

Úloha č. 4 - Holografie

1 Teoretický úvod

Základy holografie

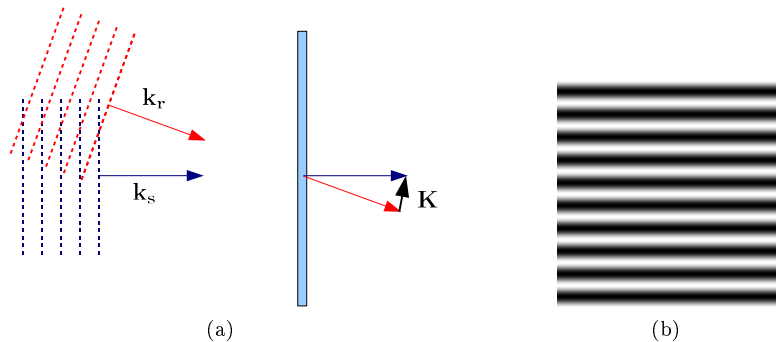
Holografie jako metoda komplexního záznamu optické vlnoplochy byla poprvé prezentována koncem 40. let dvacátého století britským fyzikem Denisem Gaborem. Vzhledem k tomu, že se jednalo o metodu založenou na interferenci optických svazků, která je podmíněna dostatečnou koherencí použitého záření, zaznamenala holografie zásadnější rozvoj až téměř 20 let po jejím objevu. Teprve rozšíření laserů jako zdrojů koherentního záření umožnilo naplno rozvinout možnosti holografických technik.

I když holografie je většinou spojována se záznamem trojdimenzionálního obrazu, z obecnějšího úhlu pohledu se jedná o metodu realizace obecného transformačního optického elementu. Tento prvek transformuje dopadající optickou vlnu do libovolné požadované podoby a to tak, že vytváří komplexní vlnoplochu definovanou jak její intenzitou, tak i fázovým profilem. My se v dalším výkladu omezíme na již zmiňovaný pohled na holografii jako na metodu záznamu 3D informace.

Při klasickém fotografickém procesu dochází vzhledem k vlastnostem záznamového materiálu k záznamu intenzity dopadajícího signálu. Označme signál dopadající na záznamové médium s (signál je obecně komplexní, jedná se o komplexní funkci čtyř reálných proměnných, třech prostorových souřadnic a času). Výsledkem fotografického procesu je realizace prvku, jehož transmitanční funkce je úměrná intenzitě dopadajícího signálu¹

$$t \sim I = |s(x, y, z, t)|^2. \quad (1)$$

Ze vztahu (1) je zřejmé, že došlo ke ztrátě informace nesené fázovou částí signálu s . Fotografie tedy poskytuje pohled na původní scénu pouze z jednoho pozorovacího směru (ze kterého byla pořízena) a tento se nemění ani při změně pozorovacího úhlu. Fázová část optického signálu zprostředkovává prostorový vjem pozorované scény (nese informaci o lokálním zakřivení vlnoplochy, v důsledku kterého může docházet k silné úhlové závislosti vysílaného signálu). Pro zhotovení komplexního 3D záznamu je tedy nutné zaznamenat komplexní formu signálu s .



Obrázek 1: Ukázka interference dvou rovinných vln (a), interferenční pole je harmonické, má tvar pravidelných proužků (b).

Hlavním problémem komplexního záznamu vlnoplochy je neschopnost všech známých záznamových materiálů reagovat na fázové změny v dopadajícím signálu. I když jsou principy fungování jednotlivých médií různé, všechny primárně využívají proces excitace absorbcí kvanta optického záření, který není přímo fázově závislý. Při záznamu fázové části informace musíme tuto vhodně přetransformovat do intenzitní formy. Jedním z procesů, který takovou transformaci zřejmě provádí je proces interference dvou optických vln. Předpokládejme pro jednoduchost dvě rovinné optické vlny podle obrázku 1 a pozorujme jejich interferenci na stínítku intenzitním detektorem. Výsledkem interference je systém intenzitních proužků s harmonickým průběhem intenzity. Tato interferenční struktura může být charakterizována interferenčním vektorem \mathbf{K} , pro který platí vztah

