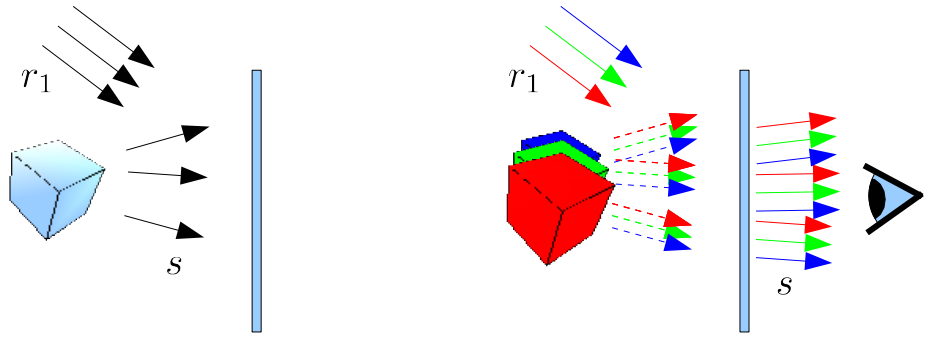
Úloha č. 3 - Holografie II

1 Úvod

Úloha navazuje na úlohu č. 4 Holografie základního praktika z optiky a optoelektroniky (ZPOP), kde byl realizován transmisní hologram trojdimenzionálního objektu ve dvousvazkovém schematu. Takový transmisní hologram byl uspokojivě rekonstruovatelný pouze v laserovém světle, což zásadním způsobem ovlivňovalo jeho praktickou využitelnost. Jeho dalším zpracováním (kopírováním za speciálních podmínek) lze vytvořit hologramy rekonstruovatelné klasickým polychromatickým bodovým zdrojem. Pro úspěšné absolvování úlohy je nutné pochopení teoretických a experimentálních základů holografie diskutovaných v návodu k úloze č. 4 Holografie základního praktika z optiky a optoelektroniky [1].

2 Hologramy pro rekonstrukci v polychromatickém světle

Rekonstrukce výše zmíněného transmisního hologramu (záznam hologramu viz. obrázek 1a) vyžaduje osvětlení s dostatečnou časovou a prostorovou koherencí. Zatímco prostorovou koherenci je možné zajistit bodovostí zdroje světla, která zaručuje hladkost rekonstrukční vlny, časová koherence související s monochromatičností je u klasických zdrojů stěží dosažitelná. Při rekonstrukci klasického transmisního hologramu pomocí bodového zdroje bílého světla dochází k situaci podle obrázku 1b. Každá vlnová délka obsažená v rekonstrukční vlně vytvoří obraz v dané



(a) (b)

Obrázek 1: Schema záznamu transmisního masteru ve dvousvazkovém schematu a) a jeho rekonstrukce polychromatickým světlem b).

barvě. Vzhledem k disperzi se ale obrazy v různých barvách prostorově nepřekrývají v důsledku čeho je rekonstrukce silně rozmazaná a má duhové barvy. Existují v podstatě dva základní přístupy korigující negativní dopad disperze umožňující rekonstrukci hologramu v bílém světle:

- reflexní hologramy - jsou založeny na přirozené spektrální selektivitě objemové mřížky, kde při dopadu polychromatické rekonstrukční vlny na takovou mřížku dochází k přirozené selekci vlnové délky - difrakční účinnost reflexního řádu je nezanedbatelná pouze pro úzké pásmo vlnových délek, ostatní vlnové délky procházejí hologramem bez difrakce a tvoří nultý řád
- duhové hologramy - jsou transmisní hologramy, které za cenu omezení jedné paralaxy (většinou verikální) dosahují prostorové separace obrazů pro různé vlnové délky - nedochází tedy k jejich překrytí a duhovému rozmazání

V obou uvedených případech je možné dále disperzi eliminovat fokusací obrazu do těsné blízkosti hologramu - míra duhového rozmazání při rekonstrukci je úměrná vzdálenosti obrazu od holo-

gramu, pokud je tedy objekt umístěn do blízkosti finálního hologramu, je rozjetí jednotlivých barev malé.

