

# **Interferometry a vlastnosti laserového záření**

**Cíl úlohy:** Získání zkušeností při konstrukci různých typů laserových interferometrů, studium jejich vlastností a možností využití.

## **Úkol měření**

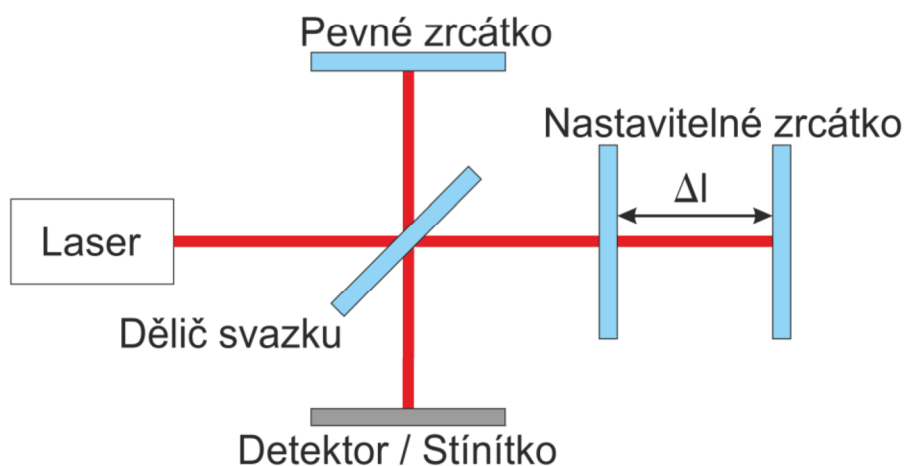
- 1) Sestavte Michelsonův interferometr v konfiguraci s rovinnou vlnou i sférickou vlnou
- 2) Změřte pro různé posunutí zrcátka počet proužků (změn). Určete vlnovou délku laseru.
- 3) Sestavte Mach-Zehnderův interferometr a zaznamenejte maximální dosaženou vizibilitu interferenčního pole.
- 4) Zdůvodněte rozdíly ve fázové stabilitě zkonstruovaných interferometrů.

## **Teoretický základ řešení úlohy**

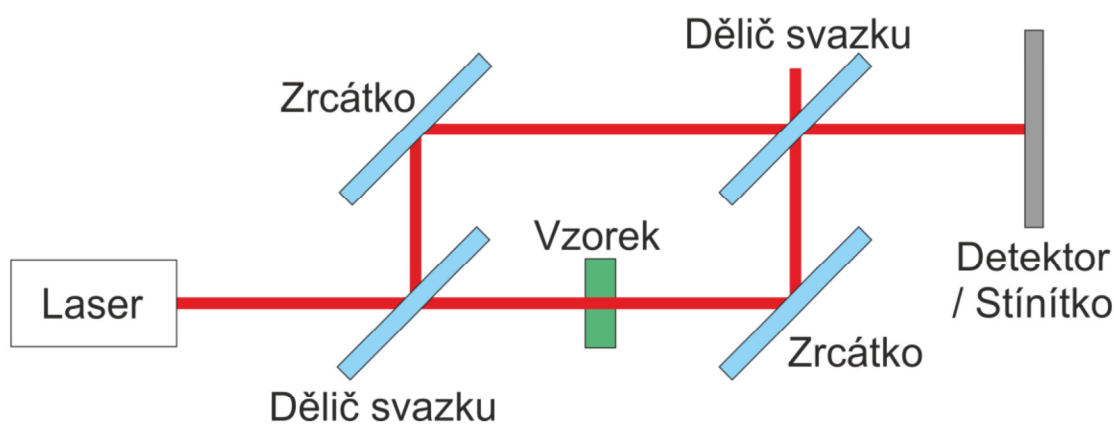
Vyskytují-li se ve stejném prostoru a čase současně dvě (nebo více) optických vln, dochází k interferenci světla, kdy je výsledná vlnová funkce součtem vlnových funkcí jednotlivých vln. Tento superpoziční princip je důsledkem linearit vlnové rovnice. Princip superpozice platí pro komplexní amplitudy optických vln (nikoli pro jejich intenzity) a důležitou roli tak hraje jejich fáze. Optické interferometry jsou přístroje pro velmi přesná měření, jejichž princip je založen na interferenci světla. Díky velmi krátké vlnové délce světla na úrovni stovek nanometrů lze při interferenci rozlišit extrémně malé změny veličin jako jsou délka, index lomu, a nepřímo i celou řadu dalších veličin. Interferenční obrazec může být navíc makroskopický a fázové změny na úrovni zlomku % lze jednoduše převést na posuv proužků např. na úrovni milimetrů i větší. Interferometry se dnes používají k měření délek (interferenční komparátory), k studování různých povrchů, k měření tlaku a teploty plynů nebo plazmatu, k určení indexů lomu u plynů a kapalin (interferenční refraktometry), k určení struktury spektrálních čar (interferenční spektroskopy), k měření elektrického a magnetického pole, k měření rychlosti otáčení, k měření úhlového průměru hvězd a jako detekce gravitačních vln a k mnoha dalším měřením.