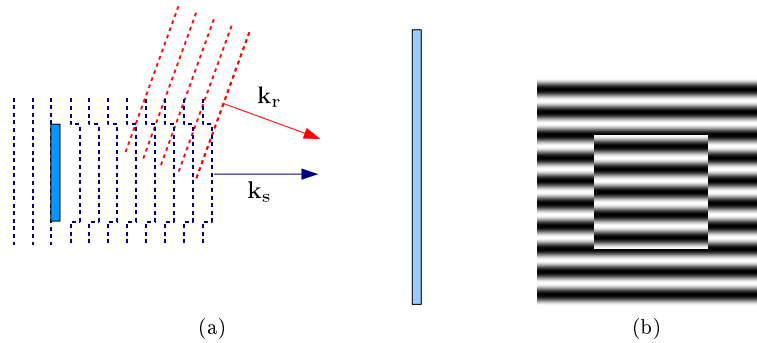
$$\mathbf{K} = \mathbf{k}_r - \mathbf{k}_s. \quad (2)$$

¹v klasické fotografii je většinou využíván negativní proces, kde vyšší intenzita dopadajícího signálu odpovídá nižší propustnosti (většímu zčernání) po vyvolání a zmiňovaná uměrnost je nepřímá, my se ale pro jednoduchost omezíme na pozitivní procesy vedoucí v zásadě k přímé uměrnosti. Dalším problémem je odezva záznamového materiálu, která je obecně nelineární (reprezentovaná Hurter-Driffielovou křivkou), v dalším budeme předpokládat lineární záznam.

Vektor \mathbf{K} má směr kolmý na interferenční proužky a jeho velikost je rovna

$$|\mathbf{K}| = \frac{2\pi}{\Lambda},$$

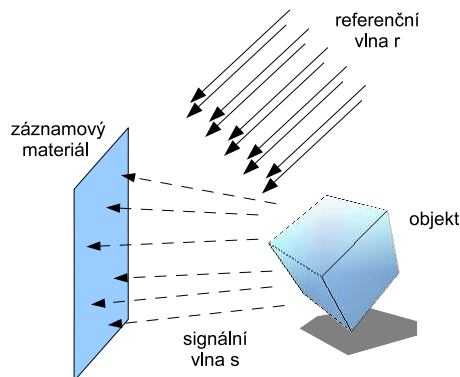
kde Λ je perioda interferenčního obrazce. Změníme-li fázi jedné z interferujících vln (například vložením fázové destičky), dojde na stínítku k prostorovému posunu interferenčních proužků (obr. 2). Je zřejmé,



Obrázek 2: Interferenční pole rovinné vlny a vlny s fázovou poruchou (a), interferenční proužky jsou v místě poruchy posunuté (b).

že informace nesená fázovou částí signálu se jistým způsobem promítá do intenzity zaznamenaného interferenčního pole. Naproti tomu u fotografického záznamu (přítomnost pouze jediné signální vlny s) by se vložení fázové destičky na zaznamenanou intenzitu nijak neprojevovalo.

Na základě výše uvedené rozvahy předpokládáme záznam optického signálu nesoucího informaci o 3D objektu podle schématu na obr. 3. Na rozdíl od klasického fotografického procesu nezaznamenáváme pouze



Obrázek 3: Schema pro záznam transmisního hologramu.

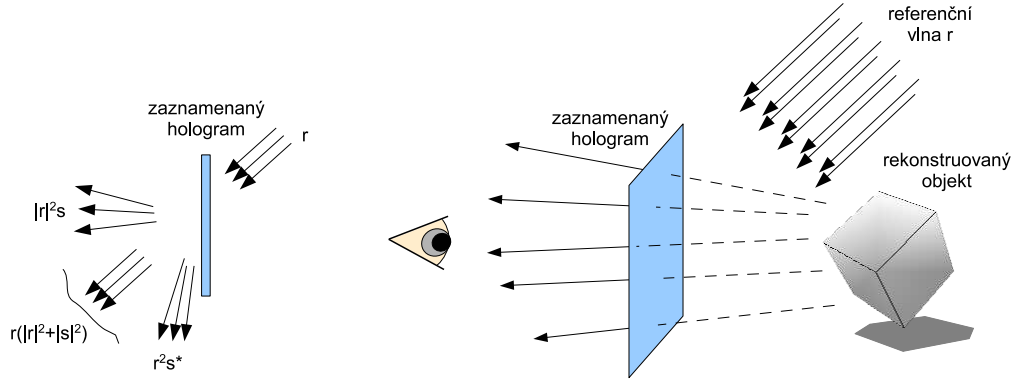
intenzitu signálu s , ale intenzitu interferenčního pole signálu s s referenčním signálem r (pro jednoduchost zvolme signál r ve tvaru rovinné vlny svírající s osou systému úhel α). Jedná se vlastně o analogii procesu z obrázku 2, kde jsme vlnu s fázovou destičkou nahradili obecněji modulovaným signálem přicházejícím od zaznamenaného objektu. Na základě znalostí interferenčního procesu můžeme konstatovat, že zaznamenaný intenzitní obrazec bude mít tvar interferenčních proužků, které budou “zdeformovány” resp. lokálně posunuty v závislosti na tvaru vlnoplochy přicházející od objektu. Jejich střední hustota je na základě (2) daná úhlem referenční vlny α . Po zpracování záznamového materiálu (předpokládáme lineární pozitivní proces) dostaneme transmittanční funkci získaného elementu ve tvaru

