Ústav fyziky kondenzovaných látek
Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita, Brno

Fyzikální praktikum 4

Studium aberací sférických povrchů - simulace činnosti aberometru WASCA

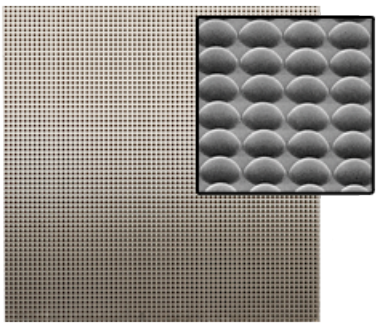
Domácí příprava

Odvoďte nebo vyhledejte vztah pro optickou mohutnost tlusté čočky jako funkci mohutností jejích jednotlivých stěn (Gullstrandova rovnice). Seznamte se detailně s definicí jednotlivých použitých pojmů. Zamyslete se nad použitím této rovnice pro výpočet optické mohutnosti soustavy dvou tenkých čoček umístěných na vzduchu.

Doporučená literatura: [1] Fyzikální praktikum 2, MU 2013

Úvod

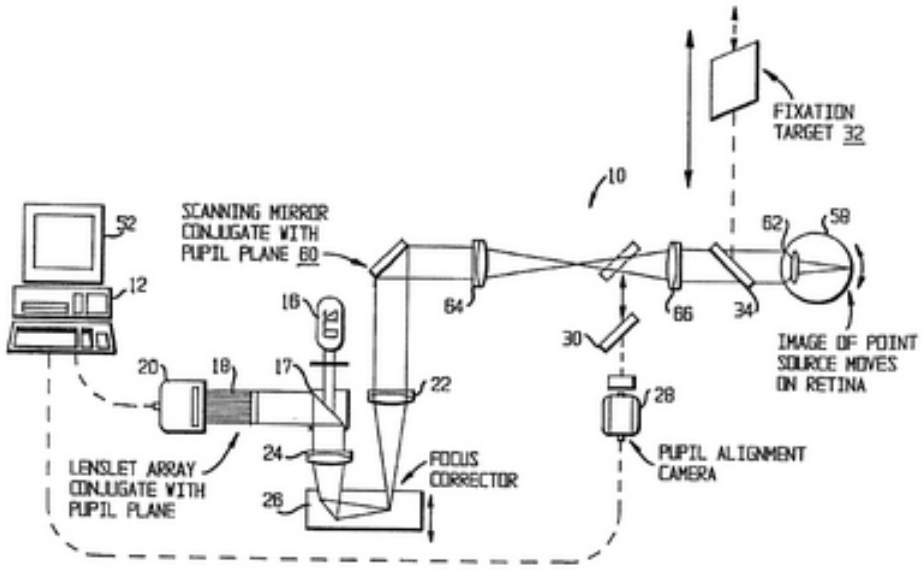
V této úloze se seznámíme s jedním z možných způsobů přímého měření aberací optických soustav, jedná se o použití tzv. Hartmannova-Shackova senzoru. Jádrem tohoto senzoru je pole mikročoček, které z dopadající vlnoplochy vytvoří sadu ostrých bodových obrazů na stínítku. Z rozložení těchto obrazů je potom možné vyhodnotit aberace, které měřený svazek odlišují od ideálního.



Obrázek 1: Pole mikročoček MLA150-7AR, *www.thorlabs.de*

Výhodou této metody je fakt, že pokud bychom přímo pozorovali i bodový zdroj světla, byl by jeho obraz poměrně komplikovaným způsobem aberačně poškozen, což by se projevilo v celkově obtížně uchopitelném rozmazání obrazu. Pomocí pole mikročoček je toto rozmazání obrazu převedeno na rozmazání polohy malých ostrých bodů, které je dobře měřitelné.

K samotnému senzoru kromě pole mikročoček patří také plošný detektor světla, v našem případě realizovaný CCD čipem fotoaparátu bez objektivu a optická soustava, jejímž hlavním cílem je kolimace svazku z bodového zdroje a správná fokusace světla vzhledem k senzoru.



