

Úloha č. 3: Měření koherenční délky He-Ne laseru

Úvod

Postupují-li prostorem současně dvě světelné vlny, které se skládají ve výsledné vlnění tak, že v některých místech se intenzita světla trvale zesílí nebo zeslabí, pozorujeme *interferenční jev*. Základní podmínkou vzniku interferenčního jevu je skládání *koherentních* vln. Koherentní vlny jsou vlny monochromatické, které splňují následující podmínky koherence:

- mají stejnou frekvenci (vlnovodu délku),
- mají rozdíl fází časově stálý,
- jsou polarizovány ve stejné polarizační rovině.

Při skládání dvou koherentních vln o různých intenzitách světla I_1 a I_2 lze výslednou intenzitu I světla při jejich interferenci popsat vztahem- *interferenčním zákonem* -

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi_1 - \varphi_2), \quad (1)$$

ze kterého je patrna závislost výsledné intenzity I na fázovém rozdílu $\varphi_1 - \varphi_2$ mezi interferujícími vlnami.

Důležitým parametrem, který popisuje viditelnost interferenčního obrazu, tj. vzájemné rozlišení míst s maximální a minimální intenzitou, je kontrast V (viditelnost) interferenčního obrazu definovaný relací

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (2)$$

což při uplatnění vztahu (1) dává

$$V = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2}. \quad (3)$$

Pokud tedy bude probíhat interference vln o stejných intenzitách $I_0 = I_1 = I_2$, interferenční zákon bude mít tvar

$$I = 2I_0 [1 + \cos(\varphi_1 - \varphi_2)] \quad (4)$$

a kontrast interferenčního obrazu bude maximální, tj. roven jedné ($V=1$), což znamená maximální viditelnost interferenčního jevu.

Výše uvedený přístup k výkladu interferenčních jevů pracuje s monochromatickými vlnami, které jsou však matematickou idealizací, neboť monochromatická vlna je vlna vyzařovaná zdrojem po časově neomezenou dobu, tj. vlna nekonečná v čase. Světelné zdroje však vyzařují vlny po časově omezenou dobu, vázanou na mechanismus vyzařování (např. přechody elektronů v systému energetických hladin atomu), tj. vlny časově omezené. Označíme-li Δt dobu vyzařování

(střední dobu života), plyne z Heisenbergovy relace neurčitosti $\Delta t \Delta E \geq h$ při zavedení neurčitosti energie $\Delta E = h \Delta \nu$ vzájemná relace mezi Δt a $\Delta \nu$

$$\Delta t \propto \frac{1}{\Delta \nu} . \quad (5)$$

Dráha, kterou urazí světlo za dobu Δt , vázanou s tzv. koherenčním časem τ_c , se označuje jako koherenční délka l_c a při vzájemné relaci $\nu = c/\lambda$ mezi frekvencí ν a vlnovou délkou λ lze pro koherenční délku psát

$$l_c \propto \frac{\lambda^2}{\Delta \lambda} , \quad (6)$$

kde $\Delta \lambda$ je šířka spektra. Vztah pro koherenční délku demonstruje rozdíly pro zdroje s různou šířkou spektra: největší koherenční délku bude mít zdroj s nejmenší šířkou spektra (příkladem je laser; monochromatický zdroj je charakterizován nekonečnou koherenční délkou) a nejmenší koherenční délku bude mít zdroj s největší šířkou spektra (příkladem je zdroj bílého světla).

Konečná koherenční délka interferujících vln má vliv na vyjádření interferenčního obrazu - projeví se závislostí kontrastu interferenčního obrazu na dráhovém rozdílu (časovém zpoždění) obou interferujících vln. Pokud dráhový rozdíl Δl (časové zpoždění τ) překročí koherenční délku l_c (koherenční čas τ_c) interference neprobíhá, tj. kontrast interferenčního obrazu je nulový.