$$t \sim I_{interfer} = |r + s|^2 = |r|^2 + |s|^2 + r^*s + rs^*. \quad (3)$$

Z předešlých úvah o interferenci dvou vln při geometrii podle obrázku 3a lze předpokládat charakter interferenčního obrazce podle obrázku 2b.

Využitím procesu interference signální vlny s jednoduchou referenční vlnou jsme zaznamenal intenzitní interferenční pole ve tvaru kvaziperiodických interferenčních proužků. Z rozboru vlivu fázového posunu vlnoplochy na polohu proužků vyplynulo, že v takovém obrazi je implicitně zachycena i informace

o fázi signální vlny, i když zatím není jasné, jestli a jak lze tuto informaci ze zaznamenaného hologramu rekonstruovat. Místo požadovaného 3D komplexního záznamu jsme dostali kvaziperiodickou strukturu interferenčních proužků, která na první pohled neobsahuje cílenou informaci. Zkusme se proto blížeji zabývat procesem rekonstrukce hologramu, který by vedl ke zviditelnění komplexního signálu s . Předpokládejme, že zaznamenaný hologram po vyvolání osvětlíme rekonstrukční vlnou, která bude identická s vlnou referenční použitou při záznamu (obr. 4). Z matematického hlediska lze takový rekonstrukční



Obrázek 4: Rekonstrukce transmisního hologramu.

proces popsat následovně

$$s_{rek} = r \cdot t \sim r(|r|^2 + |s|^2) + |r|^2 s + r^2 s^*. \quad (4)$$

Pole za hologramem se tedy skládá ze tří vln a naším cílem bude tyto jednotlivé vlny analyzovat. K jejich vyhodnocení je potřebné nejprve hlouběji rozebrat význam symbolů s a r , které jsme dosud používali pro popis zúčastněných optických signálů. Referenční vlna byla podle předpokladu rovinná, tudíž můžeme psát

$$r = r_0 e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)}, \quad (5)$$

kde r_0 je komplexní konstanta. Když zavedeme směr osy z ve význačném směru šíření vln zleva doprava a budeme předpokládat, že y -ové složky vlnových vektorů jsou nulové (vlnové vektory leží v rovině papíru), můžeme (5) přepsat do tvaru

$$r = r_0 e^{-i\omega t} e^{ik_x x} e^{iz\sqrt{k^2 - k_x^2}}$$

a po zavedení prostorové frekvence $\xi = \frac{k_x}{2\pi} = \frac{\sin\alpha}{\lambda}$, kde λ je vlnová délka použitého záření, do tvaru

$$r = r_0 e^{-i\omega t} e^{2\pi i \xi x} e^{ikz\sqrt{1 - \lambda^2 \xi^2}}. \quad (6)$$

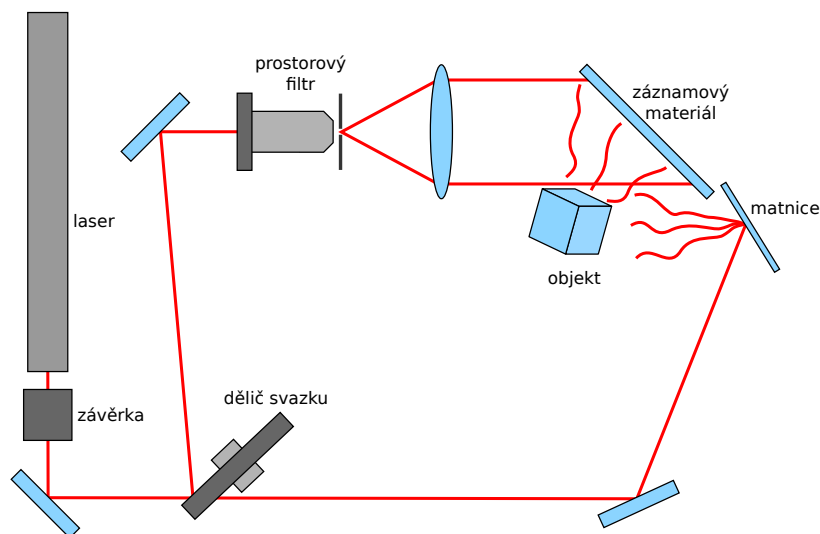
Pro kvadrát modulu referenční vlny tedy platí $|r|^2 = |r_0|^2$. Pro obecnější signální vlnu můžeme psát

