TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

FOTOPOLYMERNÍ ZÁZNAMOVÁ MÉDIA PRO POUŽITÍ V HOLOGRAFICKÉ INTERFEROMETRII

AUTOREFERÁT DISERTAČNÍ PRÁCE

2009

Vít Lédl

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Vít Lédl

FOTOPOLYMERNÍ ZÁZNAMOVÁ MÉDIA PRO POUŽITÍ V HOLOGRAFICKÉ INTERFEROMETRII

DISERTAČNÍ PRÁCE

Školitel: Prof. Ing. Václav Kopecký CSc.

Liberec 2009

FOTOPOLYMERNÍ ZÁZNAMOVÁ MÉDIA PRO POUŽITÍ V HOLOGRAFICKÉ INTERFEROMETRII

Autor: Ing. Vít Lédl
Studijní program: 2612V
Obor: 3901V025 Přírodovědné inženýrství
Ústav: Ústav řízení systémů a spolehlivosti (RSS)
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií
Technická Univerzita Liberec
Školitel: Prof. Ing. Václav Kopecký, CSc.
Rozsah práce:
Počet stran: 115
Počet obrázků: 98
Počet tabulek: 2
Počet příloh: 1

Anotace:

Tato práce zkoumá možnou náhradu za klasický záznam hologramů na stříbrohalidové jemnozrné fotografické emulze v metodě holografické interferometrie. Náhradou jsou navržené a připravené fotopolymerní záznamové struktury jejichž základem je komerčně dostupný tekutý fotopolymer. Hlavní výhodu je odstranění mokrého vyvolávacího procesu u těchto médií. Ten je nahrazen IN SITU prováděným procesem, spočívajícím v osvětlení struktury bílím světlem. Jsou zde prezentovány výsledky měření vlastností záznamových struktur jako jsou křivky nárůstu difrakční účinnosti a křivky nárůstu diferenciálního indexu lomu v závislosti na přijaté energii a expozičním čase. Možnosti zvýšení citlivosti struktury předexpozicí, způsob vyvolání a utvrzení. Záznamové struktury jsou testovány při použití v holografických interferometrických experimentech s vynikajícími výsledky. Zvláště kladně se se pak projevuje jejich velmi malý šum při dosahování obrovské citlivosti při měření vibrací metodou časového středování s frekvenčně modulovanou referenční vlnou.

Klíčová slova: fotopolymerní záznamové struktury, holografická interferometrie, modulovaná referenční vlna

Annotation:

This work aims to research a possible alternative to the classic silver halide finegrained photographic emulsion used in holographic interferometry method. This alternative includes designed and prepared photopolymer recording structeres using a commercially available liquid photopolymer. The main advantage to this is the that it gets rid of the need for a wet chemical developing process. This is substituted by on site process, which is based on the white illumination of the structure. The results presented herein show the measured properties as the growth curves of diffraction efficiency and differential refractive index relative to exposure energy or exposure time. The posibility of hightening the sensitivity of the stucture by preexposure, the development method and the hardening. The recording structures have been tested in the real life use in holographic interferometry experiments with excellent results. Particularly positive is their low noise, which enables reaching enormous sensitivity in the frequency modulated reference wave in small vibration amplitude measurement method .

Key words: Photopolymer recording structure, Holographic interferometry, modulated reference wave3 Holografie

Cíle práce:

Provést rešerši principů holografie a holografické interferometrie nutných pro další rozbor s důrazem na záznamová média.

Diskutovat možnosti moderních fotopolymerních médií a objektivně zhodnotit jejich přednosti a výhody oproti ostatním médiím.

Ukázat, jak pracovat s tekutými fotopolymery a provést návrh fotopolymerní záznamové struktury.

Zhotovit záznamové fotopolymerní struktury podle návrhu citlivé v zelené a červené oblasti.

Měřit vlastnosti struktur a porovnat je s ostatními médii a výsledky použít pro další vylepšení vlastností záznamových struktur.

Ověřit funkčnost fotopolymerních záznamových struktur v experimentech holografické interferometrie bez nároku na vysokou rigoróznost HI experimentů.

1 Úvod:

Holografická interferometrie (HI) je velmi výkonný a s ohledem na počet možných různých aplikací také velmi široce uplatnitelný měřicí nástroj. Od doby jejího vzniku se HI uplatnila v mnoha oblastech výzkumu vývoje a nedestruktivního testování jako nenahraditelná bezdotyková neinvazivní metoda. Několik posledních dekád se HI stále rozvíjí a zdokonaluje a objevují se její nové aplikace. I přes fakt, že technika patří mezi ty experimentálně náročnější, a to jak její ideová podstata, tak samotná příprava a provádění experimentů vyžaduje jistou nemalou dávku zručnosti a umu, vzniká mnoho nových publikací týkajících se přímo metody nebo jejích aplikací. To vše svědčí o její živosti nebo často také nevyhnutelnosti její aplikace.

Holografie stojí na geniálním využití přirozeně souvisejících jevů interference a difrakce [1]. Od samého objevu holografie a jejího rozšíření, podmíněného objevem laseru a mimoosého uspořádání [2], se tato potýká s problémem zaznamenání mikroskopického interferenčního obrazce. Vzniklý hologram je výsledkem záznamenání interferenčního kódu a platformou pro následnou difrakční rekonstrukci komplexního vlnového pole. A právě záznam hologramu i jeho následná rekonstrukce výrazně přispívají ke značné experimentální složitosti, jakou se vyznačuje holografická interferometrie.

Za dobu vývoje holografie se objevilo mnoho způsobů záznamu hologramu, málo z nich se však opravdu rozšířilo většinou proto, že záznamový materiál i přes řadu výhod trpěl jedním nebo více vážnými nedostatky. Úplně prvním záznamovým materiálem se staly tzv. Lippmannovy [3] holografické emulze (SHE). Jsou to v principu ultrajemnozrnné fotografické emulze cit-

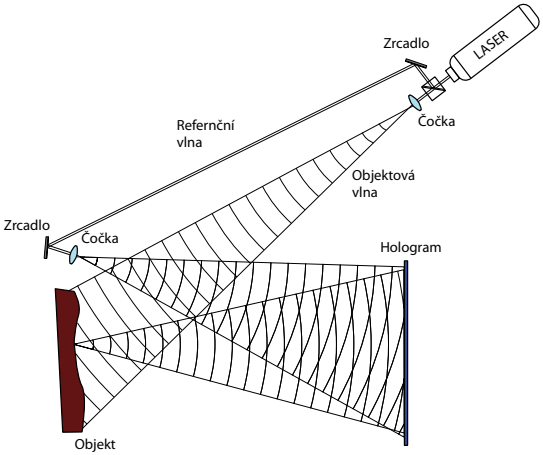
livé obvykle v uzském spektrálním pásu. [4] Tento princip záznamu, i když značně vylepšený, se používá dodnes. Veškerá vylepšení nedokázala odtranit dvě velké vady materiálu. První z nich je vyvolávání mokrým procesem s následným bělením a druhým je inherentní materiálový, téměř neodstranitelný šum. Následovaly materiály jako dichromovaná želatina (DCG), rezisty, fotorefraktivní krystaly a mnoho dalších - viz [5], avšak jejich použití lze i při dobré vůli označit za okrajové v HI, na což měla bezesporu vliv jakási nevyváženost jejich parametrů kde několik výborných vlastností je zcela zastíněno jedním nebo více naprosto nevyhovujícími parametry. Dnes nejmodernějším trendem v záznamu HI je digitální záznam [6] přinášející spoustu kladů, avšak i ten má stále své velké nedostatky.

Dlouhou dobu unikaly pozornosti hlavního směru v holografických záznamových materiálech fotocitlivé polymery. Tu a tam se objevila publikace popisující funkční fotopolymer, většinou však velmi málo citlivý. Takový fotopolymerní záznam byl tak v porovnání s nejběžnějším procesem fotografickým, jež je přirozeně navíc vybaven i mechanismem zesílení (ne nevýznamným, jedná se o proces s pravděpodobně největším zesílením v přírodě avšak nevyhnutelně spojený i se zesílením šumu), byl z hlediska aplikační přijatelnosti v nevýhodě. Dnes je vývoj nových fotopolymerů nevídaně intenzivní. Podobně, i když v menším měřítku tak, jako byl vývoj fotografických emulzí v sedmdesátých a osmdesátých letech minulého století, jen s tím rozdílem, že i jednotlivci nebo malé skupiny jsou schopné dosahovat překvapivě dobrých výsledků při jejich vývoji. A tak koncový uživatel není odkázán na libovůli velkých korporací. Canon a Polaroid mají vyvinuté fotopolymery pro nejrůznější učely, jako je např. polovodičová litografie. Dupont navíc vyvinul několik typů fotopolymerů určených přímo pro holografii [7], některé z nich mají unikátní sadu vlastností (přelaďování mřížky atd.). Fotopolymery fy Dupont však nejsou komerčně dostupné, jelikož se používají pro výrobu holografických ochranných známek a výrobce se bojí jejich zneužití. Vědecká pracoviště vyvíjející fotopolymery sice většinou sdílejí přesná složení a postup výroby, často je však příprava polymeru značně náročná a vyžaduje použití těžko dostupných na objednávku syntetizovaných látek.

Je tak velmi vítanou možností získávat experimentální vzorky hotových fotopolymerů od firem jako je např. POLYGRAMA [8]. Firma má ve své nabídce experimentální vzorky tekutých fotopolymerů a také tuhých fotopolymerů ve formě filmů. Ty zatím svými vlastnostmi nemohou konkurovat tekutým fotopolymerům. Pro práci s tekutými fotopolymery je tak nutné vyvinout záznamovou strukturu, jejíž hlavní složkou je právě tekutý fotopolymer. To, spolu s nezbytnou charakterizací vytvořeného záznamového média, jež je výchozím krokem k optimalizaci jeho výsledných vlastností, je hlavní motivací této disertační práce. Ovšem s tím souvisí řada problémů, jež bylo nutné vyřešit, např. problém s vytvořením stabilní vrstvy tekutého fotopolymeru definovaných vlastností, měření vlastností záznamových struktur, jejich vyvolávání a třeba i uchycení v holografických experimentech. Záznamové struktury jež byly v rámci práce navrženy vytvořeny a charakterizovány jsou primárně určeny pro účely holografické interfereometrie a jejich použití je demonstrováno v HI experimentech. Najdou ale snadno uplatnění i mimo pole holografické interferometrie a holografie díky své vysoké difrakční účinnosti, např. při výrobě holografických optických elementů.