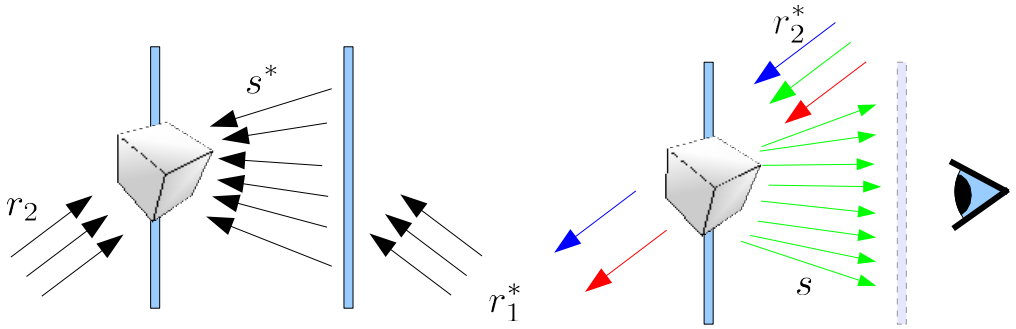
Oba uvedené typy hologramů se většinou realizují kopírováním z transmisního masteru zhotoveného klasickým postupem (viz úloha č. 4 předmětu ZPOP).

Reflexní hologramy

Reflexním hologramem nazýváme difraktivní prvek, u kterého se rekonstruovaná signální vlna šíří ve stejném poloprostoru jako vlna rekonstrukční. Z teorie objemových mřížek (např. Kogelnikova teorie, atd.) lze ukázat, že reflexní objemová mřížka je velice citlivá na rozladění rekonstrukční vlnové délky (malá odchylka vlnové délky způsobuje výrazný pokles difrakční účinnosti). Tohoto efektu lze využít pro dosažení přirozené selekce vlnové délky při rekonstrukci hologramu v bílém světle (naproti tomu typická transmisní mřížka vykazuje pouze mírný pokles difrakční účinnosti při změně vlnové délky, ale významný pokles této účinnosti při malé změně úhlu dopadu rekonstrukční vlny). Reflexní hologram lze sestrojit bud'to přímou cestou expozicí ve schematu s objektem, kde referenční vlna dopadá na záznamový materiál z opačné strany jako vlna signální, anebo kopírováním z transmisního masteru pomocí rekonstrukce masteru konjugovanou vlnou. První zmíněný postup má ale několik podstatných nevýhod, a sice:

- nelze zhotovit jednoduše větší počet kopií hologramu - realizace každého vyžaduje využití kompletního schematu s původním objektem
- energetická bilance je při primárním záznamu objektu většinou nevýhodná - reflektivita povrchu definuje energii signálního svazku, nelze jednoduše nastavit poměr energií svazků, dochází k depolarizaci v důsledku odrazu od objektu, expoziční časy jsou delší, což společně s vyššími nároky na stabilitu schematu (reflexní prvky mají vyšší hustotu modulace až $\lambda/2$) komplikuje expoziční proces
- objekt nelze umístit do blízkosti finálního hologramu, což je často žádoucí z hlediska minimalizace negativního dopadu disperze, prostorové nekoherence a geometrické deformace obrazu

Existují ovšem speciální záznamové geometrie, kde dochází k přímému záznamu reflexního hologramu - např. Denisjukovo schema. Tyto postupy sice trpí výše uvedenými nedostatky, na druhé



(a) (b)

Obrázek 2: Schema kopírování transmisního masteru na reflexní kopii a) a její rekonstrukce polychromatickým světlem b).

