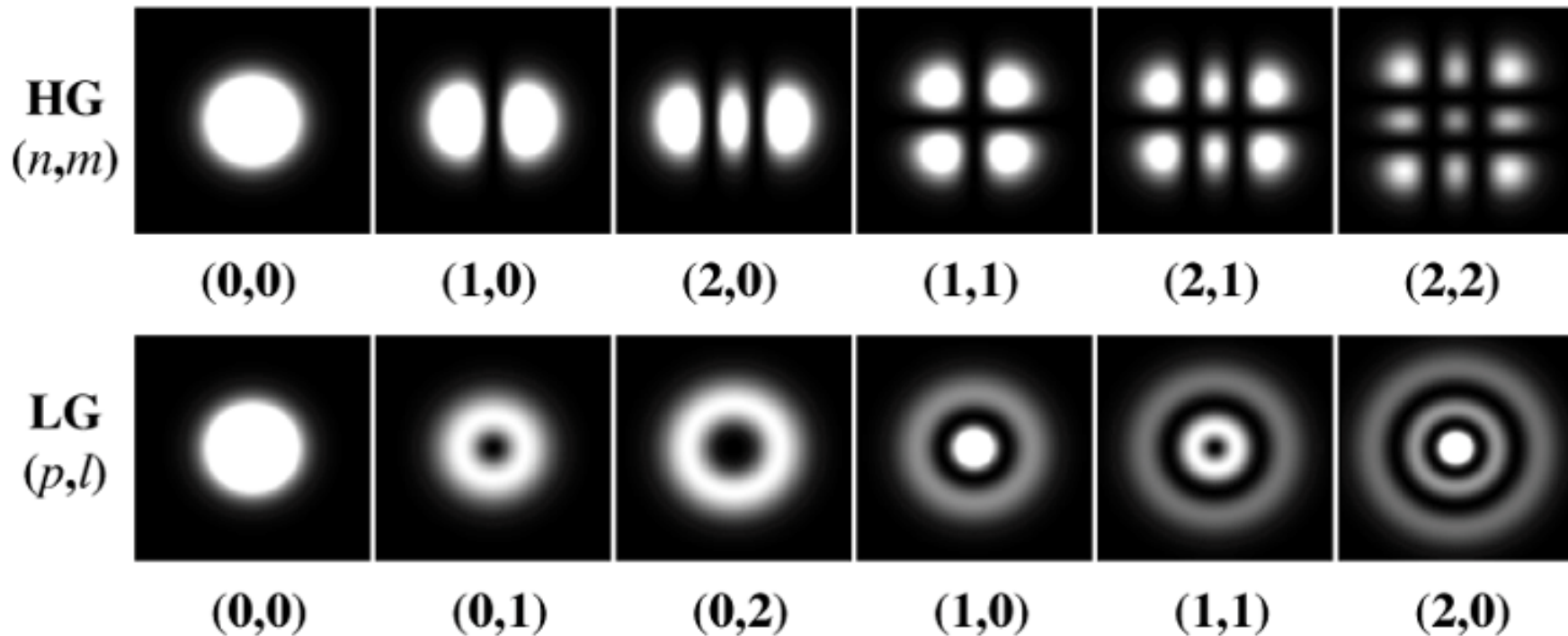


Negaussovské laserové svazky

H-G svazek $U_{n,m}$ vznikne modifikací gaussovského svazku U provedenou pomocí funkcí, které závisí jen na jedné souřadnici kartézského souřadného systému. Dá se ukázat, že tyto funkce jsou Hermiteovy polynomy n -tého a m -tého řádu H_n a H_m .

$$U_{n,m}(x, y, z) = H_n(x)H_m(y)U(x, y, z)$$

Hermiteovské – gaussovské svazky



Laguerreovské – gaussovské svazky

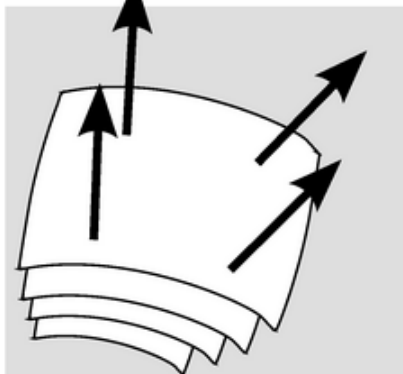
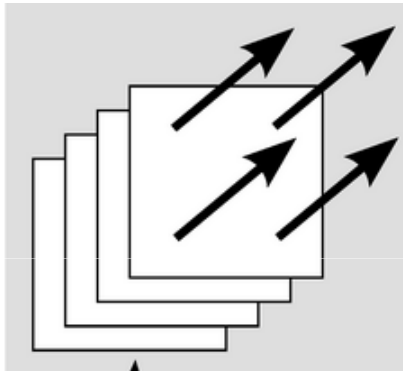
L-G svazek $U_{p,l}$ vznikne modifikací gaussovského svazku U provedenou pomocí funkcí, které závisí jen na jedné souřadnici válcového souřadného systému. Dá se ukázat, že radiální funkce jsou Laguerreovy polynomy p -tého řádu L_p .