2. Holografický záznam a optická rekonstrukce

Holografie zahrnuje záznam a rekonstrukci optických vln. Fáze vlny je ztracena při procesu registrace. Při interferenci vln se stejnou frekvencí vzniká rozdělení intenzity časově stabilní, závisející na fázovém rozdílu $\Delta\Phi$ interferujících vln. Toho se využívá v holografii, kde je fázová informace zakódována v interferenčním obrazci, kde je pomocí interference převedena do zaznamenatelné intenzity. Osvětlením zaznamenaného interferenčního obrazce jednou ze dvou interferujících vln lze rekonstruovat druhou vlnu. Toto rekonstruované vlnové pole sestává z amplitudového a fázového rozložení, ne pouze z intenzity. Obrázek 2.1 ukazuje schématicky základní holografické uspořádání, používané pro záznam vlnového pole odraženého od povrchu objektu.
Toto pole je nazýváno objektovým polem, nebo častěji objektovou vlnou a druhé vlnové pole, nezbytné pro vznik interference, se nazývá referenční pole nebo spíše referenční vlna.



Obr. 2.1: Základní holografické uspořádání, rozdělení amplitudy.

Popis se pro jednoduchost zabývá bodovým zdrojem, to však nijak neomezuje obecnost. Díky superpozičnímu principu mohou být takto získané výsledky rozšířeny na všechny body povrchu objektu. Po osvícení objektu odráží povrch komplexní vlnové pole, studujme pouze jednu sférickou vlnu vycházející z bodu P a nazvěme ji objektovou vlnou.

$$E_p = \frac{E_{0P}}{p} e^{i(kp + \Phi)} \tag{2.1}$$

kde p je vzdálenost mezi bodem na povrchu P a bodem $Q = (x, y, 0)$ na záznamovém médiu. Časový faktor ωt vztahu je separován, je pro všechny monochromatické vlny shodné frekvence stejný, takže při výpočtu intenzity, kdy násobíme amplitudu její komplexně sdruženou hodnotou, se z příslušných členů stane jednička. Referenční vlnu předpokládejme jako sférickou vlnu, vyzařovanou v bodě R

$$E_R = \frac{E_{0R}}{r} e^{i(kr + \psi)} \tag{2.2}$$

kde r je vzdálenost mezi R a Q.
Rozložení intenzity na záznamovém médiu je

$$I(x,y) = |E_P + E_R|^2 = E_P E_P^* + E_R E_R^* + E_P^* E_R + E_P E_R^*$$

$$= \frac{E_{0P}{}^2}{p^2} + \frac{E_{0R}{}^2}{r^2} + \frac{2E_{0P}E_{0R}}{pr}\cos\big(k(r-p) + (\psi - \Phi)\big) \tag{2.3}$$

E_p je jednoduchá sférická vlna. Tato intenzita, která je prostorově proměnná (protože $p = p(x,y)$ a $r = r(x,y)$), je hologram bodového zdroje, fáze Φ objektové vlny relativní k fázi ψ referenční vlny je uložena v prostorově proměnném intenzitním poli. To je možné zobecnit pro celý soubor bodů povrchu objektu díky superpozičnímu principu. Za dobu expozice t_B obdrží záznamové médium energii

$$B(x,y) = \int_0^{t_B} I(x,y,t)\,dt \tag{2.4}$$

V případě fotopolymerního záznamového média se vytváří rozložení indexu lomu už v průběhu expozice. To celé je vhodné charakterizovat komplexním stupněm propustnosti τ, ten je obecně prostorově proměnnou funkcí.

$$\tau = \tau(x,y) = T(x,y)e^{i\theta(x,y)} \tag{2.5}$$

Reálná propustnost T závisí na přijaté energii B. Je vhodné zvolit pracovní bod v rozsahu, kde je průběh křivky téměř lineární a lze jej aproximovat přímkou.

$$T = \alpha - \beta B = \alpha t_B I \tag{2.6}$$

Aby změny okolo inflexního bodu B_0 byly malé, nastavují se amplitudy vln s poměrem 1:3 až 1:7. Výsledná reálná amplitudová propustnost po vyvolání je

$$T = \alpha - \beta t_B\big(E_P E_P^* + E_R E_R^* + E_P^* E_R + E_P E_R^*\big)$$

$$= \alpha - \beta t_B\left(\frac{E_{0P}{}^2}{p^2} + \frac{E_{0R}{}^2}{r^2}\right.$$

$$= T_0 - \beta t_B \frac{E_{0P}E_{0R}}{pr}\big(e^{i(k(r-p)+(\psi-\Phi))} + e^{-i(k(r-p)+(\psi-\Phi))}\big)$$

$$\left. + \frac{E_{0P}E_{0R}}{pr} e^{i(k(r-p)+(\psi-\Phi))} + {}^{-i(k(r-p)+(\psi-\Phi))}\right)$$

$$= T_0 - \frac{\beta t_B E_{0P}E_{0R}}{pr}\cos\big(k(r-p) + (\psi - \Phi)\big) \tag{2.7}$$

kde T_0 je střední propustnost

$$T_0 = \alpha - \beta t_B\big(E_{0P}{}^2/p^2 + E_{0R}{}^2/r^2\big)$$

Analogicky k (2.3). Pro zjednodušení berme $T = konst = 1$. Nezbytné prostorové rozlišení záznamového média lze odhadnout ze vztahu (2.8)

Je-li úhel mezi objektovou a referenční vlnou θ a obě vlny považujeme za rovinné, vzdálenost proužků činí

$$\frac{\pi}{|\boldsymbol{k}''|} = \frac{\lambda}{2\sin\frac{\theta}{2}}. \tag{2.8}$$

K provedení optické rekonstrukce postačí osvítit hologram (vyvolanou fotografickou desku s naexponovaným interferenčním polem dvou svazků) referenční vlnou E_R, viz obr. 2.2. To vede na modulaci referenční vlny komplexní propustností $\tau(x, y)$

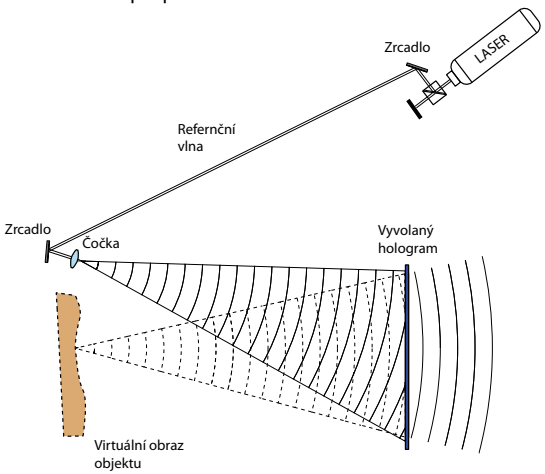
Pro případ amplitudového hologramu pole přímo za hologramem (2.7), dostáváme komplexní amplitudu

$$\begin{aligned} E_{rek} &= TE_R \\ &= \alpha E_R - \beta t_B E_R\left(E_P E_P^* + E_R E_R^* + E_P^* E_R + E_P E_R^*\right) \\ &= \left(\alpha - \beta t_B\left(|E_R|^2 + |E_P|^2\right)\right)E_R \\ &\quad - \beta t_B E_R^2 E_P^* \\ &\quad - \beta t_B |E_R|^2 E_P \end{aligned} \tag{2.9}$$

První člen za posledním rovná se, tedy

$$\left(\alpha - \beta t_B\left(|E_R|^2 + |E_P|^2\right)\right)E_R = T_0 E_R, \tag{2.10}$$

je nultý difrakční řád, často také nazývaný stejnosměrná složka. Jedná se pouze o referenční vlnu násobenou střední propustností.



Obr. 2.2: Holografická rekonstrukce.

Druhý člen

$$\beta t_B E_R^2 E_P^* = \beta t_B \frac{E_{0R}^2}{r^2} e^{i2(kr+\psi)} \frac{E_{0P}}{p} e^{-i(kp+\Phi)} \tag{2.11}$$

až na násobný faktor, je konjungovaný obraz objektové vlny. Původní vlna divergovala z

bodu , avšak vlna konjugovaná je sbíhavá vlna, která konverguje do bodu. Obraz je reálný a pseudoskopický. Opak k pseudoskopickému zobrazení se nazývá ortoskopické zobrazení, na které jsme navyklí z reálého světa. Třetí člen je originální vlna E_P násobená pouze intenzitním členem, který je v případě rovinné referenční vlny konstantou.

$$\beta t_B |E_R|^2 E_P = \beta t_B \frac{E_{0R}^2}{r^2} \frac{E_{0P}}{p} e^{i(kp+\Phi)} \tag{2.12}$$

Rekonstruovaná vlna vytváří virtuální obraz objektu, jevící se, jako by objekt stál na tom samém místě ve stejné pozici, v jaké se nacházel při zaznamenávání hologramu. Protože je to komplexní vlna, je tedy rekonstruována její amplituda i fáze. Holograficky zaznamenaná a rekonstruovaná scéna může být pozorována třídimenzionálně, tzn. že ji můžeme pozorovat s proměnnou hloubkou ostrosti a s měnící se paralaxou. Při rekonstrukci z fázového hologramu dostáváme

$$\begin{aligned} E_{rek} &= \tau E_R \\ &\approx \left((1 + i\alpha') + i\beta' t_B \left(|E_R|^2 + |E_P|^2\right)\right) E_R \\ &\quad + i\beta' t_B E_R^2 E_P^* + i\beta' t_B |E_R|^2 E_P \end{aligned}$$