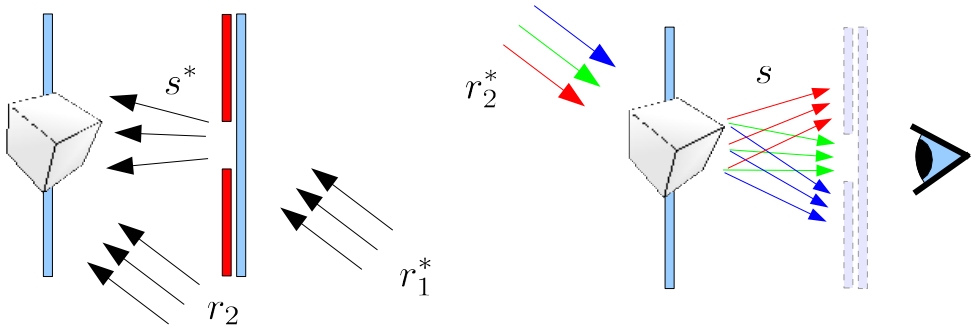
straně ale mohou zjednodušovat celý proces expozice - v případě zmíněného Denisjukova schematu použitím jediné vlny, která vytváří současně referenční svazek i svazek signální (odrazem od objektu nasvíceného přes záznamový materiál).

Na obrázku 2a je naznačen proces vytvoření reflexního hologramu kopírováním z transmisního masteru. Transmisní master je rekonstruován konjugovanou referenční vlnou (pro zjednodušení procesu konjugace volíme většinou při záznamu masteru rovinnou referenční vlnu, u které se

konjugace redukuje na pouhou změnu směru šíření) a vytváří v prostoru reálný obraz původního objektu. Do blízkosti tohoto obrazu je potom umístěn nový záznamový materiál, který je současně osvětlen novou referenční vlnou dopadající na materiál z opačné strany než vlna signální. Finální rekonstrukce takového reflexního hologramu je znázorněna na obrázku 2b. Rekonstrukci provádíme opět vlnou konjugovanou k referenční vlně použité při kopírování. Vzhledem k tomu, že pro finální pozorování většinou používáme divergentní kulovou vlnu vytvořenou bodovým zdrojem (například bodovou halogenovou lampou), měla by být referenční vlna při kopírování konvergentní kulová. Realizovat takovou vlnu je ovšem obtížné, proto používáme pro kopírování i finální rekonstrukci referenční vlnu kulovou divergentní. Podmínka konjugace pak není splněna, což se projevuje deformací obrazu. Tyto nežádoucí efekty lze eliminovat zvětšením poloměru křivosti referenční/rekonstrukční vlny, proto se snažíme volit tyto parametry co největší.

Duhové hologramy

Duhový hologram je transmisní hologram rekonstruovatelný v bílém světle. Byl poprvé navržen a sestrojen T. Bentonem v roce 1969. Rozmazání obrazu v důsledku disperze je eliminováno prostorovou separací jednotlivých barevných obrazů za cenu omezení vertikální paralaxy. Duhový hologram lze sestrojit kopírováním z klasického transmisního masteru s použitím stěrbinové clony omezující využitou plochu masteru ve vertikálním směru. Schema realizace duhového hologramu je naznačeno na obrázku 3a. Celý proces se od kopírování na reflexní kopii liší jednak



(a) (b)

Obrázek 3: Schema záznamu duhového hologramu pomocí kopírování transmisního masteru vymezeného štěrbinovou clonou a) a rekonstrukce realizovaného duhového hologramu v polychromatickém světle b).

přítomností omezující štěrbiny a dále referenční vlnou dopadající na kopii ze stejné strany jako vlna signální (dochází k záznamu transmisního hologramu). Na obrázku 3b je znázorněn proces rekonstrukce duhového hologramu bílým světlem. Zatímco u klasického transmisního hologramu (obrázek 1a) resp. u transmisní kopie realizované bez použití stěrbiny docházelo při rekonstrukci bílým světlem k prostorovému překrytí obrazů v jednotlivých barvách, u duhového hologramu jsou tyto obrazy díky štěrbině prostorově separovány. Obraz si v horizontální rovině zachovává svůj trojdimenzionální charakter, zatímco v rovině vertikální pozorujeme změnu jeho barvy (při pohybu pozorovatele v horizontálním směru dochází k prostorovému vjemu, při verikálním pohybu vidíme objekt pořád "zepředu" pouze v jiných barvách - při pohledu seshora posunutý k červenému a při pohledu zdola k modrému okraji spektra). Vzhledem k tomu, že nakonec využíváme z transmisního masteru pouze malou část vymezenou štěrbinou, lze v případě, kdy tento master nebude jinak využíván, použít již pri jeho realizaci pouze proužek záznamového materiálu odpovídající rozměrům štěrbiny.