$$U_{p,l}(r, \varphi, z) = L_p(r)\exp(il\varphi)U(x, y, z)$$

Vírové laserové svazky

Běžné typy vln

Rovinná vlna



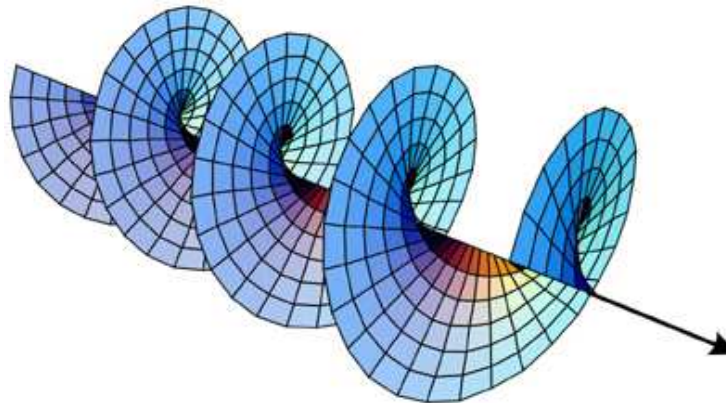
Sférická vlna

Vírové laserové svazky

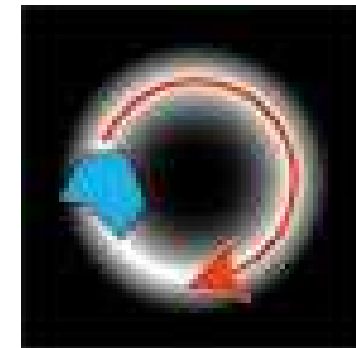
Vírové svazky mají šroubovitý tvar vlnplochy se singularitou (neurčitostí) fáze v místě víru. Neurčitost fáze vynucuje nulovou intenzitu – svazek je v místě víru tmavý. Šroubovitý tvar vlnplochy způsobuje „víření“ elektromagnetické energie, které se projevuje přenosem orbitálního momentu hybnosti na mechanické objekty (částice, která se dostane do svazku začne rotovat kolem jeho osy).

Vírové svazky jsou perspektivní pro přenos informace, užívají se v optických manipulacích, metrologii nebo jako pohon světelných rotorů v mikroelektromechanických systémech.

Vírový svazek



Šroubovitá vlnplocha

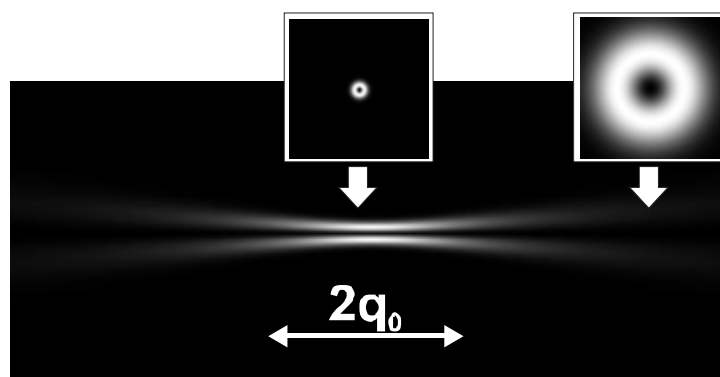


Přenos momentu hybnosti:
částice obíhá kolem osy svazku

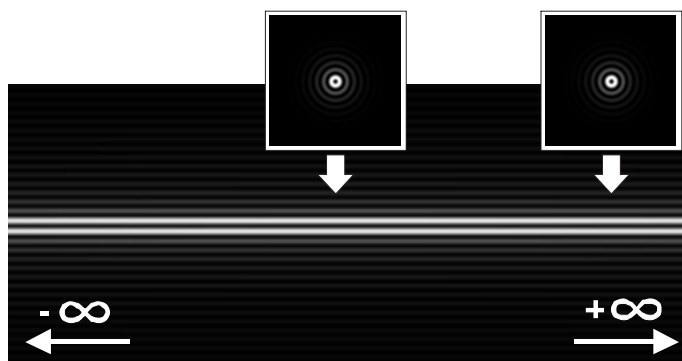
Besselovské svazky

Besselovské svazky jsou označovány za nedifrakční svazky (v ideální představě je jejich stopa neměnná – svazky se nerozbíhají). Při praktické realizaci je možné tuto nerozbíhavost udržet jen v oblasti konečné délky, tu je ale možné měnit geometrií experimentu při zachování příčného rozměru svazku. Pro tyto svazky bylo zavedeno označení pseudo-nedifrakční.