$$s = s_0(x, y, z) e^{-i\omega t}$$

a tedy $|s|^2 = |s_0(x, y, z)|^2$. Vraťme se nyní k analýze pole za hologramem podle vztahu (4). První člen $r(|r|^2 + |s|^2)$ reprezentuje optickou vlnu jejíž šíření je dáno signálem r (před závorkou). Členy v závorce totiž neobsahují časový vývoj $e^{-i\omega t}$, a tedy nepředstavují šířící se vlnu, jedná se jenom o intenzitní modulační faktory. Celkem tedy první člen (4) představuje pokračující rekonstrukční vlnu s rovinnými vlnoplochami jejíž intenzita je modulovaná výrazem $|r|^2 + |s|^2$. Nejzajímavější pro nás je druhý sčítanec výrazu (4), který je tvořen pouze původním signálem s v plné komplexnosti - včetně amplitudy i fáze!!! (člen $|r|^2$ je na základě (6) pouze konstanta). Ve směru osy z se tedy za hologramem při popsané rekonstrukci šíří pouze nezměněný signál s který při pozorování vytváří dojem existence objektu v původním místě, i když byl tento při rekonstrukci odstraněn. Protože signál s je úplně totožný se signálem, který by se prostorem šířil při přítomnosti skutečného objektu, je vníman věrně včetně plné prostorovosti (obr 4). Poslední třetí člen je složitějšího charakteru. Nyní výraz r^2 již nepředstavuje konstantu, ale vlnu šířící se pod dvojnásobným úhlem ve srovnání s vlnou r . Na tuto vlnu je namodulován komplexně sdružený signál s^* , který vytváří tzv. reálný obraz.

V předešlém výkladu byla stručně objasněna podstata holografického záznamu v té nejjednodušší formě. Pro lepší srozumitelnost byly vynechány některé aspekty, které sice přímo nesouvisí se základními principy holografického procesu, nicméně mohou zásadně ovlivnit výsledek. Připomeňme si proto

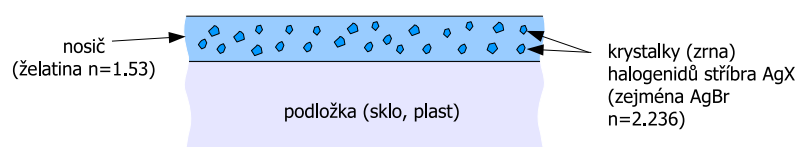
alespoň ty nejdůležitější. Podstatou holografického procesu je záznam komplexní informace převedené do intenzitní formy pomocí interference s referenční vlnou. Z fyzikálního hlediska je tento proces možný pouze když jsou signální a referenční vlna schopny spolu interferovat, což je podmíněno jejich vzájemnými statistickými vlastnostmi. Prakticky je možné takového stavu dosáhnout pouze když obě vlny pocházejí z jediného zdroje s dostatečnou tzv. **časovou koherencí**. Vlastnost časové koherence vyjadřuje míru korelovanosti dvou signálů v závislosti na časovém odstupu s nímž byly generovány. Pro dosažení uspokojivého kontrastu interferenčního pole v rovině záznamového materiálu je nutné, aby interferující části obou svazků byly generovány zdrojem s časovým odstupem menším, než je tzv. koherenční doba zdroje. Praktickým důsledkem této podmínky je nutnost použít pro záznam laserový zdroj a potřeba sestavení záznamového schématu, které zohledňuje koherenční dobu tohoto zdroje a zaručuje dostatečnou korelovanost interferujících svazků. Koherenční dobu laseru můžeme reprezentovat parametrem nazvaným koherenční délka definovaným jako délka dráhy, kterou světlo ujde za časový interval rovný koherenční době. Podmínka interference se potom redukuje na podmínku rozdílu drah signálního a referenčního svazku od jejich rozdělení k záznamovému materiálu, který musí být menší než koherenční délka. Jedno z možných schémat záznamu je naznačeno na obrázku 5.