Tři členy sestávají z totožných vln jako v (2.9), pouze faktory, které jim předcházejí, jsou rozdílné. Fázová konjugovaná vlna $E_{PC}(z,t)$, patřící k $E(z,t) = E_0 e^{ikz} e^{-i\omega t}$ je

$$E_{PC}(z,t) = E_0 e^{-ikz} e^{-i\omega t} \tag{2.13}$$

$E^*(z,t)$ opačně než v $E_{PC}(z,t)$, pouze prostorová část je konjugovaná. Fázově konjungovaná vlna je originální vlna šířící se opačným směrem. Konjugovaná vlna se v tomto případě, spíše než že je emitovaná a rozbíhá se z bodu, sbíhá do bodu. Kdybychom použili rovinnou vlnu jako referenční vlnu, je jednoduché vytvořit fázově konjungovanou. Musíme pouze otočit hologram o $180°$ a v případě amplitudovaného hologramu dostáváme

$$\begin{aligned} E_{rek} &= TE_R^* \\ &= \left(\alpha - \beta t_B \left(|E_R|^2 + |E_P|^2\right)\right) E_R^* \\ &\quad + \beta t_B |E_R|^2 E_P^* \\ &\quad + \beta t_B E_R^{*2} E_P \end{aligned} \tag{2.14}$$

Druhý člen v rovnici (2.14) reprezentuje reálný ortoskopický obraz v té samé pozici vztažené k hologramu, tak jako ji měl objekt při procesu zaznamenávání. Abychom dostali rekonstruovanou vlnu nezkreslenou překrytím s jinými rekonstruovanými vlnami, referenční a objektová vlna musejí být odděleny v prostoru. Gabor neměl zdroj poskytující světlo s uspokojinou koherencí, nezbylo mu tedy, než vytvářet tzv. in-line hologramy, kde se objektová a referenční vlna šíří stejným směrem a kolmo k hologramu. Leith a Upatnieks [2] byli první, kdo využili výhod koherence laserového světla k prvním experimentům s uspořádáním, kde měl objektový a referenční svazek různé směry. V jejich tzv. mimoosém hologramu byly všechny rekonstrukční vlny dobře prostorově odděleny.

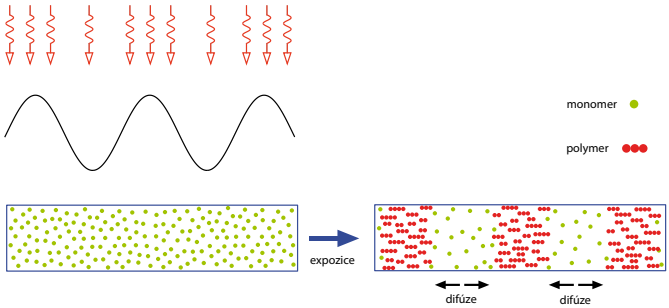
3. Fotopolymerní struktury pro záznam hologramu

3.1 Fotopolymery

Fotopolymery obecně jsou systémy monomer - polymer, které působením světla zpolymerují a tak změní své vlastnosti. Pro účely holografie a holografické interferometrie jsou významné fotopolymery které mění index lomu v exponovaných částech. Je nutné, aby materiál dokázal tyto změny zachytit s mikroskopickou přesností. V holografiii jsou opticky zaznamenávány a rekonstruovány interferenční obrazce s detailem v řádech zlomků μm. Typické rozlišení dosahuje submikrometrových hodnot tedy několika tísíc čar na milimetr. Fotopoymerní materiály mají celou řadu vynikajících vlastností. Především však u nich odpadá proces vyvolávání mokrou cestou. Tloušťku vrstvy lze libovolně nastavit, tzn. lze vyrobit záznamové médium např. s velkou selektivitou. Fotopolymery byly jako záznamový materiál pro holografii použity už v roce 1969 [46] tento fotopolymer měl citlivost asi 300 mJ/cm^2 a velmi malé rozlišení. Nedávno se na trhu objevily cenově dostupné fotopolymery POLYGRAMA [8] a jejich systémy (filmy, různé možnosti nanášení, atd.). Vlastosti těch, které se osvědčily, jsou podrobně popsány i se způsobem jejich použití. Tekuté polymery se uzavírají mezi dvě skleněné desky jejichž vzdálenost je vymezena distančními podložkami, to má výhodu, že vrstva je stejnoměrně tlustá a její tloušťku je možné libovolně nastavit. Další výhodou uzavření fotopolymeru mezi dvě skla je zamezení přístupu kyslíku k vrstvě. Po předchozích zkušenostech je možné říci, že zatím testované tekuté polymery mívají vyšší citlivost než tuhé.

3.2 Fotopolymerace

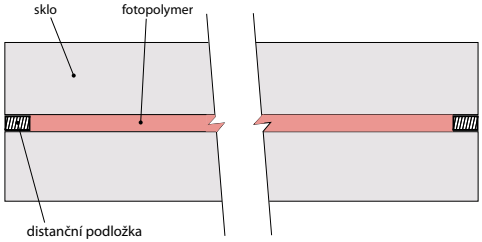
Fotopolymerace při záznamu hologramu je doprovázená difúzí obr. 3.1. Ta má majoritní vliv na modulaci indexu lomu. Před polymerací je materiál homogení směsí několika komponent jako jsou monomer, barvivo, iniciátor atd. Monomery pro jednoduchost chápejme jako nositele indexu lomu. Interferenční obrazec je struktura světlých a tmavých proužků. V oblastech světlých proužků barvivo absorbuje světlo, rozpadá se a interaguje s fotoiniciátorem, který je jakýmsi katalyzátorem fotopolymerace. Monomery se začnou spojovat do větších celků objevují se polymerní řetězce. Při polymeraci jsou však spotřebovávány monomery a dochází ke změnám koncentrace a hustoty monomerů ta vytváří gradient, který urychluje migraci monomerů z tmavých oblastí do oblastí světlých. Modulace indexu lomu nevyhnutelně nastává díky rozdílům v hustotě a složení tmavých a světlých oblastí. Difrakční mřížka se tedy formuje už v průběhu expozice a její vznik a vývoj lze sledovat v reálném čase a přímo měřit difrakční účinnost jinou vlnou délkou světla na kterou není fotopolymer citlivý. Následně provedenou expozicí bílým světlem nebo IR zářením (někdy oběma najdnou) se dokončí proces difúze a polymerace a materiál přestane být citlivý na světlo. V této fázi bývá i vrstva tekutého polymeru dostatečně tuhá její další utvrzení se provádí UV světlem.



Obr. 3.1: Fotopolymerace doprovázená difůzí monomeru.

3.3 Příprava sendvičových záznamových struktur

Pro úspěšnou experimentální práci s tekutými fotopolymery POLYGRAMA, ale i s jinými je nezbytné tyto uzavřít do struktury kupř. sklo - fotopolymer - sklo obr. 3.2, tak, že je zajištěna přesná tloušťka polymerní vrstvy a struktura je pevná a dlouhodobě stabilní. Přesná tloušťka vrstvy fotopolymeru má významný vliv na výsledné vlastnosti záznamového média. Tento typ tekutých fotopolymerů vyžaduje pokud možno vzduchotěsně uzavřít, protože přítomnost kyslíku způsobuje neaktivitu polymeru a jeho citlivost je pak velmi nízká.



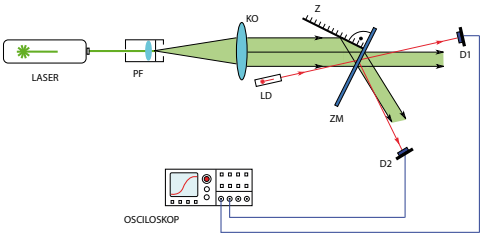
Obr. 3.2: Schématické zobrazení řezu záznamovou strukturou sklo fotopolymer sklo.

Při konstrukci záznamové struktury jsou použity dvě stejně velké obdélníkové nebo kruhové destičky ze skla s tloušťkou 2mm. Desky by měli být co nejlépe vyčištěné. Distanční podložky o předem přesně zvolené tloušťce jsou stejnoměrně rozmístěny po obvodu jedné z desek, ty následně zajistí vymezení tloušťky vrstvy polymeru. Do středu spodní desky nakapeme několik malých kapek fotocitlivého polymeru (zlomky mililtru) a přiložíme vrchní desku, kterou stlačíme tak, aby se fotopolymer rovnoměrně rozprostřel. Přesné množství fotopolymeru (počet kapek) je třeba vyzkoušet. Po přitlačení vrchní desky by celá plocha mezi deskami měla být vyplněna fotopolymerem. Je - li fotopolymeru hodně a vyteče na okraji desek, perfektně ho utřeme. Oblepíme okraj desek lepící páskou, tím se struktura zpevní a zamezíme vnikání vzdušného kyslíku. U kruhových desek je lepší toto provést na několika místech kratšími kusy pás-

ky. Experimenty bylo zjištěno jako optimální používat vrstvu polymeru o tloušťce mezi 15 - 25 μm. Distanční podložky jsou ocelové pásky (fy HASBERG) s tloušťkou 10 μm. Při použití pásku s tloušťkou 10 μm je výsledná vrstva tlustá asi 20 - 25μm. Před použitím necháme strukturu několik minut relaxovat, aby se zastavil pohyb fotopolymeru v mezeře mezi deskami a polymerní vrstva byla stabilní při expozici. Celá příprava fotopolymerní struktury musí probíhat za ochranného osvětlení, aby nedošlo k naexponování fotopolymeru. Vlnovou délku ochranného osvětlení volíme tak, aby neležela v absorbčním pásu fotopolymeru. Tedy pro práci se zeleným polymerem používáme červené ochranné osvětlení a naopak. Osvit struktury světlem s vhodnou vlnovou délkou před expozicí může být naopak využit pro zvýšení její citlivosti. Kruhové struktrury se uchycují do držáku pro tento účel specielně zkonstruovaného.

3. 4 Měření vlastností fotopolymerních záznamových struktrur

Odezva fotopolymerní záznamové struktury je testována jednoduchým harmonickým interferenčním polem, které vytvoří objemovou fázovou difrakční mřížku ve vrstvě fotopolymeru. Samovyvolávací schopnost umožní v reálném čase měřit difrakční účinnost vytvářející se mřížky. Z difrakční účinnosti je následně vypočítána modulace indexu lomu. Měření prováděná v reálném čase nesmí ovlivnit záznamový proces, a proto je vlnová délka detekčního laseru zvolena z neabsorpčního pásu záznamového materiálu. Naproti tomu u záznamového laseru je snaha, aby emitovaná vlnová délka byla v maximu absorpčního pásu. Ve skutečnosti se fotopolymery senzibilují tak, aby jejich absorpční pásy vyhovovaly vlnovým délkám nejběžnějších laserů.