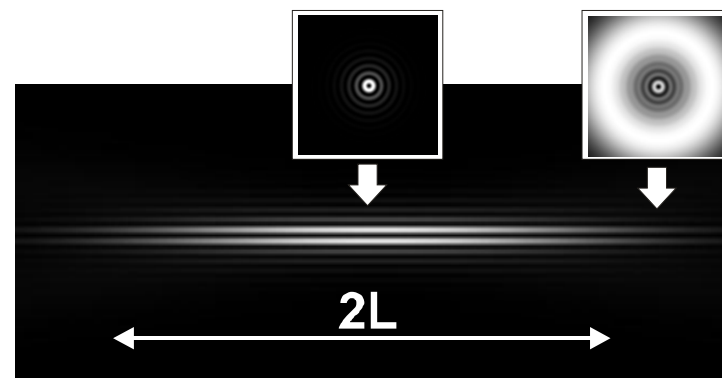
Běžný rozbíhavý svazek



Ideální nedifrakční svazek

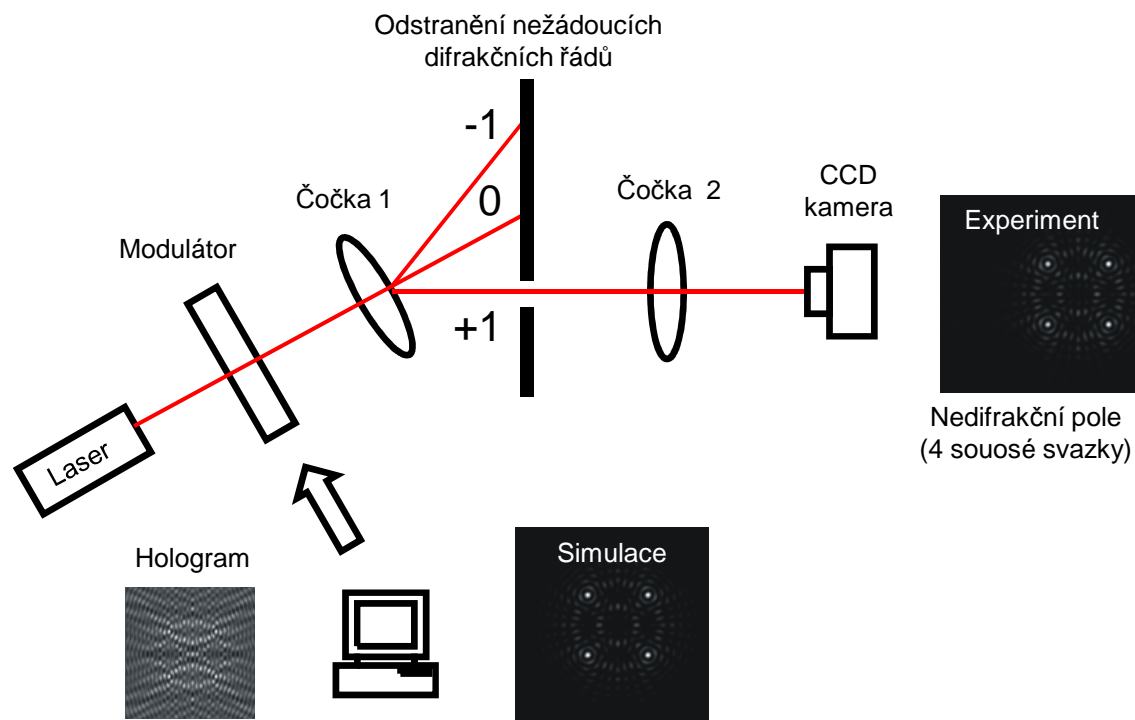


Pseudo-nedifrakční svazek

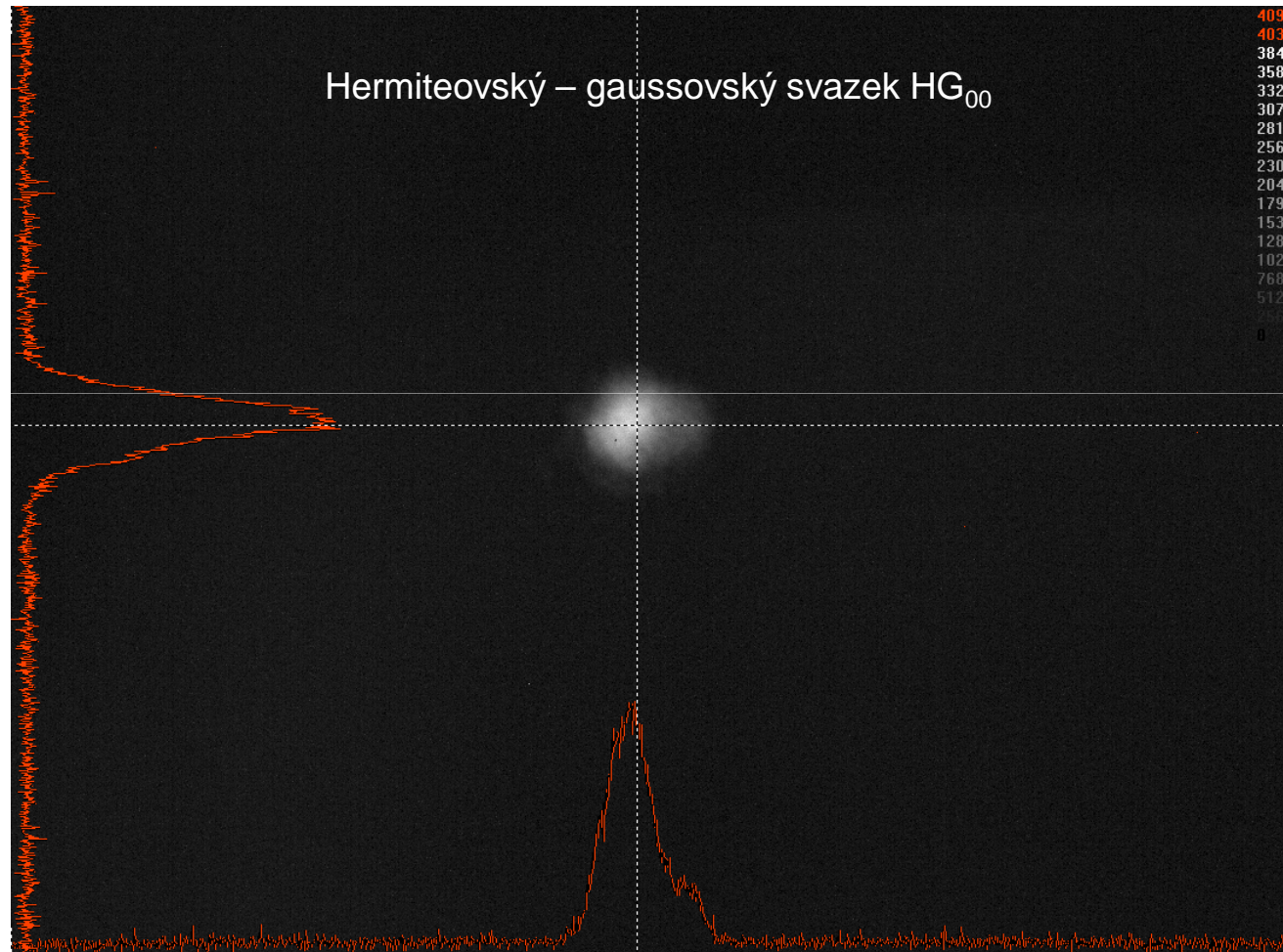


Experimentální demonstrace laserových svazků

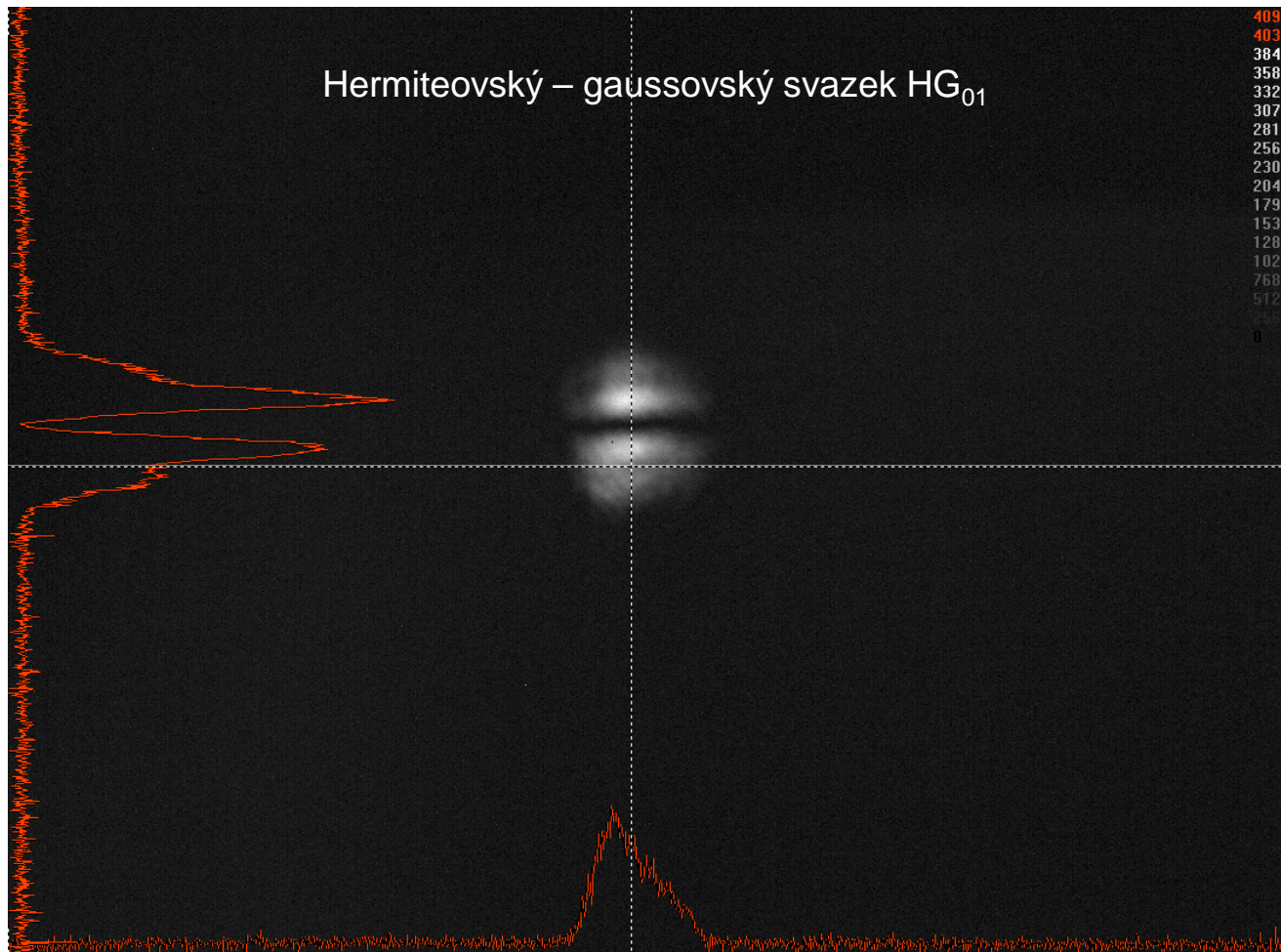
Experimentální sestava využívá svazek He-Ne laseru, který je fokusační optikou navázán do jednomódového vlákna. Tímto způsobem je svazek prostorově filtrován a přiveden do předmětového prostoru kolimační čočky. Kolimovaný svazek prosvětluje amplitudový prostorový modulátor, jehož propustnost je ovládána pomocí PC. Na prostorový modulátor jsou odesílány hologramy, které transformují gaussovský svazek na požadovaný typ negaussovského svazku. Za modulátorem je umístěn Fourierovský optický systém, který umožňuje odstranění nežádoucích difrakčních řádů. Generovaný svazek je zachycen na CCD kameru a analyzován pomocí programu Beam View Analyzer.