Obrázek 5: Příklad schématu pro záznam transmisního hologramu.

Záznamové materiály a jejich zpracování

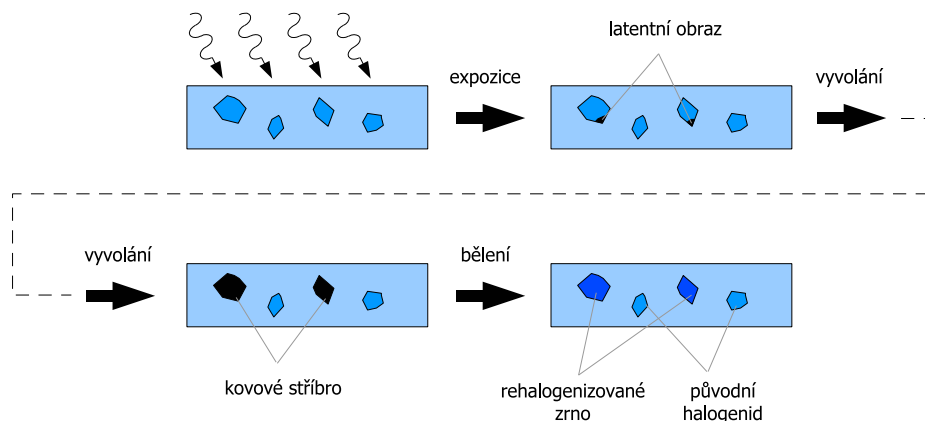
Na základě výkladu z předešlé kapitoly je zřejmé, že záznamový materiál pro holografii musí splňovat několik základních podmínek. Principiálně je možné použít materiály na bázi fotografických halogenostříbrných emulzí, které ale musí poskytovat mnohem vyšší rozlišení, než bylo potřeba pro fotografii. Dalším problémem je absorpce energie v důsledku tzv. amplitudového záznamu, která v praxi vede k neschopnosti pozorovat rekonstrukci v důsledku nízké účinnosti celého procesu. Proto se v holografii orientujeme zejména na záznam čistě fázový, kde dochází pouze k minimálním energetickým ztrátám.



Obrázek 6: Zjednodušený model halogenostříbrné emulze.

V experimentální části úlohy bude používán záznamový materiál na bázi halogenostříbrných emulzí firmy AGFA, typ Gevaert 8E75. Halogenostříbrné materiály jsou tvořeny vrstvou emulze nanesené na vhodné podložce (sklo). Emulze samotná je tvořena přírodní želatinou o tloušťce $\sim 10\mu\text{m}$, ve které jsou rozptýlené zrna halogenidu stříbra AgX, nejčastěji AgBr (obr. 6). Při expozici dojde v důsledku absorpce

fotonu na zrně AgX ke vzniku zárodků atomárního stříbra. Pokud je takových zárodků několik, dojde ke vzniku víceatomárních molekul stříbra (stabilních), které tvoří tzv. latentní obraz (není viditelný, je zasažena pouze část zrna, ale je vyvolatelný). Při procesu vyvolání dochází ke konverzi zrn AgX na stříbro katalyzované přítomností stříbrných zárodků (latentního obrazu). Nezasažená zrna zůstanou nedotčena. Vzniká amplitudový záznam, médium zčerná (kovové stříbro je černé, způsobuje absorpci). Jak již bylo zmíněno, takový záznam způsobuje značnou absorpci, a proto se v dalším kroku konvertuje na záznam fázový. Při procesu bělení dochází za působení bělicího roztoku ke zpětné rehalogenizaci zrn kovového stříbra na AgX a tím ke zprůhlednění emulze. Protože zrna AgX vzniklá rehalogenizací mají jinou vnitřní konfiguraci a tím i jiný index lomu než zrna původní, vzniká fázový záznam (obr. 7).



Obrázek 7: Proces poexpozičního zpracování halogenostříbrné emulze. Expozicí vytvořený latentní obraz je zárodkem pro konverzi zrn na kovové stříbro ve vývojce. Stříbrná zrna jsou poté při bělení opět konvertována na halogenid.