Další podrobnosti týkající se procesu vytváření reflexních kopií a duhových hologramů je možné nalézt např. v [2].

3 Zadání úlohy

Cíle úlohy

Cílem úlohy je realizovat reflexní kopii trasmisního masteru a duhovou transmisní kopii tohoto masteru ve dvousvazkovém schematu.

Pomůcky

Odpružený stůl Melles Griot, He-Ne laser LASOS LKG 7665-P, závěrkový systém Jodon, měřič výkonu Newport, dělič svazku s proměnným dělícím poměrem, prostorové filtry s mikroskopovým objektivem, spojná a rozptylná čočka pro úpravu svazků, zrcadla a magnetické držáky firmy Thorlabs, $\lambda/2$ retardační destička, držák záznamového materiálu s absorbční podložkou, hotový transmisní master ke kopírování, štěrbinová clona, záznamový materiál AGFA Gevaert 8E75, chemikálie pro zpracování.

Postup měření

1. Seznamte se s jednotlivými komponentami optického schematu jakou 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 $<$ 20cm. 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 rozdělění 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 schematu použijte magnetické stojánky Thorlabs s permanentními a přepínatelnými magnety. U přepínatelných stojánků neaktivujte magnetický obvod zapnutím stojánku pokud tento nestojí na ocelové desce stolu. Při posuvu stojánků s permanentním magnetem postupujte opatrně.

2. Navrhněte a sestavte schema pro kopírování transmisního masteru na reflexní kopii.

   (a) Navrhněte dvousvazkové záznamové schéma pro reflexní kopii. Dbejte na to, aby geometrie navrženého schematu zohledňovala koherentní délku použitého laseru. Signální vlnu volte přibližně kolmou na záznamový materiál, referenční vlnu nastavte pod úhlem cca 50 stupňů. Objekt umístěte do roviny finálního hologramu (rovina

záznamového materiálu prochází středem objektu). Při návrhu schematu zohledněte perspektivu obrazu (pseudoskopický resp. ortoskopický obraz) a správný směr dopadu finální rekonstrukční vlny (finální reflexní kopie by měla být rekonstruována při správném pohledu na objekt zepředu seshora).

(b) Jako předlohu použijte již zhotovený transmisní master. Master rekonstruujte rovinnou vlnou vytvořenou pomocí spojné čočky a prostorového filtru s mikroskopovým objektivem umístěného do ohniska čočky. Referenční vlnu použijte kulovou divergující vytvořenou pomocí prostorového filtru s objektivem. Poloměr křivosti vlny volte co největší. Použijte horizontální polarizaci laseru (rovnoběžnou s rovinou stolu) vytvořenou pomocí $\lambda/2$ retardační destičky - pro tuto polarizaci je možné volbou úhlu dopadu referenční vlny na záznamový materiál v blízkosti Brewsterova úhlu eliminovat nežádoucí odrazy na rozhraní.

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

(a) Změřte energii v signálním a referenčním svazku. Energii vždy měřte kolmo na dopadající svazek a následně proveďte korekci na úhel svazku (Měřící zařízení ve sktečnosti 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 1:3 až 1:5 (měřeno kolmo na vlnoplochy svazků).

(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 (při záznamu reflexního hologramu) $E_{8E75R} = 600\mu J/cm^2$.