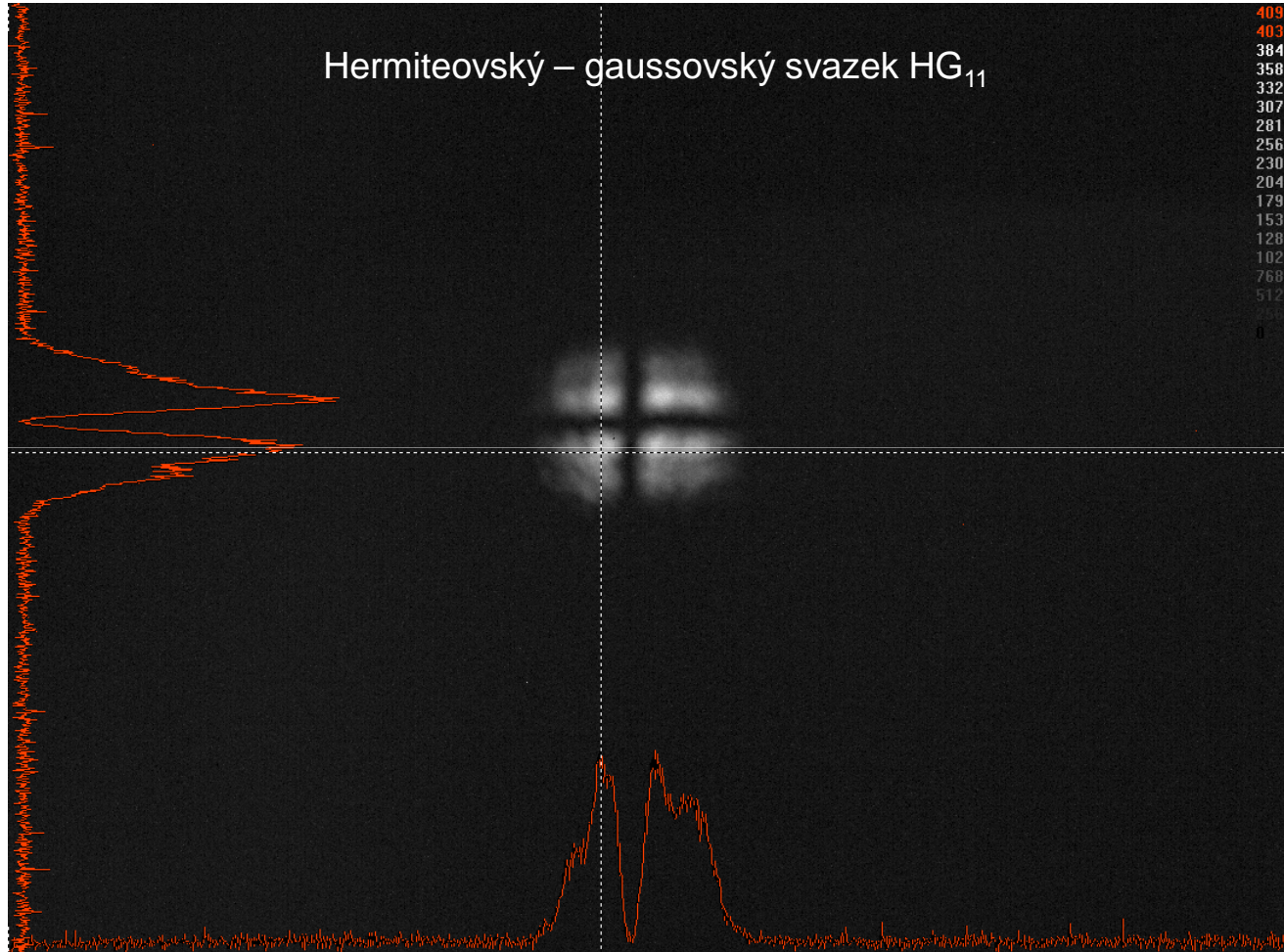
Galerie svazků generovaných pomocí prostorového modulátoru