Důležitým parametrem záznamového materiálu je jeho citlivost (závislost odezvy materiálu na expoziční energii) a také spektrální oblast, kde je materiál schopen absorpce. Vlastní citlivost halogenidu má maximum v ultrafialové části spektra a ve viditelném pásmu je možné jej exponovat pouze v modré a modrozelené oblasti. Proto se využívá speciálních přísad - senzibilátorů - které umí posunout maximum citlivosti materiálu do požadované spektrální oblasti a současně tuto citlivost ještě zvýšit. Použitý materiál AGFA Gevaert 8E75 má maximum citlivosti na vlnové délce 750 nm a je možné jej exponovat červeným He-Ne laserem s vlnovou délkou 632.8nm. Obecně citlivost materiálu souvisí s velikostí zrna halogenidu (čím větší je zrno, tím větší je citlivost). Protože v porovnání s fotografickými emulzemi mají holografické emulze mnohem menší zrno (požadavek vysoké rozlišovací schopnosti), jsou také mnohem méně citlivé (až o 3 a více řádů v porovnání s běžným fotografickým filmem). Velikost zrna navíc ovlivňuje takzvaný šum materiálu, který je způsoben rozptylem světla na malých částicích.

Kromě hlogenostříbrných emulzí existuje celá řada dalších záznamových materiálů. Většina z nich je fázového typu, přičemž fázové modulace je dosahováno objemovou modulací indexu lomu, podobně jako u halogenostříbrných materiálů (s výjimkou fotorezistů, kde vzniká prostorový reliéf). Obecně je možné říct, že všechny tyto materiály mají menší citlivost než halogenostříbrné emulze (až o několik řádů) a navíc často jejich pásmo citlivosti zasahuje pouze krátkovlnnou část viditelného spektra (senzibilace na delší vlnovou délku není vždy možná). Naopak výhodou bývá nižší šum, vyšší účinnost, vyšší životnost a nižší výrobní náklady.

2 Zadání úlohy

Cíle úlohy

Cílem úlohy je realizovat transmisní hologram transparentního objektu ve dvousvazkovém schématu.

Pomůcky

Odpružený stůl Melles Griot, He-Ne laser LASOS LKG 7665-P, závěrkový systém Jodon, měřič výkonu Newport, dělič svazku s proměnným dělicím poměrem, prostorový filtr s mikroskopovým objektivem, spojná čočka pro úpravu svazků, zrcadla a magnetické držáky firmy Thorlabs, reflexní matnice, držák

záznamového materiálu s absorbní podložkou, záznamový materiál AGFA Gevaert 8E75, chemikálie pro zpracování.