Interferometrické měření je založeno na detekci fázových rozdílů, které se projeví při superpozici dvou nebo více vln ve výsledné intenzitě interferenčního pole. Výsledná intenzita není obecně součtem intenzit jednotlivých svazků, důvodem tohoto rozdílu je právě interference mezi vlnami.

Cílem této úlohy je seznámit se se základními principy interference světla a využitím dvousvazkové interference pro měření některých veličin pomocí interferometrů. Interferometry pro měření můžeme dělit například podle počtu interferujících vln na dvousvazkové a vícesvazkové interferometry. Nejznámějšími dvousvazkovými interferometry jsou Michelsonův interferometr (obrázek 1) a Mach-Zehnderův interferometr (obrázek 2).



Obrázek 1: Schéma Michelsonova interferometru



Obrázek 2: Schéma Mach-Zehnderova interferometru

Důležitým parametrem optického záření je jeho koherence. Termín *koherence* záření je často užíván v souvislosti se dvěma krajními případy, které nastávají při interferenci reálných elektromagnetických vln:

- 1) o koherentním záření se mluví v případě, že fázový rozdíl interferujících vln v daném bodu prostoru zůstává konstantní v čase;
- 2) interferující vlny, jejichž fázový rozdíl se v daném bodu prostoru nepravidelně a dostatečně rychle mění, jsou označovány jako nekoherentní;

V obecném případě ovšem nenastává ani jedna z těchto situací. Pro matematicky popis interference dvou rovinných vln se zavádí *komplexní stupeň koherence*. Intenzita záření na detektoru závisí na intenzitě rovinných vln a stupni koherence:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \operatorname{Re} \gamma_{12}(\tau) \quad (1)$$

$$\gamma_{12}(\tau) = \frac{\langle E_1(t + \tau) E_2^*(t) \rangle}{\sqrt{\langle |E_1|^2 \rangle \langle |E_2|^2 \rangle}} \quad (2)$$

Pro plně koherentní záření  $\gamma_{12} = 1$ , pro nekoherentní záření  $\gamma_{12} = 0$ . Komplexní stupeň koherence je kvalitativní parametr záření, průběh funkce  $\gamma_{12}(\tau)$  plně určuje chování světla při interferenci.

Zdroj světla pak taky charakterizujeme z hlediska prostorového šíření a z hlediska časové stability.

**Časová koherence** nám charakterizuje korelace vlny ve dvou různých časech, jinak řečeno jak dobře vlna interferuje sama ze sebou. Jako prakticky parametr se zavádí *koherentní délka*, je to číslo, které udává vzdálenost od zdroje, dokdy si záření udrží jistý stupeň koherence, tj do kdy je pozorovaná interference- u částečně koherentního zdroje od jisté délky interference už není pozorovatelná.

**Prostorová koherence** nám udává korelace vlny ve dvou různých místech, říká nám jak uniformní je vlna v prostoru. Její parametrem je koherentní plocha, je to zjednodušeně řečeno plocha, na které na stínítku pozorujeme interferenci. Pro podrobnější vyklad teorie koherence vyhledejte v literatuře (např. M.Born, E.Wolf - Principles of Optics, E. Hecht, A. Zajac – Optics...).

Laserové zdroje světla jsou zejména díky vysoké míře koherence emitovaného záření s výhodou využívány v optických interferometrických měřicích systémech.

**Délku koherence** laserového záření je možné experimentálně měřit obvykle dvěma způsoby.

První způsob je založen na měření *vizibility* interference záření:

$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (3)$$

kde  $I_{max}$ ,  $I_{min}$  je maximální resp. minimální intenzita interferenčního pole. Za předpokladu, že intenzita interferujících vln je v daném bodu prostoru stejná a za předpokladu, že rozdíl optických drah interferujících paprsků je nulový, je hodnota vizibility ekvivalentní stupni koherence laserového záření

$$V = \gamma_{12}(0) \quad (4)$$

Při měnění délky jednoho ramene interferometru měníme časový posun mezi částmi vlny, které byly rozděleny na dělicí kostce. Měřením vizibility pro jednotlivé posuny dostaneme tvar intenzity laserového záření. Lze ukázat, že koherentní délku laserového záření je možno definovat jako rozdíl optických drah dvousvazkového interferometru, při němž vizibilita interferenčního pole klesne na poloviční hodnotu.