Obrázek 2: Schema aberometru: světlo ze zdroje (16) je fokusováno na sítnici fixovaného oka, kde vytváří ostrý bodový obraz. Z tohoto bodu se šíří vlnoplochy zpět optickou soustavou a jsou zpracovány polem mikročoček (18) na sadu ostrých obrazů na detektoru (20). Z rozložení bodů na detektoru je možné určit, jaké aberace vlnoplochu postihly při cestě okem. *www.freepatentsonline.com*

Součásti optické soutavy pro měření aberací

Zdrojem (monochromatického) světla bude **laserová dioda** s přídavnou **kolimační čočkou** a případnými **šedými filtry** pro regulaci osvitu detektoru. Světlo za kolimační čočkou je téměř nerozbíhavé s průměrem svazku přibližně 1 mm, v případě potřeby je možné svazek rozšířit použitím **beam expanderu** (cca 3x).

Konstrukce rozšiřovače svazku v nejjednodušším případě zahrnuje dvě čočky umístěné tak, aby z rovnoběžného dopadajícího svazku světla vytvořily opět rovnoběžný svazek světla, ovšem zvětšeného průřezu. Jedná se tedy v podstatě o (zadem dopředu orientovaný) malý dalekohled, jehož čočky jsou spojené příslušnými ohniskovými body, resp. zpravidla je pro lepší dosažení paralelního vystupujícího svazku umožněn ostřicí pohyb jedné z komponent rozšiřovače. Do osvětlovací části soustavy je možné zahrnout fokusační optiku podle potřeby, doporučuje se prostorová filtrace světla **štěrbinou** za účelem zlepšení bodovosti zdroje.

Pole mikročoček, které budeme mít k dispozici, je tvořenou plochou skleněnou destičkou tloušťky 1.2 mm a čtvercového průřezu o hraně 10 mm, na která je vytvořena pravidelná matrice čoček o ohniskových vzdálenostech 6.7 mm. Pole je vybaveno antireflexní úpravou optimalizovanou pro propustnost v oblasti 400-900 nm. Každá mikročočka má průměr 146 μm a vzdálenost středů dvou sousedních čoček je 150 μm.

- odhadněte z Gullstrandovy rovnice poloměr křivosti zakřivené stěny mikročoček na Hartamannově-Shackově senzoru.

Pro snímání použijeme **digitální zrcadlovku** s odstraněným objektivem - jeho roli zastoupí právě jednotlivé mikročočky Hartmannova-Shackova senzoru. Samotné čočky však mají příliš krátkou ohniskouvou vzdálenost na to, aby dokázaly fokusovat světlo hluboko dovnitř těla fotoaparátu.

V naší úloze použijeme dvě základní řazení optické cesty: nejprve s využitím rozšiřovače svazku mezi zdrojem světla a senzorem, a dále soustavu s nahrazením rozšiřovače vhodnou čočkou, která svazek světla ze zdroje defokusuje tak, že bude možné umístit snímací CCD do místa, kde Hartamnnův-Shackův senzor parpsky znovu spojí. Přitom zvážíme možnost použití spojné i rozptylné čočky.

Obrázek 3: Konstrukce optické cesty na optické lavici.

- odhadněte mohutnost rozptylky, která by (umístěna do těsné blízkosti pole mikročoček) prodloužila celkovou ohniskovou vzdálenost tohoto systému na 30 mm.
- odhadněte vzdálenost, do které musíte umístit pole mikročoček za spojený svazek z diody, tak aby mikročočky vytvořily své obrazy cca 30 mm za polem.

Teoretická analýza funkce pole mikročoček

Především je potřeba uvědomit si, že díky malé velikosti jednotlivých čoček se pole chová velmi odlišně od makroskopického případu, na který jsme zvyklí. Každá čočka je totiž natolik malá, že část vlnoplochy, která na ni dopadne, vnímá jako téměř rovinnou (neboť malá část libovolné plochy je přibližně rovinná), což znamená, že ji za všech okolností sfokusuje do své obrazové ohniskové roviny. To je naprosto odlišné od makroskopického případu, kdy vzdálenost, ve které vzniká obraz, je proměnná a je dána zobrazovací rovnicí.

Zůstává ovšem faktem, že na každou mikročočku dopadne vlnoplocha s mírně jiným náklonem a proto obrazy za polem jsou v ohniskové rovině rozmístěny způsobem, z něhož lze vlastnosti měřené vlnoplochy rekonstruovat. S jednoduchostí lze při výpočtu využít toho, že paprsek procházející středem (tenké) čočky nemění svůj směr, takže každá mikročočka vytvoří obraz právě v tom směru, který odpovídá směru paprsků, přilétajících do této mikročočky.