Postup měření

1. Seznamte se s jednotlivými komponentami optického schématu jako jsou He-Ne laser, elektronicky řízená závěrka, zrcátka, prostorové filtry, dělič svazku a mechanické stojánky.
 - (a) Úlohu realizujte na odpruženém stole Melles Griot 250x125 cm se vzduchovým odpružením. Před zahájením práce zkontrolujte popřípadě upravte tlak v tlumícím systému.
 - (b) Pro záznam použijte He-Ne laser firmy Lasos, typ LKG 7665-P s vlnovou délkou 632.8nm a výstupním výkonem 15mW. Jedná se o plynový laser buzený elektrickým výbojem, chlazený vzduchem, vysílající lineárně polarizované laserové záření v červené oblasti viditelného spektra v základním módu. Koherenční délka laseru je $< 20\text{cm}$. Při práci s laserem dodržujte zásady pro práci s laserovými zdroji, jedná se o laser IIIb třídy. Vyvarujte se přímému pohledu do svazku laseru a stejně tak i do odraženého nerozšířeného svazku! (další informace o použitém laseru najdete např. na adrese http://www.lasos.com/PDF/He_Ne_laser_modules/K7665P.pdf).
 - (c) Pro řízení expozice použijte závěrkový systém Jodon.
 - (d) Pro rozdělení svazku použijte kruhový dělič s kontinuálně proměnnou propustností resp. reflektivitou umožňující přesné nastavení energetických poměrů v signálním a referenčním svazku.
 - (e) Pro manipulaci s laserovým svazkem použijte nastavitelná zrcadla firmy Thorlabs s možností horizontálního i vertikálního náklonu. S ohledem na eliminaci energetických ztrát dbejte na čistotu zrcadel. Případné nečistoty ofoukněte. Nedotýkejte se aktivní plochy zrcadel.
 - (f) Pro rozšíření laserového svazku, filtraci nečistot a získání kolimované rovinné vlny použijte systém prostorového filtru s mikroskopovým objektivem a spojnou čočku.
 - (g) Pro uchycení všech komponent ve schématu použijte magnetické stojánky Thorlabs s permanentními a přepínatelnými magnety. U přepínatelných stojánek neaktivujte magnetický obvod zapnutím stojánku pokud tento nestojí na ocelové desce stolu. Při posuvu stojánek s permanentním magnetem postupujte opatrně.
2. Navrhněte a sestavte schéma pro záznam transmisního masteru s jedním nasvětlovacím svazkem.
 - (a) Navrhněte dvousvazkové záznamové schéma pro transmisní hologram. Dbejte na to, aby geometrie navrženého schématu zohledňovala koherenční délku použitého laseru. Signální vlnu volte přibližně kolmou na záznamový materiál, referenční vlnu nastavte pod úhlem cca. 45 stupňů.
 - (b) Při sestavování schématu rozmístěte nejdříve dělič svazků, objekt a držák záznamového materiálu. Poté postupně dolaďujte polohu dalších prvků tak, aby byly splněny podmínky viz. 2(a).
 - (c) Jako objekt použijte model auta Mini Cooper, který nasvětlíte svazkem odraženým od reflexní matnice. Vzdálenost objektu od hologramu volte co nejmenší tak, aby objekt nebyl zasažen referenční vlnou, která musí současně nasvětlovat celou plochu záznamového materiálu (Vzdálenost objektu od záznamového materiálu definuje finální rozsah úhlů, ve kterém bude možno pozorovat rekonstrukci. Čím je tato vzdálenost menší, tím větší je pozorovací úhel. Minimální vzdálenost je omezena právě přítomností referenční vlny).
3. Seznamte se s problematikou odstranění nečistot na vlnoploše pomocí prostorové filtrace a vyzkoušejte si nastavení takového prostorového filtru.
 - (a) Nejdříve sestavte schéma bez použití kolimátorů pouze z tenkých laserových svazků tak, aby tyto svazky představovaly osy budoucích vln.
 - (b) Vložte do svazku na požadované místo držák prostorového filtru s mikroskopovým objektivem (zatím bez samotného filtru - pinhole). Dojde k roztažení svazku mikroskopovým objektivem. Nastavte přesně polohu objektivu tak, aby byla zachována zamýšlená osa svazku. Vložte prostorový filtr do držáku a rozostřete stopu svazku na prostorovém filtru pomocí posunu mikroskopového objektivu směrem od filtru. Příčnými posuvy prostorového filtru naleznete pozici filtru, kdy svazek alespoň částečně prochází filtrem (zhasněte světla v laboratoři, těsně za

prostorový filtr umístěte bílý papír a hledejte pozici filtru, kdy se objeví slabá světelná stopa). Poté proveďte postupnými iteracemi fokusaci svazku do otvoru filtru postupným přibližováním mikroskopového objektivu a doladováním příčné polohy filtru (posouvejte mikroskopovým objektivem a filtrem pouze tak, aby jste úplně neztratili stopu za filtrem). Cílem je stav, kdy fokus mikroskopového objektivu leží přesně uprostřed otvoru v prostorovém filtru. Protože nečistoty na vlnoploše (různé fázové a amplitudové poruchy vzniklé prachovými částicemi v objektivu a nedostatky v samotném laserovém svazku) se soustřeďují ve fokální rovině mimo osu, neprojdou systémem a prošlá vlna odpovídá ideální čisté sférické vlnoploše. Pro realizaci kolimované rovinné vlny přidejte za prostorový filtr ještě spojnou čočku tak, aby její ohnisko leželo uprostřed prostorového filtru. Při nastavování čočky opět dbejte na zachování osy systému.

4. Nastavte příslušné energetické poměry signálního a referenčního svazku, proveďte měření expozice a spočítejte expoziční čas.

- (a) Detektorem Newport změřte energii v signálním a referenčním svazku. energii vždy měřte kolmo na dopadající svazek a následně proveďte korekci na úhel svazku (Měřící zařízení ve skutečnosti měří hustotu výkonu ve světelném svazku. Při dopadu svazku na záznamový materiál pod úhlem α je efektivní hustota výkonu svazku, který exponuje materiál $P_{ef} = P_{\perp} \cos\alpha$, kde P_{\perp} je hodnota hustoty výkonu měřená kolmo k dopadajícímu svazku).
- (b) Nastavte dělič svazku tak, aby poměr signálního a referenčního svazku byl cca 1:10 až 1:15.
- (c) Spočítejte celkovou hustotu výkonu dopadajícího na záznamový materiál (součet efektivních hustot výkonu v obou svazcích) a na základě znalosti expoziční energie záznamového materiálu spočítejte expoziční dobu $t = E/P$, kde P je celková hustota dopadajícího výkonu a E je hustota expoziční energie. Použitý materiál AGFA Gevaert 8E75 má hodnotu hustoty expoziční energie $E_{8E75} = 400 \mu J/cm^2$.