Obr. 3.3: Schéma uspořádání pro měření vlastností fotopolymerních struktur.

Schéma uspořádání použitého pro měření vlastností fotopolymerních záznamových struktur je ukázáno na obr. 3.3. Za účelem měření difrakční účinnosti je materiál osvícen kolimovaným svazkem laserové diody nastaveným pod Braggovým úhlem Φ a oba svazky (difragovaný i procházející) jsou detekovány PIN fotodiodami připojenými k digitálnímu osciloskopu. Difrakční účinnost η je definována jako poměr difragované intenzity (měřené detektorem D2) a dopadající intenzity testovacího svazku z laserové diody. Účinnost η a první harmonická amplituda n_1 indexu lomu mají souvislost definovanou rovnicí 3.1, která byla odvozena z teorie vázaných vln [9]. V rovnici 3.1 je d tloušťka materiálu, λ je vlnová délka testovacího světla, Φ je Braggův úhel formující se objemové fázové mřížky.

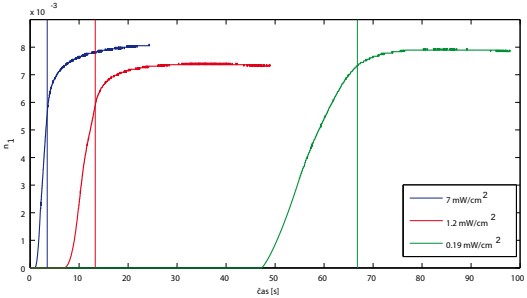
$$\eta = \frac{I_D}{I_V} = \sin^2 \frac{\pi n_1 d}{\lambda \cos \Phi} \tag{3.1}$$

Výsledkem právě popsané metody jsou časové závislosti modulace indexu lomu $n_1(t)$, které se nazývají křivkami nárůstu. Parametr $n_1(t)$ je velmi užitečný pro charakterizování a optimalizování odezvy záznamového materiálu, protože je nezávislý na tloušťce.

3. 5 Záznamová struktura s fotopolymerem POLYGRAMA SM TR 532 S - změřené charakteristiky

Měření vlastností záznamové struktury se zeleným fotopolymerem SM TR 532 S probíhá na experimentálním sestavě popsané v předchozím odstavci. Expoziční laser je Nd^{3+}:YAG s vlnovou délkou 532 nm. Měřící laserová dioda emituje na 635 nm, tedy v oblasti, kde už fotopolymerní struktura téměř neabsorbuje světlo. Měřící uspořádání bylo nastaveno na mřížkovou periodu 700 nm, což odpovídá úhlu mezi svazky 24,5 stupňe.

Časový vývoj difrakční účinnosti η formující se mřížky je získán přímo z měření a modulace indexu lomu n_1 je vypočítána za použití rovnice (3.1). Následují některá měření ilustrující závislost kvality vytvářející se mřížky na intenzitě záznamového laseru, expozičním čase, předexpozici bílým světlem.Proces vytváření mřížky byl měřen pro rozdílné expoziční intenzity. Získané křivky nárůstu jsou ukázány na obr. 3.4. Proces záznamu byl přerušen (záznamový laser vypnut), když účinnost dosáhla přibližně 60 %. Událost je označena příslušnou vertikální čarou na obr. 3.4. Proces formování mřížky pokračuje v růstu, dokonce i když je expozice přerušena. V případě vysoké záznamové intenzity formování mřížky začne velmi brzo a je rychlejší a vyšší, dodatečný nárůst modulace indexu lomu je možné pozorovat i po přerušení expozice. V případě nízké záznamové intenzity je inicializační perioda velmi dlouhá, mřížka se formuje pomalu a také dodatečný nárůst je mnohem menší. Citlivost záznamového materiálu je většinou vyjádřena v jednotkách expoziční energie. Ta je definována jako součin celkového expozičního času a intenzity.

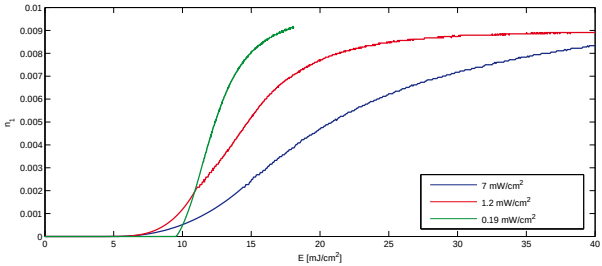


Obr. 3.4: Graf procesu vytváření mřížky pro rozdílné expoziční intenzity.Prostorová perioda interferenčního pole byla 700 nm pro všechny křivky, tloušťka vrstvy 20 µm.

Závislost modulace indexu lomu na expoziční energii lze jednoduše vypočítat

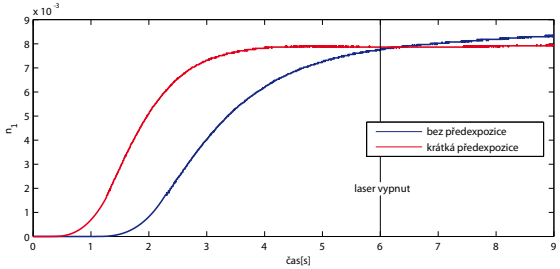
$$E = I.t \tag{4.2}$$

pak dostaneme křivky citlivosti pro záznamový materiál při různých intenzitách viz obr. 3.5.



Obr. 3.5: Závislost modulace indexu lomu na expoziční energii pro různé expoziční intenzity. Prostorová perioda interferenčního pole byla 700 nm pro všechny křivky, tloušťka vrstvy 20 µm.

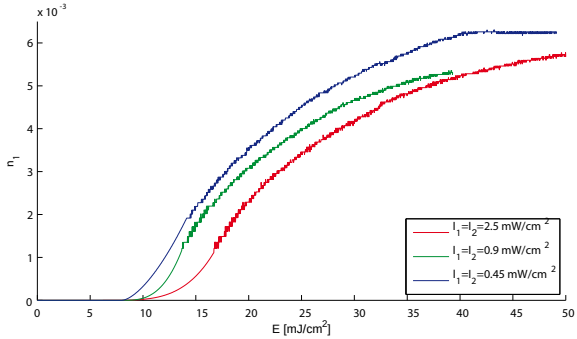
Z grafu je zřejmě vidět, že v případě nízké záznamové intenzity dávka expoziční energie nezbytná k dosažení stejné hodnoty modulace je nižší než v případě vysoké záznamové intenzity a záznamový materiál je v tomto případě citlivější.
Nakonec byly realizovány experimenty s předexpozicí záznamového materiálu bílým světlem. Inicializační perioda, kde se nevytváří mřížka, je zkrácena při použití předexpozice viz. obr. 3.6.



Obr. 3.6: Vliv předexpozice na záznamový proces. Prostorová perioda interferenčního pole byla 700 nm, záznamová intenzita 7 mW/cm^2 , tloušťka vrstvy 20 µm.

3.6 Záznamová struktura s fotopolymerem POLYGRAMA SM TR 635 - změřené základní charakteristiky

Měření vlastností záznamové struktury s červeným fotopolymerem SM TR 635 probíhá stejným způsobem jako tomu bylo v předchozím případě. Rozdíl je v laseru pro expozici, použit je He-Ne laser s vlnovou délkou 632,8 nm a vlnové délce měřící laserové diody jež emituje na 808 nm, tedy v blízké IR oblasti, kde už fotopolymerní struktura téměř neabsorbuje světlo. Měřící uspořádání bylo nastaveno na mřížkovou periodu 700 nm, což odpovídá úhlu mezi svazky 26,9 stupně.

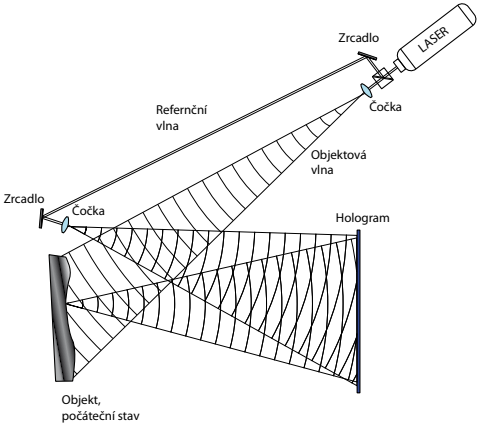


Obr. 3.7: Diferenciální index lomu a jeho nárůst v závislosti na expoziční energii pro různé záznamové intenzity. Prostorová perioda interferenčního pole byla 700 nm, tloušťka vrstvy 25 μm.

4. Holografická interferometrie - vybrané metody

4.1 Vytvoření holografického interferenčního obrazce

4.1.1 Záznam a rekonstrukce holografického interferogramu získaného metodou dvojité expozice



Obr. 4.1a: První expozice hologramu v počatečním stavu objektu.