Druhý způsob měření koherence spočívá ve využití souvislosti koherentní délky  $L_{coh}$  se šířkou spektrální čáry záření laseru  $\Delta\nu$ ,

$$L_{coh} = \frac{c}{\Delta\nu} \quad (5)$$

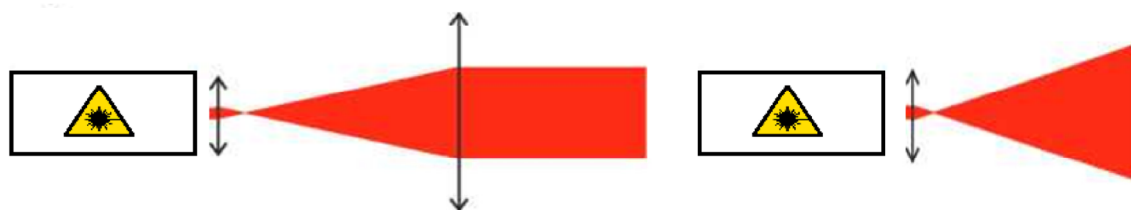
kde  $c$  je rychlost světla ve vakuu. Koherentní délka záření se vypočte z naměřené spektrální šířky daného laseru.

Plynové He-Ne lasery mají v mnoho frekvenčním režimu obvykle koherentní délku  $\approx 0,1$  m. Při jednofrekvenčním režimu (jeden podélný mód) může koherentní délka plynového laseru přesáhnout desítky kilometrů. Ve srovnání s plynovými lasery je koherentní délka pevnolátkových a polovodičových laserů obvykle menší.

K záznamu interferenčního obrazce používá CCD kamera nebo stínítko. Na kameře je důležité správné nastavení ovladačích prvků. Na kameře je možné nastavit zesílení, gama křivku a počet snímků, které bude kamera integrovat. Hlavním problémem je vyhnout se saturaci kamery intenzivním laserovým světlem, proto je žádoucí použít zeslabující filtry a vhodné nastavení (minimální zesílení, jednosnímková integrace...). Při správných hodnotách lze získat černobílý snímek se záznamem interferogramu, který je potřeba relevantně vyhodnotit. Pro zpracování jde využít Matlab, pro základní představu o hodnotách je pro potřeby úlohy k použití ImageGrab a ImageTool. Dbejte na vhodné podmínky experimentu dle bodu 2, jako je konstantní osvětlení okolí po dobu trvání experimentu.

## Postup měření

1. Sestavte Michelsonův interferometr (obrázku 1) v konfiguraci s rovinnou vlnou i sférickou vlnou podle obrázku 3. Jedno zrcadlo umístěte na mikrometrický šroub, aby bylo možné měřit délku ramene interferometru.



Obrázek 3: Uspořádání interferometru s rovinnou vlnou (vlevo) a sférickou vlnou (vpravo).

2. Odhadněte koherentní délku a spektrální šířku záření použitého He-Ne laseru zavedením dráhového rozdílu do ramen interferometru.

3. Určete vlnovou délku laseru. Jemným posuvem zrcadla se změní i interferenční obrazec tak, že se maxima postupně posunou do původní pozice minim a naopak. Pokud se pomalým posunem pohyblivého zrcadla pomocí mikrometrického posuvu o vzdálenost  $d$  posune maximum o  $N$  period, platí:

$$\lambda = \frac{2d}{N} \quad (6)$$

4. Sestavte Mach-Zehnderův interferometr podle obrázků 2. Diskusi vlastností a možnosti použití jednotlivých sestavených interferometrů.

## Reference:

- [1] Tolar, J. Vlnění, optika a atomová fyzika [online]. [cit. 10. srpna 2023]. Dostupné z: <http://physics.fjfi.cvut.cz/files/predmety/02VOAF/VOAF2014.pdf>
- [2] Saleh E. A. and Teich Malvin C., "Fundamentals of photonics," Wiley-Interscience, New York (2007).

- [3] Born M. and Wolf E., "Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light," Cambridge University Press (1997).
- [4] Hecht E. and Zajac. A. "Optics," Addison Wesley Publishing Company (1997).
- [5] Komrska, J. Difrakce [online]. [cit. 10. srpna 2023]. Dostupné z: <http://physics.fme.vutbr.cz/~komrska/Difrakce/KapD04.pdf>
- [6] Úloha č.3 – Interferometry a vlastnosti laserového záření [online]. [cit. 15.srpna 2023]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/36333823-Uloha-c-3-interferometry-a-vlastnosti-laseroveho-zareni.html>