4. Připravte a založte záznamový materiál do schematu. Proveďte záznam reflexní kopie na halogenostříbrný záznamový materiál AGFA Gevaert 8E75.

(a) Zhasněte všechna světla, rozsvit'te 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 zamlžení, na emulzní nikoli, anebo ostřím nože v okrajové části desky) a vložte materiál do držáku emulzní stranou k referenční vlně.

(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 $\sim 400nm$ 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 40ml) a dvousložkovou běličku K7 (v poměru 1:1, celkové množství 60ml). Dále připravte roztok destilované vody se smáčedlem (koncentrace smáčedla 0.5%, celkem cca 100ml).

(d) Proveďte expozici.

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

   (a) Desku ponořte do předem připravené vývojky a za stálého míchání vyvolávejte 2 minuty. Po skončení desku vyjměte a vložte do misky s protékající vodou (z kohoutku) na cca 2 min.

   (b) Po vyprání vložte desku do bělícího roztoku a míchejte až do úplneho 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.

6. Navrhněte a sestavte schema pro expozici duhového transmisního hologramu.

   (a) Navrhněte dvousvazkové záznamové schéma pro záznam duhového hologramu. Dbejte na to, aby geometrie navrženého schematu zohledňovala koherentní délku použitého laseru. Signální vlnu volte přibližně kolmou na záznamový materiál, referenční vlnu nastavte pod úhlem cca. 45 stupňů.

   (b) Jako předlohu použijte již zhotovený transmisní master. Master rekonstruujte rovinnou vlnou vytvořenou pomocí spojné čočky a prostorového filtru s mikroskopovým objektivem umístěného do ohniska čočky. Na masteru vymezte pomocí štěrbinové clony proužek o šíři cca 15mm. Šířka proužku definuje oblast prostoru, která při finální rekonstrukci bílým světlem obsahuje obraz v jedné z duhových barev. Při nevhodné volbě šířky štěrbiny dohází k duhovému rozmazání rekostrukce podobně jako u klasického transmisního hologramu (příliš široká štěrbina). Referenční vlnu použijte kulovou divergující vytvořenou pomocí prostorového filtru s objektivem. Poloměr křivosti vlny volte co největší. Použijte verikální polarizaci laseru pro maximalizaci kontrastu interferenčního pole. Objekt podobně jako v předcházejícím případě umístěte do roviny finálního hologramu.

7. Proveďte měření expozice a nastavení poměru svazků podobně jako při zhotovení reflexního hologramu. Použijte poměr signálního a referenčního svazku 1 : 5 až 1 : 8 a expoziční energii $E_{8E75T} = 400\mu J/cm^2$.

8. Založte záznamový materiál a proveďte expozici. Pro uchycení použijte držák s vyčerněnou zadní stranou pro eliminaci parazitních reflexí. Použijte imerzní kapalinu (isopropylalkohol).

9. Materiál zpracujte stejným postupem jako reflexní kopii.

10. Proveďte rekonstrukci reflexní kopie i duhového hologramu v laseru i bílém světle.

4 Požadované výsledky

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

1. Popis záznamového schematu, náčrt rozmístění jednotlivých prvků s údajem o délce jednotlivých svazků a rozdílu drah signální a referenční vlny (pro oba hologramy).

2. Hodnoty hustoty výkonu naměřené v obou svazcích před expozicí, použitou expoziční dobu, relaxační dobu, atd.

3. Stručnou diskusi o záznamovém a vyvolávacím procesu, rozbor případných problémů (příp. nestandartní doba vyvolání/bělení, atd.).

4. Diskusi rekonstrukce zhotoveného hologramu (rozbor případných problémů, difrakční účinnosti hologramu, homogenity rekonstrukce, citlivosti rekonstrukce na kvalitu rekonstrukční vlny, atd.).

Reference

[1] Holografie I - návod k úloze č. 4 základního praktika z optiky a optoelektroniky, http://optics.fjfi.cvut.cz.

[2] P. Fiala, I. Richter, Fyzikální optika, skriptum, ČVUT, 2005.