V holografické interferenční metodě dvojí expozice jsou do jednoho záznamového média následně po sobě uloženy dvě vlnoplochy rozptýlené jedním objektem ve dvou různých stavech. V tomto případě uvažujeme jako záznamové médium fotopolymerní záznamovou struk-

turu, viz. kapitola 3, mohla by to ale být i kupř. fotografická deska. Tyto dvě zaznamenané vlnoplochy odpovídající různým stavům objektu jsou následně najednou rekonstruovány. První expozice (první záznam) je pořízen v počátečním stavu objektu viz obr. 4.1 a. Druhá expozice (druhý záznam) je provedena po fyzické změně měřeného objektu 4.1 b, změna je provedena např. zatížením objektu. Nechť komplexní amplituda první vlnoplochy v bodě objektu P je

$$E_1(P) = E_{01}(P)e^{i\Phi(P)} \tag{4.1}$$

a je holograficky zaznamenána. E_{01} je reálná amplituda a $\Phi(P)$ je fázové rozložení vlny 2.16. $\Phi(P)$ se prostorově mění díky náhodnému charakteru mikrostruktury difúzně rozptylujícího měřeného předmětu (principielně se může jednat o difúzní rozptyl odrazem nebo průchodem vlny transparentním prostředím). P označuje bod objektu. Prozatím nemusíme rozlišovat mezi bodem objektu a bodem v obrazové rovině příslušejícímu bodu objektu. Změna měřeného fyzikálního parametru jako je tvar objektu způsobený deformací difúzně odrážejícího povrchu nebo změna v rozdělení indexu lomu transparentního objektu způsobí změnu rozdělení fáze v bodě P o $\Delta\Phi(P)$, takže komplexní amplituda druhé vlnoplochy, která má být holograficky zaznamenána do stejného záznamového média je

$$E_2(P) = E_{02}(P)e^{i(\Phi(P)+\Delta\Phi(P))} \tag{4.2}$$

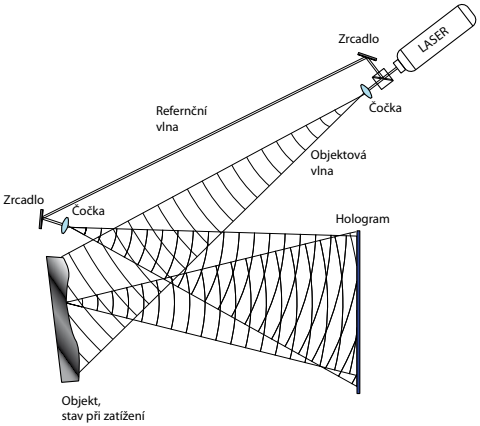
Po expozici a procesu vyvolání (běžně chemický, v našem případě optický) obě vlnoplochy jsou rekonstruovány najednou (viz obr. 4.1c). Za hologramem se šíří dvě vlny, jejich interferencí vzniká stacionární distribuce intenzity

$$\begin{aligned} I(P) &= \left| E_1(P) + E_2(P) \right| \\ &= I_1(P) + I_2(P) + \sqrt{I_1(P)I_2(P)}\left(e^{-i\Delta\Phi(P)} + e^{+i\Delta\Phi(P)}\right) \\ &= I_1(P) + I_2(P) + \sqrt{I_1(P)I_2(P)}\cos\left[\Delta\Phi(P)\right] \end{aligned} \tag{4.3}$$

Uvažujeme-li stejné amplitudy $E_{01}(P) = E_{02}(P)$, dostáváme

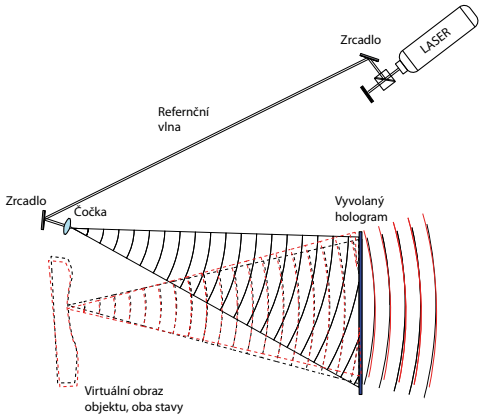
$$I(P) = 2I_1(P) + \left\{1 + \cos\left[\Delta\Phi(P)\right]\right\} \tag{4.4}$$

Změna fáze $\Delta\Phi$ se nazývá interferenční fázový rozdíl.



4.1 b: Druhá expozice hologramu objektu v zatíženém stavu.

Jestliže je prostorová variace interferenčního fázového rozdílu přes pozorovaný rekonstruovaný povrch malá, intenzitní rozdělení (4.4) odpovídá intenzitě záření odraženého z původně osvětleného objektu, ale je modulováno obrazcem interferenčních proužků majících kosinový průběh.

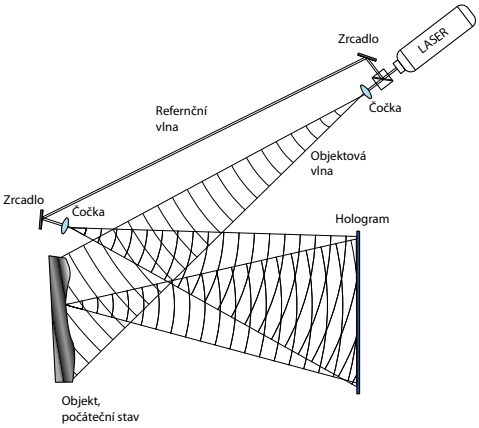


4.1 c: Rekonstrukce obou záznamů hologramu v různých stavech objektu barevně odlišených, za hologramem pozorujeme holografický interferogram.

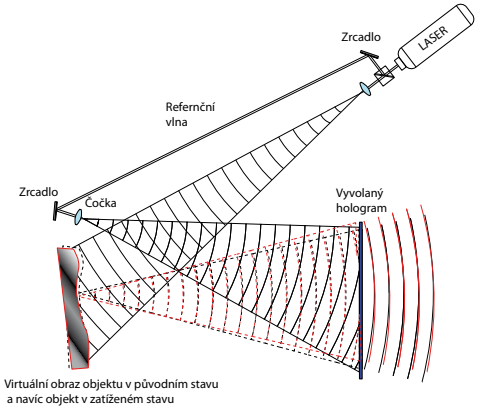
Středy světlých proužků jsou kontury, kde interferenční fáze nabývá hodnot lichých celočíselných násobků π. Středy tmavých proužků odpovídají sudým celočíselným násobkům π. Je zřejmé, že změní-li se interferenční fázový rozdíl příliš strmě, proužky přestanou být rozlišitelné (jsou příliš blízko sebe) a ztrácíme informaci o velikosti měřené změny.

4.1.2 Záznam a rekonstrukce holografických interferogramů metodou reálného času

V holografické metodě reálného času je holograficky zaznamenána pouze jedna vlnoplocha patřící výchozímu stavu testovaného objektu (viz obr. 4.2 a). Po chemickém vyvolání v případě holografických desek hologram musí být znovu umístěn do původní pozice, ve které byl zaznamenán. Umístění desky zpět do původní polohy musí být provedeno s přesností větší než vlnová délka. Tato obtíž v případě použití fotopolymerních záznamových médií úplně odpadá, protože fotopolymerní záznamová média jsou vyvolána IN SITU osvícením uniformním bílým světlem. Po osvícení vyvolaného hologramu původní referenční vlnou, rekonstruovaný virtuální obraz vlnoplochy interferuje s vlnoplochou odraženou přímo od objektu, který byl ponechán ve své původní pozici. Za hologramem se šíří dvě vlny. Původní vlna odpovídající pozici a tvaru objektu v počátečním stavu, ta je rekonstruovaná z hologramu, a přibyla vlna, která je difúzně rozptýlená povrchem testovaného objektu. Ovšem změna, kterou objekt prodělal oproti původnímu stavu zaznamenanému v hologramu, způsobí při interferenci s rekonstruovanou vlnou vznik makroskopicky viditelného interferenčního obrazce, který se mění v reálném čase tak, jak se mění tvar objektu (viz obr. 4.2 b).



Obr. 4.2 a: Expozice hologramu v počatečním stavu objektu v metodě reálného času.



Obr. 4.2 b: Rekonstrukce holografického interferogramu v metodě reálného času.

Dynamické proměny objektu vedou k okamžitým pozorovatelným změnám interferenčního obrazce. V metodě reálného času i metodě dvojité expozice interferující vlny prošly stejnými drahami. Metody odstraňují vliv rozdílných drah na výsledný interferenční obrazec (problém klasické interferometrie). Tzv. diferenciální metody. Pro dosažení maximálního kontrastu je třeba vyrovnat intenzity obou interferujících vln. Není toho třeba v metodě dvojité expozice, kde obě vlny jsou rekonstruovány z hologramu a předpokládá se jejich stejná intenzita. Jak v holografické metodě reálného času, tak v metodě dvojité expozice má vzniklá distribuce intenzity v interferenčním obrazci cosinový průběh. Při amplitudové záznamu metodě dvojité expozice se vytvoří světlé proužky v místech, kde interferenční fáze nabývá celočíselných sudých násobků π, při použití amplitudového záznamu (dnes např. CCD, CMOS) v metodě reálného času dostane-

me světlé proužky pro místa, kde $\Delta\Phi(P)$ je lichým celočíselným násobkem π. To je způsobeno záporným znaménkem před třetím členem ve vztahu 2.9, který popisuje rekonstruovaný virtuální obraz. Použití fázového záznamu v technice reálného času dostáváme stejné znaménko pro přímo rozptýlené světlo i pro rekonstruovanou vlnoplochu, což vede ke světlým proužkům v místech sudých celočíselnýchnásobků π jako v metodě dvojité expozice.
Následkem toho místa, kde nedošlo k žádným změnám $\Delta\Phi(P) = 0$, se stávají středy; světlých proužků v metodě dvojité expozice i v metodě reálného času za použití fázového záznamu. Tato místa jsou centra tmavých proužků v technice reálného času při použití fázového záznamu [57].