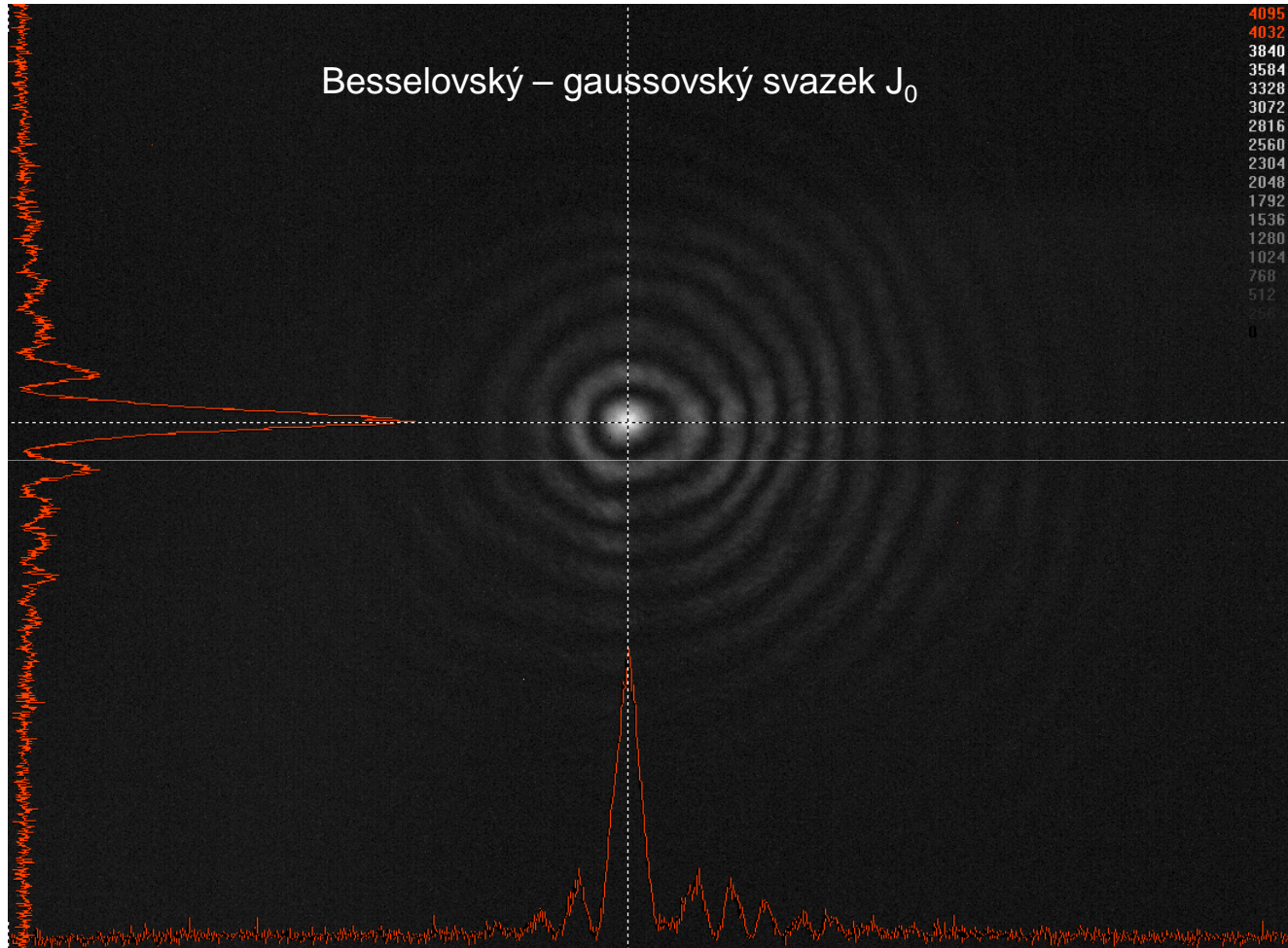
Hermiteovský – gaussovský svazek HG_{01}