K popisu interference vln časově omezených se zavádí pojem *částečné časové koherence*, jehož odrazem je důležitý parametr - *komplexní stupeň časové koherence* - $\gamma(\tau)$, který modifikuje vyjádření interferenčního zákona na tvar

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} |\gamma(\tau)| \cos[\varphi_1 - \varphi_2 + \varphi(\tau)] . \quad (7)$$

Důsledkem je tedy změna vyjádření kontrastu $V(\tau)$ výsledného interferenčního obrazu:

$$V = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2} |\gamma(\tau)| \quad (8)$$

prostřednictvím modulu $|\gamma(\tau)|$, který nabývá hodnot v rozsahu $0 \leq |\gamma(\tau)| \leq 1$, přičemž krajní hodnoty reprezentují nekoherentní a koherentní vlny.

Analytická vyjádření modulu $|\gamma(\tau)|$ komplexního stupně časové koherence závisí na profilu spektra zdroje světla. Pro Lorentzovský spektrální profil platí:

$$|\gamma(\tau)| = \exp[-|\tau|/\tau_c] = \exp[-|\Delta l|/l_c] , \quad (9)$$

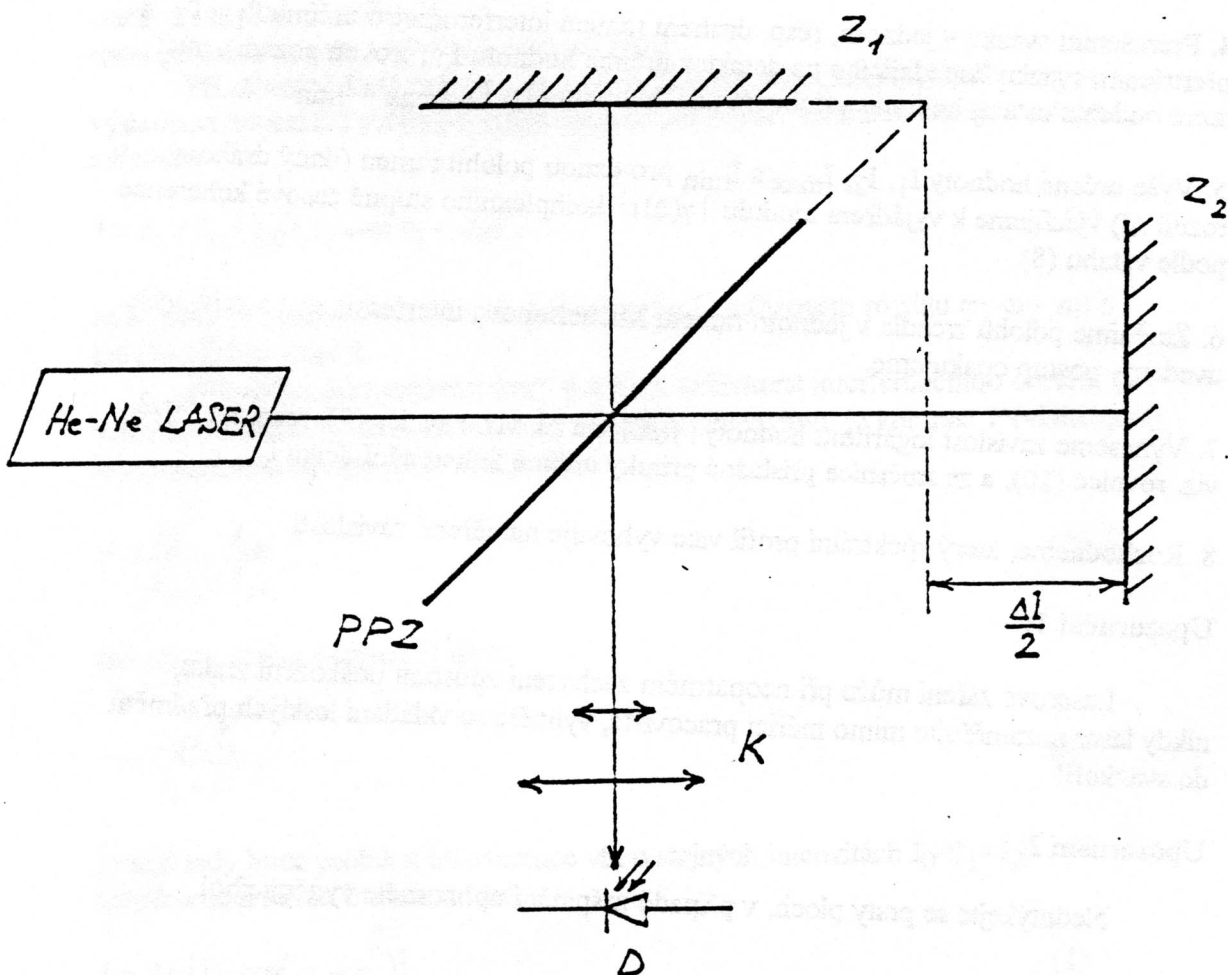
resp. pro Gaussovský spektrální profil platí:

$$|\gamma(\tau)| = \exp[-\pi\tau^2/(2\tau_c^2)] = \exp[-\pi(\Delta l)^2/(2l_c^2)] . \quad (10)$$

Úkol: Určete koherenční délku He-Ne laseru

Princip měření:

V uspořádání Michelsonova interferometru (viz. obrázek) budeme studovat dvousvazkovou interferenci. Ze závislosti kontrastu $V(\Delta l)$ na dráhovém rozdílu Δl (časovém zpoždění τ) interferujících svazků určíme podle vztahu (8) při znalosti intenzit I_1 a I_2 jednotlivých svazků závislost modulu $|\gamma(\Delta l)|$ na dráhovém rozdílu Δl (na časovém zpoždění τ). Proložení naměřené závislosti modulu $|\gamma(\Delta l)|$ na dráhovém rozdílu Δl závislostí teoretickou (9), resp. (10), určíme koherenční délku l_c .



Pomůcky: Michelsonův interferometr - SLO Olomouc, He-Ne laser, fotodetektor se zesilovačem, napájecí zdroj a analogový osciloskop.

Postup měření:

1. Interferometr nastavíme tak, aby délka obou ramen byla přibližně stejná. Pomocí zrcadel seřídíme interferometr tak, aby došlo k překryvu obou svazků, a tedy k vytvoření soustavy interferenčních proužků o šířce alespoň 2-4 mm.
2. Do pole interferenčních proužků umístíme kolmo na přicházející svazek čelo fotodetektoru a na osciloskopu sledujeme odpovídající změny signálu.
3. Pro dynamické interferenční pole určíme Γ_{\max} a Γ_{\min} podle maximální a minimální úrovně signálu na analogovém osciloskopu.
4. Přerušením svazku v jednom, resp. druhém rameni interferometru určíme Γ_1 a Γ_2 a přerušením svazku dopadajícího na detektor určíme hodnotu I_0 (úroveň pozadí), vůči které budeme ostatní hodnoty vztahovat tak, že určíme I_1 , I_2 , I_{\max} a I_{\min} .
5. Výše určené hodnoty I_1 , I_2 , I_{\max} a I_{\min} pro danou polohu ramen (daný dráhový rozdíl Δl) využijeme k vyjádření modulu $|\gamma(\Delta l)|$ komplexního stupně časové koherence podle vztahu (8).
6. Změníme polohu zrcadla v jednom rameni Michelsonova interferometru a celý, výše uvedený, postup opakujeme.
7. Vyneseme závislost logaritmu hodnoty $|\gamma(\Delta l)|$ na Δl , viz. rovnice (9), resp. na $(\Delta l)^2$, viz. rovnice (10), a ze směrnice příslušné přímky určíme koherenční délku l_c .
8. Rozhodneme, který spektrální profil více vyhovuje naměřené závislosti.

Upozornění 1:

Laserové záření může při neopatrném zacházení způsobit poškození zraku, nikdy laser nezaměřujte mimo měřicí pracoviště, vyhněte se vkládání lesklých předmětů do svazku!!!

Upozornění 2:

Nedotýkejte se prsty ploch, v případě zašpinění upozorněte vyučujícího!

ad bod 7.: Alternativně můžeme koherenční délku našeho laseru určit jako rozdíl délek chodu paprsků v obou ramenech interferometru pro námi předem zvolený pokles viditelnosti interferenčního obrazce (např. pro pokles na 25% maximální hodnoty).