4.2. Holografická metoda časového středování

Nejčastěji aplikovanou metodou pro analýzu vibrací je metoda časového středování (time average holographic interferometry). V této metodě je vibrující povrch holograficky zaznamenán expozičním časem mnohem delším, než je perioda vibrací $T \gg 2\pi/\omega$. Expoziční čas se řídí citlivostí záznamového média. Fotopolymerní záznamová média nejsou natolik citlivá, aby docházelo k problémům nebo omezením pro frekvence větší než desítky Hz. Běžné expozice se pohybují v řádech sekund až minut. Opět uvažujme harmonické vibrace dané vztahem 4.5. Potom holograficky zaznamenáme a rekonstruujeme spojité spektrum vln, z nichž každá má tvar

$$E_{01}(P)e^{i\Delta\Phi(P)\sin(\omega t)} \tag{4.5}$$

Tato množina vln rekonstruovaná najednou interferuje a dává tvar.

$$E(P) = \lim_{T\to\infty}\frac{E_{01}(P)}{T}\int_0^T e^{i\Delta\Phi(P)\sin(\omega t)dt}$$

$$= E_{01}(P)J_0\left(\Delta\Phi(P)\right) \tag{4.6}$$

Jedná se o zobecněný případ dvouexpoziční metody pro kontinuum expozic, nejvýrazněji se na formování hologramu podílejí vlny odrážející se od povrchu předmětu v maximu a minimu výchylky vibrací (povrch objektu na okamžik stojí), ostatní vlny jsou jaksi rozmazány a jejich příspěvek je menší. Způsobují pokles kontrastu proužků s vyšším řádem.
Intenzita, kterou pozorujeme v rekonstruovaném obrazu je

$$I(P) = I_1(P)J_0^2\left(\Delta\Phi(P)\right) \tag{4.7}$$

Pozorované proužky jsou v tomto případě kontury stejných amplitud vibrací prostorových vibračních módů (můžeme si je představit jako jakési vrstevnice). Maximální intenzita náleží místům s $\Delta\Phi(P) = 0$, a ty příslušejí uzlovým bodům kmitání $J_0(0) = 1$.
Přepíšeme rovnici 5.10 do tvaru

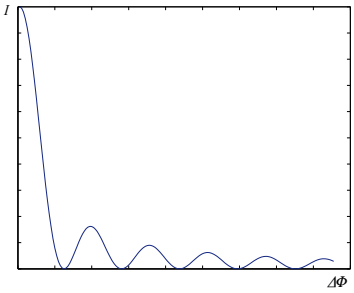
$$I(P) = I_0(P)J_0^2\left[\boldsymbol{d}(p).\boldsymbol{e}(p)\right] \tag{4.8}$$

Tmavé středy proužků příslušejí místům kde $\boldsymbol{d}(p).\boldsymbol{e}(p)$ odpovídá nulovým bodům Besselovy funkce prvního druhu nultého řádu J_0. Kontrast proužků klesá se zvyšujícím se řádem, viz. obr. 4.3. Světlé proužky mezi nulovými místy, které neodpovídají uzlovým bodům, mají men-

ší intenzitu, a tak je snadné určit uzlové body. Uvažujme pro jednoduchost rovinný vibrující povrch a holografické uspořádání takové, že vektor osvětlení i pozorování je kolmý k povrchu $\boldsymbol{d}(P) = (0, 0, d_z(P))$,potom $\boldsymbol{e}(P) = 4\pi/\lambda$ a amplitudy ve středech tmavých proužků vypočítáme ze vztahu

$$d_z(P) = b_m \frac{\lambda}{4\pi}. \qquad 4.9$$

kde b_m je $m-$ tý nulový bod Besselovy funkce prvního druhu nultého řádu. Řád proužku je daný následovně. První proužek kde $m = 1$ je proužek sousedící s nulovým proužkem, tedy uzlovou linií.



Obr. 4.3: Časově vystředovaná intenzita.

V případě tenkých desek a skořepin lze předpokládat vektor vibrací kolmý k povrchu (tzv. OUT OF PLANE) vibrace, všechny ostatní vektory (tzv. IN PLANE) mohou být zanedbány. Připustíme-li tato zjednodušení, interferenční proužky jsou interpretovány jako kontury (vrstevnice) vibračních módů. Uvažujeme - li obecnější případ vibrací, kde směr vektoru vibrací nelze jednoznačně stanovit. Nezbývá než provést nejméně tři holografická pozorování s různým vektorem citlivosti. Následně musíme vyhodnotit soustavu tří lineárních rovnic nebo řešíme problém nejmenších čtverců. Interpretace nejsvětlejšího proužku jako uzlové linie může být ošidná pro složitější pohyby některých objektů. Citlivost metody je limitována hodnotou asi *λ/4* jak je zřejmé z rovnice 4.9 a i z obr. 4.3. Derivace Besselovy funkce prvního druhu nultého řádu má okolo nuly téměř nulový sklon. Malá změna amplitudy se v rekonstruovaném obraze neprojeví změnou v intenzitě. Pro zvýšení citlivosti je možné techniku upravit a zdokonalit viz. další odstavec.

5.2.1 Modulované vlny v technice časového středování

V holografické metodě časového středování klesá u proužků vyššího řádu kontrast. Tomu lze zabránit aplikací stroboskopické techniky. Její princip spočívá v osvětlení objektu po velmi krátkou dobu pouze v maximu a minimu výchylky při vibrování, kontrast vzrůstá a s ním však také i expoziční čas nutný pro naexponování hologramu. Stroboskopická technika, ve které je jak referenční, tak i objektová vlna časově modulována je speciálním případem obecného velmi užitečného přístupu modulování vlnových polí při záznamu hologramu. Pro různé jiné účely

není nezbytné, aby se $f_{obj}(t) = f_{ref}(t)$ jako ve stroboskopické technice. V mnoha případech při aplikaci konceptu modulování vlnového pole si vystačíme s modulováním pouze referenční vlny. Existuje několik principielně odlišných způsobů jak modulovat referenční vlnu při záznamu hologramu, jež nabízejí množství výhod. Kupř: zvýšení citlivosti pro malé amplitudy vibrací, detekce relativní fáze mezi kmitajícími body na povrchu měřeného vzorku, kompenzace nežádoucích pohybů objektu a mnoho dalších. Podrobnosti o přínosech modulování referenční vlny a možné dosažitelné výsledky jsou diskutovány v [10], [11]. Z pohledu měření vibrací je však stěžejní možnost zvýšení nebo snížení citlivosti techniky časového středování. Jestliže jsou objektová vlna E_P a referenční vlna E_R modulovány funkcemi $f_{obj}(t)$ respektive $f_{ref}(t)$, je výsledná intenzita v rovině hologramu v čase t úměrná

$$I(t) = \left| f_{obj}(t)E_P + f_{ref}(t)E_R \right|^2. \tag{4.10}$$

Uvažujeme - li lineární záznam, amplitudová propustnost hologramu je viz. 3.3.

$$T = \alpha - \beta \int_0^T \left| f_{obj}(t)E_P + f_{ref}(t)E_R \right|^2 dt. \tag{4.11}$$

Pro rekonstrukci je hologram osvícen nemodulovanou referenční vlnou E_R. Třetí člen (2.6) popisující komplexní amplitudu vlnového pole je úměrný

$$M_T = \frac{1}{T} \int_0^T f_{obj}(t)E_P + f^*_{ref}(t)dt. \tag{4.12}$$

Výraz M_T se nazývá charakteristická funkce [12],[13], její úplný význam a různá pojetí není možné důkladně probrat. Výsledná intenzita je $I = |M_T|^2$. Charakteristická funkce pro případ zvyšování a respektive snižování citlivosti je předmětem dalšího rozboru.

Nechť povrch objektu harmonicky kmitá s frekvencí ω, pak je objektová vlna úměrná $e^{[i\boldsymbol{d}(P)\boldsymbol{e}(P)\sin(\omega t)]}$ a současně je $f_{obj}(t) = 1$. Ve frekvenčně modulované holografické interferometrii je referenční vlna modulovaná celočíselným násobkem $n\omega$ frekvence vibrací povrchu měřeného objektu

$$f_{ref}(t) = e^{(in\omega t)}. \tag{4.13}$$

Výsledná charakteristická funkce je úměrná

$$M_T = \frac{1}{T} \int_0^T e^{[i\boldsymbol{d}(P)\boldsymbol{e}(P)\sin(\omega t)]} e^{(in\omega t)} dt. \tag{4.14}$$

Použijeme-li identitu a obrátíme-li pořadí integrování a sumace dostaneme

$$\begin{aligned} M_T &= \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_m\left[\boldsymbol{d}(P)\boldsymbol{e}(P)\right] e^{(im\omega t)} e^{(-in\omega t)} dt \\ &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_m\left[\boldsymbol{d}(P)\boldsymbol{e}(P)\right] \frac{1}{T} \int_0^T e^{[i(m-n)\omega t]} dt \end{aligned} \tag{4.15}$$

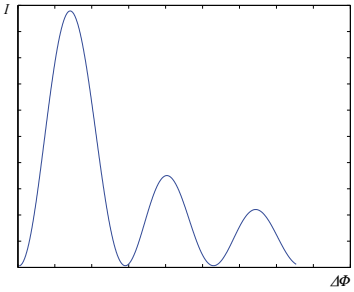
Je-li expoziční čas mnohem delší než je perioda vibrací, $T \gg 2\pi/\omega$, integrál vymizí pro všechna m kromě případu kdy $m = n$, tak že

$$M_T = J_n\left[\boldsymbol{d}(P)\boldsymbol{e}(P)\right] \tag{4.16}$$

nebo

$$I(P) = J_n^2\left[\boldsymbol{d}(P)\boldsymbol{e}(P)\right] \tag{4.17}$$

Výsledek je v souladu s případem nemodulované metody časového středování pro $n = 0$. Proporční faktor ovlivňující pouze celkový jas obrazu byl zanedbán.



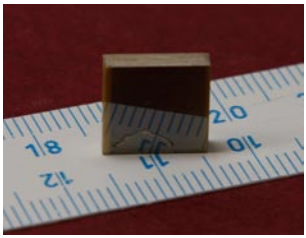
Obr. 4.4: Časově vystředovaná intenzita, při modulování frekvence referenční vlny, stejnou frekvencí, jakou kmitá objekt.

Holografická interferometrie s frekvenční modulací referenční vlny se dobře uplatní při řešení problémů kde je nezbytné zvýšení citlivosti metody při měření vibrací s malými, ale i velkými amplitudami. Malé amplitudy jsou takové, kdy interferenční fáze $\Delta\Phi(P) = \boldsymbol{d}(P).\boldsymbol{e}(P)$ je malá v porovnání s jednotkou $\Delta\Phi(P) \ll 1$. V holografické metodě časového středování má výsledná funkce modulace $J_0^2(0)$ (sudá funkce) jednotkovou intenzitu obrazu a nulovou derivaci okolo nuly. To prakticky znamená, že při malé změně amplitudy v blízkosti nuly nepozorujeme téměř žádnou změnu jasu. Na druhou stranu funkce $J_1^2(0)$ (lichá funkce) má velkou kladnou hodnotu derivace okolo nuly. V temném poli tedy pozorujeme i malé změny intenzity. Nejmenší detekovatelná amplituda vibrací při aplikaci metody s časově frekvenčně modulovanou vlnou byla odhadnuta na $2,7 \times 10^{-4}\lambda$ [14]. Tato hodnota do značné míry závisí na schopnosti potlačit jas pozadí při rekonstrukci hologramu způsobený šumem a několika dalších faktorech [15]. SHE emulze se v tomto ohledu nemohou poměřovat s fotopolymerními záznamovými strukturami. U SHE částicový charakter média způsobuje inherentní šum. Fotopolymerní média jsou v této oblasti výborná, netrpí totiž v porovnání s SHE téměř žádným šumem. V případě sledování velkých amplitud využijeme faktu, že místa, ve kterých nabývá Besselova funkce nulových bodů se od sebe vzdalují se vzrůstajícím řádem funkce. Výsledkem je snižování počtu proužků pro danou amplitudu vibrace se zvyšujícím se řádem funkce. Což omezí příliš velké hustoty proužků při velkých amplitudách a zjednoduší jejich rozlišení .