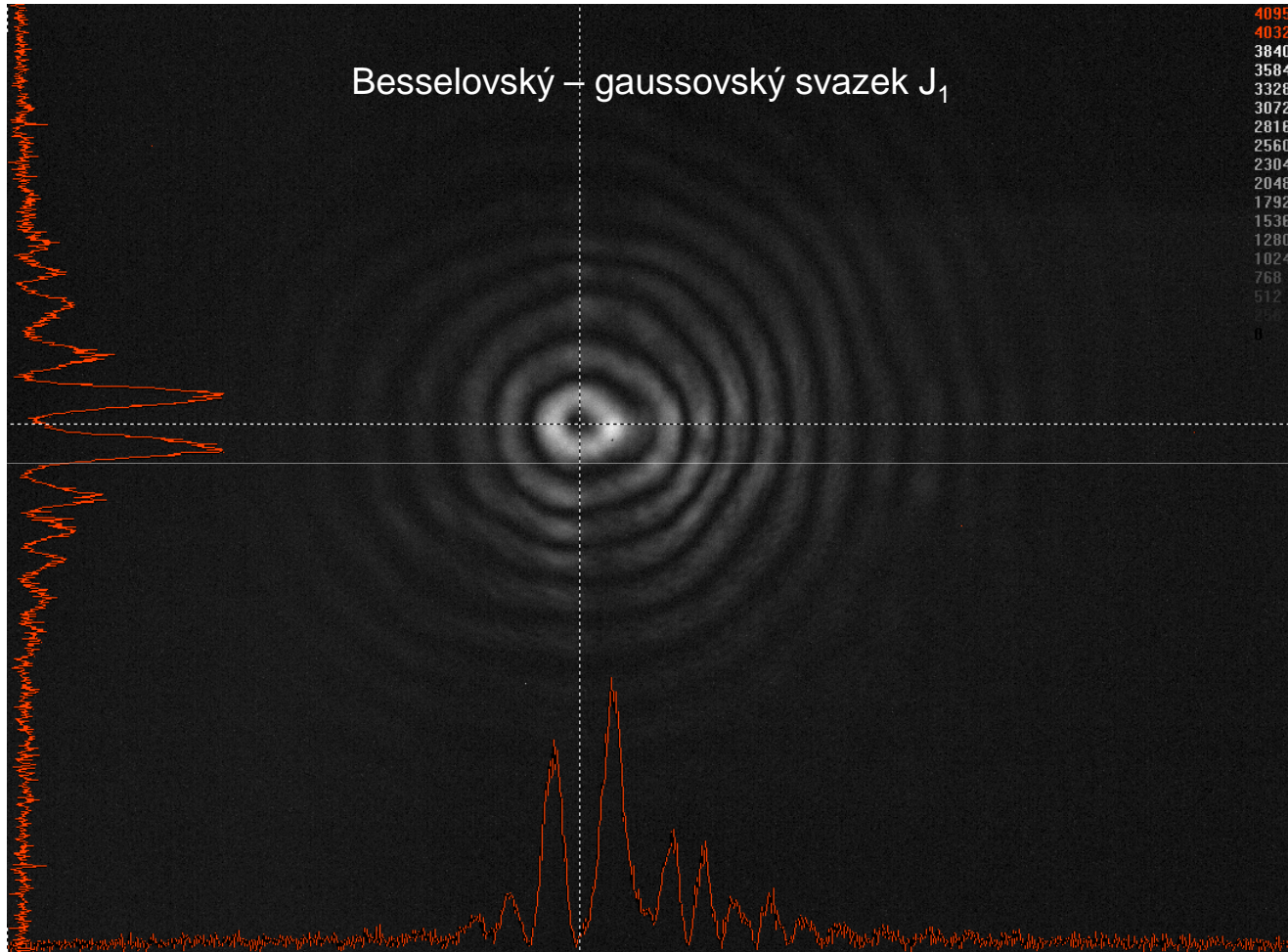
Hermiteovský – gaussovský svazek HG_{11}



Besselovský – gaussovský svazek J_0



Besselovský – gaussovský svazek J_1



Besselovský – gaussovský svazek J_5



Ukázka úloh ke zkoušce z předmětu OPT/SO

Svazek He-Ne laseru (gaussovský svazek, $\lambda=633 \text{ nm}$) má v nejužším místě poloměr $w_0=0.1 \text{ mm}$. Určete jaký bude poloměr svazku ve vzdálenosti 1 m od nejužšího místa.

Určete poloměr stopy do které můžete fokusovat gaussovský laserový svazek o poloměru pasu $w_0=0.5 \text{ mm}$ a vlnové délce $\lambda=488 \text{ nm}$ pomocí spojné čočky o ohniskové vzdálenosti $f=100 \text{ mm}$ (uvažte, že Rayleighova vzdálenost svazku je mnohem větší než f).

Určete Rayleighovu vzdálenost laserového svazku, jestliže víte, že ve vzdálenosti $z=200 \text{ mm}$ od pasu je jeho osová intenzita 5 krát menší než v rovině pasu.

Určete úhlovou divergenci gaussovského svazku, který má frekvenci $f = 4.74 \times 10^{14} \text{ Hz}$ a poloměr pasu $w_0=0.1 \text{ mm}$.

Laser Nd:YAG emituje záření na vlnové délce 1060 nm ve tvaru gaussovského svazku s výkonem 1 W a divergencí $\theta = 1 \text{ mrad}$. Určete pološířku v pase, Rayleighovu vzdálenost, maximální intenzitu a intenzitu na ose ve vzdálenosti 100 cm od pasu.

Gaussovský svazek má ve výstupním okénku laseru pološířku $w = 0.06 \text{ mm}$. Měřením bylo zjištěno, že jeho divergence je $\theta = 5 \text{ mrad}$ a vlnová délka 633 nm . Určete polohu pasu svazku vzhledem k výstupnímu okénku laseru.

Vysvětlete jak se mění poloměr křivosti vlnoplochy gaussovského svazku při jeho volném šíření. Určete jeho nejmenší hodnotu pro svazek Nd:YAG laseru s vlnovou délkou 1060 nm a poloměrem pasu $w_0 = 0.1 \text{ mm}$.