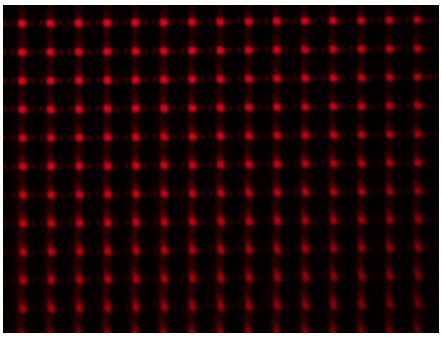
- odvoďte vztah pro polohu obrazů za polem mikročoček pro dopadající rovinnou vlnu

- odvoďte vztah pro polohu obrazů za polem mikročoček pro dopadající vlnu, poškozenou defokusem
- odvoďte vztah pro polohu obrazů za polem mikročoček pro dopadající vlnu, poškozenou astigmatizmem

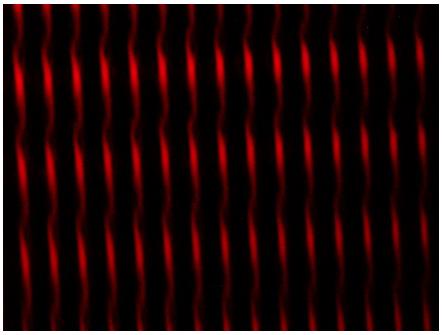
Postup měření

Celou optickou soustavu budeme budovat na optické lavici, každý optický člen bude mít svůj držák a stojan. Pro vybrané členy je potřeba aplikovat na držáky také závitové pohyby pro jemné doladění jejich polohy.

Prvním úkolem je justování optické cesty. Za tímto účelem vycentrujeme stopu ze zdroje na snímači fotoaparátu, přičemž nezapomene použít šedý filtr, aby nedošlo k poškození CCD. Dbáme přitom na to, aby cesta světla



Obrázek 4: Snímek obrazu vytvořeného polem mikročoček v nepřítomnosti vzorku.



Obrázek 5: Snímek obrazu vytvořeného polem mikročoček v přítomnosti cylindrické čočky. Rozteč bodů ve svislém a vodorovném směru se výrazně liší.

byla vodorovná a orientovaná souběžně s hlavním směrem optické lavice. Dále do optické cesty vycentrujeme spojku tak, aby poloha středu svazku zůstala zachována. V dalším kroku umístíme pole čoček do optické osy a nakonec před pole po řadě vycentrujeme měřené vzorky.

Máme-li sjustováno, pokusíme se sejmout obraz stopy za polem čoček, vzhledem k nepřítomnosti objektivu musíme fokusovat ručně. Je-li obraz ostrý a dobře prokreslený, můžeme přistoupit k samotným měřením. Do optické cesty vložíme spojku o známé mohutnosti, a sejmeme obraz za polem čoček v případě jejího centrovaného a decentrovaného umístění. Podobně sejmene snímek obrazů po centrovaném umístění válcové čočky.

Úkoly:

- zajistěte si vhodné komponenty optické lavice pro zbudování úlohy; parametry čoček, které jsou k dizpozici, určete vlastním měřením
- sestavte rozšiřovač svazku s faktorem 3x
- sestavte optickou cestu pro měření obrazu za polem mikročoček (ve variantách s rozšiřovačem a fokusační čočkou)
- sejměte referenční snímek optimalizované stopy za polem mikročoček a s jeho pomocí zkalibrujte zvětšení obrazu na CCD čipu fotoaprátu
- sejměte snímek optimalizované stopy za polem mikročoček v případě centrované a decentrované spojky a centrované válcové čočky; zjistěte vliv jednotlivých konfigurací na polohu obrazů za polem čoček.

Zpracování měření

Získané snímky rozložení obrazových bodů zpracujte v grafickém programu (Photoshop, Gimp, ...). Pro jednotlivé měřené konfigurace odečtěte polohu zaostřených bodů ve svislém centrálním sloupci a ve vodorovné centrální řadě v pixelech a ze známých parametrů optické soustavy tyto polohy převeďte na délkové. Získané skutečné polohy zaostřených bodů převeďte na vzdálenosti sousedních obrazů, ty zprůměrujte a vypočtěte od-

chylku průměru. Následně určete změny ve vzdálenostech bodů po vložení čoček a parametry aktuální optické cesty. Získané hodnoty porovnejte s odhadem, vycházejícím z přímo měřených parametrů optické cesty.