Obecná časově periodická objektová vlna může být uvažována jako složenina členů Fourierovy řady majících frekvence $\omega_0 + m\omega$, $m = 0, \pm 1, \pm 2$, kde ω_0 značí frekvenci světla emitovaného laserem. Referenční vlna v metodě s frekvenčně modulovanou vlnou je $\omega_0 + n\omega$. Tedy pouze frekvenční složka s $m = n$ vytvoří časově středovaný hologram, protože právě tato složka je koherentní s referenční vlnou. Tím získáváme elegantní metodu pro časovou filtraci právě jedné frekvenční složky z periodického pohybu objektu. Provedení frekvenční modulace svazku je popsáno např. v [64]. Blíže je o této problematice pojednáno v experimentální části práce.

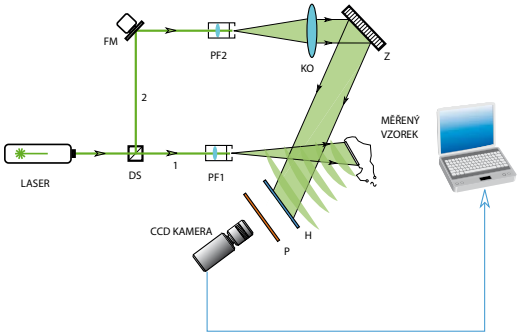
5. Vybrané experimenty

5.1 Měření deformace čela piezoelektrického multivrstvého aktuátoru (multistacku)



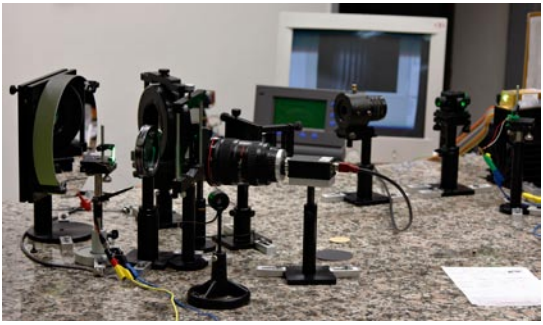
Obr. 5.1: Piezoelektrický multivrstvý aktuátor (stack).

Piezoelektrické multistacky obr. 5.1 se používají jako mikroaktuátory.K jejich rozšíření dochází především díky stále klesající pořizovací ceně. Pro přesné aplikace je však nutné změřit charakteristické vlastnosti daného stacku, neboť výrobce je udává pouze v jistém rozmezí a s velkou odchylkou. Není také možné získat tvar deformace čela stacku jinak než přesným měřením, a to nejlépe v celé ploše čela. Výrobce v dokumentaci uvádí, že při posunutí čela stacku dochází k jeho minimální deformaci a udávané posunutí čela stacku činí při napětí 100 V několik mikrometrů. Pro experiment bylo zvoleno standardní uspořádání, které se osvědčilo při měření objektů s difúzně odrážejícím povrchem uvedené na obr. 5.2.

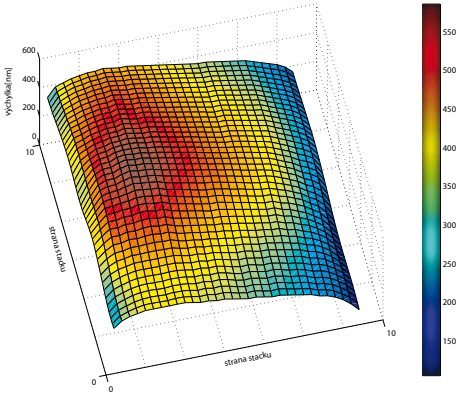


Obr. 5.2: Schéma uspořádání pro měření objektů s difúzně reflexním povrchem, DS - dělič svazku, FM - fázový modulátor, PF - prostorový filtr, KO - kolimační objektiv, Z - zrcadlo, H - hologram, P - polarizační filtr.

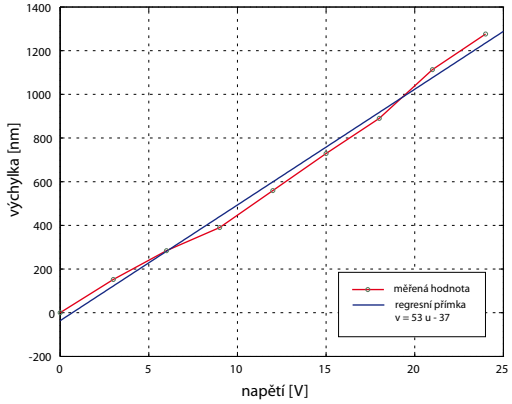
Graf posunutí v místě s největší výchylkou je na obr. 6.9. Výchylka má tvar téměř přesné lineární funkce napětí, přivedeného na elektrody „stacku". Malé odchylky od absolutní linearity lze připsat chybám měření. Pro napětí 12 V je největší výchylka asi 550 nm. Výrobce udává, že pro 100 V je výchylka asi 5,5 µm, při předpokladu linearity i u vyšších napětí je to v dobré shodě s experimentem.



Obr. 5.3: Holografický interferometr pro měření deformace čela multivrstvého piezoelektrického

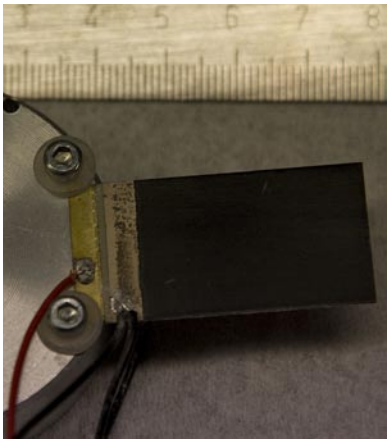


Obr. 5.4: Deformace čela stacku po vyhodnocení při napětí 12 V na elektrodách stacku.

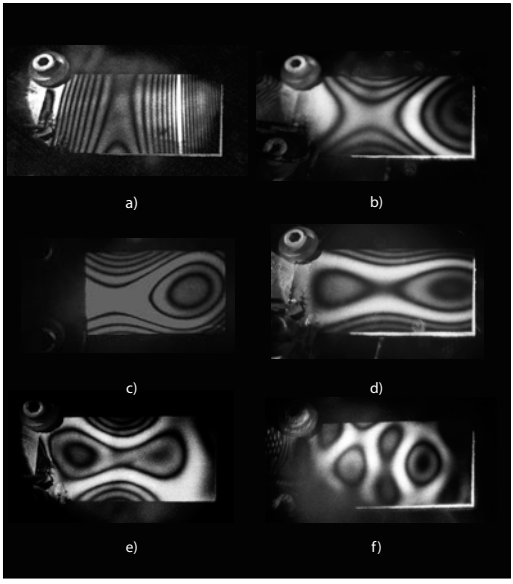


Obr. 5.5: Největší výchylka čela stacku v závislosti na budícím napětí pro 0 - 24 V. 6.2

5.2 Měření vibrací piezoelektrického bimorfu



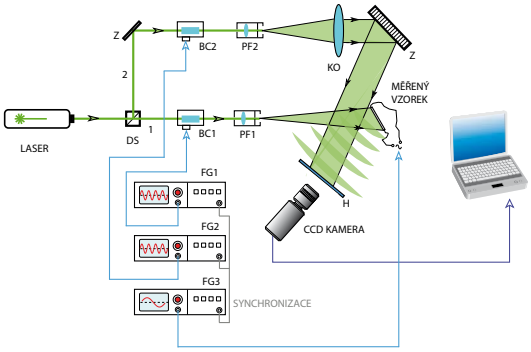
Obr. 6.7: Piezoelektrický bimorf a jeho uchycení.



Obr. 6.8: Vibrace piezoelektrického bimorfu, sinusový budící proud: a) 1KHz, 1V , b) 2KHz, 2V, c) 3KHz, 2V, d) 4KHz, 3V, e) 8KHz, 3V, f) 16 KHz, 8V

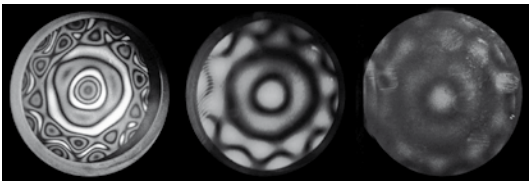
5.3 Frekvenční modulování svazku Braggovými celami - experiment

Experimentální uspořádání je na obr. 5.9, neliší se příliš od uspořádání používaného v metodě časového středování. Rozdíl je v tom, že do obou svazků za děličem je vložena Braggova cela. Při pečlivém nastavení Braggova úhlu je možné získat až 85 % difrakční účinnost cel. Řídící jednotky Braggových cel jsou napojeny na funkční generátory RIGOL s rozsahem do 50 MHz, které jsou navzájem synchronizovány. S oběma Braggovými celami je synchronní i generátor, sloužící jako zdroj signálu pro měřený vzorek. Základní frekvence cel je nastavena na 40 MHz.



Obr. 5.9: Schéma uspořádání pro metodu časového středování s frekvenčně modulovanou referenční vlnou za použití Braggových cel, DS - dělič svazku, BC -Braggova cela, PF - prostorový filtr, KO - kolimační objektiv, Z - zrcadlo, H - hologram, FG -funkční generátor.