Zadání úloh řešených pomocí programu OSLO

Úloha I

Svazek laseru Verdi V2, který má vlnovou délku 532 nm a gaussovský amplitudový profil s pološířkou pasu $w_{01} = 0.1$ mm, má být pomocí jednoduché čočky rozšířen tak, aby měl poloměr pasu $w_{02} = 0.4$ mm.

Určete potřebnou ohniskovou vzdálenost čočky, která požadovanou transformaci svazku umožní.

Polohu pasu vstupního svazku vzhledem k čočce zvolte tak, aby podélné rozměry experimentální sestavy byly co nejmenší.

Funkčnost návrhu ověřte simulací transformace svazku v programu OSLO. Proveďte vlastní výpočet Rayleighovy vzdálenosti a úhlové divergence transformovaného svazku a výsledky porovnejte s výstupy programu OSLO.

Úloha II

Gaussovský svazek He-Ne laseru, který má vlnovou délku 632 nm a pološířku pasu $w_{01} = 0.15$ mm, má být fokusován tak, aby pološířka jeho pasu byla $w_{02} = 5$ μm . Navrhněte optický systém umožňující fokusaci svazku. K použití jsou dva mikroskopové objektivy o ohniskových vzdálenostech 10 mm a 15 mm a sada čoček o ohniskových vzdálenostech 100 mm, 150 mm, 200 mm, 250 mm, 300 mm, 350 mm a 400 mm.

Funkčnost návrhu ověřte simulací fokusace svazku v programu OSLO.

Zápočtové úlohy

Úloha I

Pomocí výpočetního programu OSLO proveďte simulaci transformace gaussovského laserového svazku pro následující parametry vstupního svazku a čočky:

Konstrukční parametry čočky

Poloměry křivosti [mm]	Tloušťka [mm]	Ind. lomu	Optický průměr
0	10	1	20
-50		1.5	20
		1	

Vstupní svazek

Vlnová délka 632 nm

Polohy pasu před čočkou 100 mm, 200 mm, 300 mm, 400 mm

Pološířka pasu 0.2 mm

Proveďte grafické znázornění stopy vstupního a transformovaného svazku

a určete pološířku svazku v obrazové ohniskové rovině čočky pro jednotlivé polohy pasu před čočkou.

Diskutujte závislost geometrických parametrů transformovaného svazku na poloze pasu vstupního svazku.

Grafické a výpočetní výstupy programu OSLO uložte a k řešení úlohy připravte protokol v elektronické formě.

Úloha II

Pomocí výpočetního programu OSLO proveďte simulaci fokusace gaussovského laserového svazku, který má vlnovou délku 632 nm a pološířku pasu 0.3 mm. Svazek je fokusován plankonvexní čočkou vyrobenou ze skla, které má pro danou vlnovou délku index lomu 1.5. Svazek na čočku dopadá tak, že jeho pas je umístěn v rovině čočky. Měňte poloměr křivosti čočky tak, aby její ohnisková vzdálenost postupně nabývala hodnot 20 mm, 40 mm a 60 mm a pro jednotlivé případy určete poloměr pasu transformovaného svazku a jeho divergenci.

Proveďte grafické znázornění stopy transformovaného svazku. Výsledky programu OSLO porovnejte s vlastním výpočtem provedeným pomocí vztahů, které platí dostatečně přesně pro předpoklad dobře kolimovaného svazku (svazek, který má Rayleighovu vzdálenost mnohem větší než je ohnisková vzdálenost čočky).

Diskutujte soulad vlastních výsledků s výstupy programu OSLO.

Grafické a výpočetní výstupy programu OSLO uložte a k řešení úlohy připravte protokol v elektronické formě.

Úloha III

Pomocí výpočetního programu OSLO proveďte rozšíření laserového svazku He-Ne laseru s vlnovou délkou 632 nm, který má pološířku pasu 0.1 mm. Laserový rozšiřovač má zvětšení 3x a oba členy jsou spojně. Grafické a výpočetní výstupy programu OSLO uložte a k řešení úlohy připravte protokol v elektronické formě.

Úloha IV

Pomocí výpočetního programu OSLO proveďte rozšíření laserového svazku He-Ne laseru s vlnovou délkou 632 nm, který má pološířku pasu 0.1 mm. Laserový rozšiřovač má zvětšení 3x a oba je tvořen spojným a rozptylným členem. Grafické a výpočetní výstupy programu OSLO uložte a k řešení úlohy připravte protokol v elektronické formě.

Úloha V

Pomocí výpočetního programu OSLO proveďte simulaci kolimace gaussovského laserového svazku jednoduchou čočkou pro následující parametry vstupního svazku a čočky:

Konstrukční parametry čočky

Poloměry křivosti [mm]	Tloušťka [mm]	Ind. lomu	Optický průměr
0	10	1	20
-50		1.5	20
		1	

Vstupní svazek

Vlnová délka 632 nm

Pološířka pasu 0.2 mm

Grafické a výpočetní výstupy programu OSLO uložte a k řešení úlohy připravte protokol v elektronické formě.