5. Připravte a založte záznamový materiál do schematu. Proveďte záznam transmisního masteru na halogenostříbrný záznamový materiál AGFA Gevaert 8E75.

- (a) Zhasněte všechna světla, rozsviňte ochranné osvětlení (v případě použití materiálu AGFA Gevaert 8E75 zelené) a zavřete závěrku laseru. Opatrně vyjměte záznamový materiál z obalu. Určete emulzní stranu (nadechnutím, na skleněné straně dochází k zamžení, na emulzní nikoli, anebo ostřím nože v okrajové části desky) a vložte materiál do držáku emulzní stranou k objektu. Použijte držák se začerněnou skleněnou deskou a mezi záznamový materiál a stěnu držáku kápněte isopropylalkohol (kapalina působí jako indexové přizpůsobení zamezující parazitním reflexím na rozhraní dvou skel).
- (b) Zatáhněte závěsy nad stolem a bez pohybu čekejte několik minut. Tato takzvaná relaxační doba je důležitá pro ustálení vibrací ve schematu. Provádíte záznam interferenční struktury s periodou $\sim 700nm$ s poměrně dlouhým expozičním časem, scéna musí být stabilizovaná. Stabilitu může narušit i hlasitý hovor nebo pohyb vzduchu v místnosti.
- (c) Během relaxace připravte chemikálie pro vyvolání. Použijte dvousložkovou vývojku Ag (v poměru 1:1, celkové množství cca 80ml) a dvousložkovou běličku K7 (v poměru 1:1, celkové množství 80ml). Dále připravte roztok destilované vody se smáčedlem (koncentrace smáčedla 0.5%, celkem cca 100ml).
- (d) Proveďte expozici.

6. Exponovaný záznamový materiál zpracujte procesem pro zpracování halogenostříbrných emulzí.

- (a) Záznamový materiál nejdříve vyjměte z držáku a osušte zbytky isopropylalkoholu ze zadní strany. Poté desku ponořte do předem připravené vývojky a za intenzivního míchání vyvolávejte 2 minuty. Po skončení desku vyjměte a vložte do misky s protékající vodou na cca 2 min (z kohoutku).
- (b) Po vyprání vložte desku do bělicího roztoku a intenzivně míchejte až do úplného vybělení (deska musí být na konci znovu úplně transparentní, proces trvá cca 5 minut v závislosti na koncentraci běličky a míře zčernání ve vývojce). Poté desku opět důkladně vyperte v tekoucí vodě po dobu 5 minut.

- (c) Nakonec materiál opláchněte destilovanou vodou a vložte na cca 30 vteřin do roztoku destilované vody se smáčedlem (0.5% roztok). Po vytažení nechte volně vyschnout.
7. Proveďte rekonstrukci realizovaného hologramu zpětným vložením do záznamového schématu.
- (a) Hotový hologram vložte do záznamového schématu na stejné místo, kde byl při expozici, odstraňte objekt a otevřete závěrku laseru. Pozorujte rekonstruovaný objekt.
 - (b) Vyzkoušejte rekonstrukci konjugovanou rekonstrukční vlnou. Zkoumejte citlivost hologramu na přesné dodržení rekonstrukčního schématu (úhel rekonstrukční vlny, poloha hologramu, rekonstrukce polychromatickým světlem).

3 Požadované výsledky

Po provedení experimentu na základě uvedeného postupu sepište protokol o měření. Protokol musí mimo jiné obsahovat následující údaje:

1. Popis záznamového schématu, náčrt rozmístění jednotlivých prvků s údajem o délce jednotlivých svazků, rozdílu drah signální a referenční vlny, atd.
2. Hodnoty hustoty výkonu naměřené v obou svazcích před expozicí, použitou expoziční dobu, relaxační dobu, atd.
3. Stručnou diskusi o záznamovém a vyvolávacím procesů, rozbor případných problémů (příp. nestandardní doba vyvolání/bělení, atd.).
4. Diskusi rekonstrukce zhotoveného hologramu (rozbor případných problémů, difrakční účinnosti hologramu, homogenity rekonstrukce, citlivosti rekonstrukce na kvalitu rekonstrukční vlny, rekonstrukce konjugovanou vlnou, atd.).