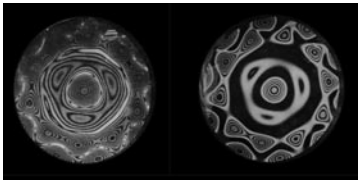
Příklad pro modulační frekvenci 8 kHz a frekvenci kmitání vzorku 8 kHz, tedy J_1 je mna obr.5.9.



a) b) c)

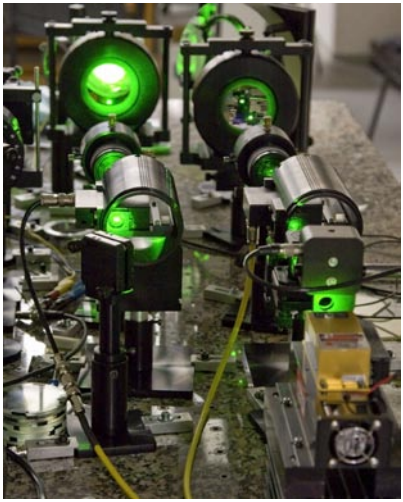
Obr. 5.10: a) je interferogram pořízený klasickou technikou časového středování (obě cely pracují na stejné frekvenci), frekvence aktuátoru je 8kHz, amplituda budícího sinusového napětí 5V, maximální výchylka je přibližně 400 nm, b) interferogram pořízený technikou časového středování s modulovanou referenční vlnou, frekvence aktuátoru 8 kHz, amplituda budícího sinusového napětí 500mV, maximální výchylka asi 40 nm (odhad), c) interferogram pořízený technikou časového středování s modulovanou referenční vlnou, frekvence 8 kHz, amplituda budícího sinusového napětí 50 mV, maximální výchylka asi 4 nm (odhad).

Uspořádání, kde je modulace svazku zajištěna braggovými celami, dovoluje velké modulační frekvence a kontrast obrazu je dostatečný a bez dalších úprav lze dosáhnout rozlišení asi 2 nm. Je také možné v tomto uspořádání snižovat citlivost metody, a to volbou modulační frekvence tak, aby byla celočíselným násobkem kmitání vzorku větším než jedna. Snižování citlivosti metody nalezne uplatnění při měření kmitání s amplitudami v řádech desítek až stovek μm, kde by již nebylo možné rozlišit vzniklé proužky. Příklad pro modulační frekvenci 80 kHz a frekvenci kmitání vzorku 8 kHz, tedy J_{10} je na obr. 6.11. Z obrázku je patrné, že klesne hustota i počet proužků i když je amplituda výchylky v obou případech stejná stejná.



a) b)

Obr. 6.11: a) je interferogram pořízený klasickou technikou časového středování (obě cely pracují na stejné frekvenci), frekvence aktuátoru je 8kHz amplituda budícího sinusového napětí 15V maximální výchylka je přibližně 1,2 μm, b) interferogram pořízený technikou časového středování s modulovanou referenční vlnou, modulační frekvence 80 kHz, frekvence aktuátoru 8 kHz amplituda budícího sinusového napětí 15V.



Obr. 6.12: Holografický interferometr pro měření vibrací technikou časového středování s modulovanou referenční vlnou.

6. Závěr

V této práci byly studovány vlastnosti připravených fotopolymerních struktur určených pro záznam hologramu v metodách holografické interferometrie. Fotopolymerní záznamové struktury nevyžadují vyvolávací proces v klasickém slova smyslu a hologram je plně funkční ihned po expozici. Je však nestabilní, ale pro jeho stabilizaci postačí osvit záznamové struktury bílým světlem. Fotopolymerní záznamové struktury mohou dosahovat teoreticky až 100% difrakční účinnosti a vysokého diferenciálního indexu lomu. Šum mají menší než nejběžněji používané stříbrohalidové emulze.

Hlavní přínosy této práce jsou následující:

- Návrh a příprava fotopolymerních záznamových struktur.

- Sestavení detekčního a expozičního uspořádání pro měření vlastností fotopolymerních záznamových médií v reálném čase a sledování nárůstu difrakční mřížky.

- Změření vlastností navržených fotopolymerních záznamových struktur s komerčně dostupnými fotopolymery POLYGRAMA, citlivými v zelené i červené oblasti. Byly měřeny křivky nárůstu difrakční účinnosti a diferenciálního indexu lomu v závislosti na čase a na přijaté energii. Dále byly odzkoušeny možnosti zvýšení citlivosti struktury předexpozicí bílým světlem. Navíc byly prakticky testovány způsoby stabilizace a fixace záznamu po expozici. Z těchto poznatků vzešla praktická doporučení k optimalizaci a použití struktur pro záznam hologramů.

- Navržené fotopolymerní záznamové struktury byly optimalizovány a následně testovány v reálných holografických experimentech.

- Byly provedeny experimenty holografické interferometrie zaměřené na zkoumání deformace piezoelektrického multivrstvého aktuátoru metodou reálného času. Byly měřeny vibrace piezoelektrických unimorfů a bimorfů metodou časového středování a vibrace s velmi malými amplitudami metodou časového středování s modulovanou referenční vlnou. Bylo odzkoušeno zviditelňování teplotního pole uvnitř kavity tepelného zařízení.

- Při měření malých amplitud metodou časového středování s referenční vlnou modulovanou pomocí Braggových cel bylo díky vlastnostem fotopolymerních záznamových médií dosaženo rozlišení v řádech jednotek nm. Modulace Braggovými celami má velký potenciální rozsah modulační frekvence od jednotek Hz až do desítky Mhz a vysokou hodnotu promodulování svazku.

Všechna tato měření a návrhy byly podpořeny důkladnou rešerší v úvodních kapitolách práce. Experimentální kapitola práce potvrzuje oprávněnost předpokladu výhodnosti použití fotopo-

lymerních záznamových struktrur jako záznamových médií pro holografickou interferometrii. Fotopolymerní záznamová média jsou více než rok s úspěchem používána v laboratoři optických metod měření, Fakulty mechatroniky TUL. Jen obtížně si lze představit návrat k původně používaným halogenostříbrným médiím, a to především kvůli nesrovnatelně pracnějšímu vyvolávacímu procesu.

Mezi hlavní výhody navržených fotopolymerních médií patří:

- Absence mokrého vyvolávacího a bělícího procesu. Hologram je plně funkční ihned po expozici.
- IN - SITU prováděný stabilizační a vytvrzovací proces hologramu.
- Vysoká difrakční účinnost, velké rozlišení, vysoký diferenciální index lomu, umožňující použití tenké vrstvy záznamového média, což vede k odstranění problému s velkou selektivitou.
- Nízký šum.
- Nízké pořizovací náklady a obecně nenáročná práce s médii.

Vzhledem k tomu, že tato práce je jakousi pilotní studií a ne zcela všem vlastnostem a parametrům struktur byla věnována patřičná pozornost, bude výzkum fotopolymerních záznamových struktrur i jejich aplikaci v metodách holografické interferometrie pokračovat. Mezi směry příštího výzkumu by neměly chybět:

- Přesná měření charakteristik šumu záznamu, a to nejenom v monochromatickém světle. Vliv osvitu a utvrzovacího procesu na šum. Stárnutí záznamu a jeho vliv na difrakční účinnost a šum.
- Statistická měření již dříve změřených charakteristik.
- Další zvýšení citlivosti metody s frekvenčně modulovanou referenční vlnou.
- Příprava vlastních fotopolymerů s cílem dosáhnout co nejlepších charakteristik.

Práce byla primárně určena pro výzkum vlastností navržených fotopolymerních záznamových médiií a jejich aplikaci v metodách holografické interferometrie. Doufejme, že poslouží jako vodítko pro další experimentální práce na tomto poli. Fotopolymerní záznamové struktury se díky svým vlastnostem zcela jistě uplatní i v jiných oborech, jako je například, obrazová holografie. Jinou zajímavou aplikací, která je v současné době zkoumána, je jejich použití jako platforem pro výrobu holografických optických elementů, a to jak rovinných, tak vytvořených na zakřivených površích.

Literatura:

[1] GABOR, D.: Nature, 161, 1948, pp. 777 - 778.

[2] LEITH, E. N., UPATNIEKS, J.: Optical Society of America 52, 1962, pp. 1123 - 1130.

[3] IWASAKI M. , KUBOTA T. , and TANAKA T. . Preparation of new ultra-fine-grain emulsion for holography. J. Photographic Science, 41:112–113, 1993.

[4] BJELKHAGEN, H., I.: Selected Papers on Holographic Recording Materials, SPIE Press Washington, 1996.

[5] TRÄGER, F.: Springer Handbook of Lasers and Optics. Springer, 2007. ISBN: 978-0-387-95579-7.

[6] digitalni zaznam

[7] TROUT, T., J., SCHMIEG, J., J., GAMBOGI, W., J., WEBER, A., M.: Optical Photopolymers: Design and Applications. Advanced Materials, Vol. 10, No. 15, 1998, pp. 1219 - 1224.

[8] Polygrama, Brasil. http://polygrama.com.

[9] KOGELNIK, H.: Coupled Wave Tudory for Thick Hologram Gratings. The Bell System Technical Journal. Vol. 48, Nr. 9.The American Telephon and Telegraph Company, USA, 1969.

[10] KREIS, T.: Handbook of Holographic Interferometry – Optical and Digital Methods. Weinheim, Germany. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005. ISBN 3-527-40546-1.

[11] RASTOGI, P. K.: Holographic Interferometry – Principles and Methods. Heidelberg, Germany. Springer – Verlag, 1994. ISBN 0-387-57354-2.

[12] ALEKSOFF, C., C.: Temporally Modulated Holography. Applied Optics, Vol. 10, No. 6, June 1971, pp. 1329 - 1341.

[13] STETSON, K. A.: Envelope Factors Due to Laser Modulation in Time-Average, Holographic, Vibration Analysis. Vol. 62, December 1971, pp. 698 - 700.

[14] UEDA, M., MIIDA, S., SATO, T.: Signal-to-noise Ratio and Smallest Detectable Vibration Amplitude in Frequency-Translated Holography. Applied Optics, Vol. 15, No. 11, November 1076, pp. 2690 - 2694.

[15] VIKRAM, C., S.: Advantage of Frequency Translation Error in Shifted Reference Holography. Optik, Vol. 50, No. 3, 1978, pp. 251 - 254.

Seznam vlastních prací:

[1] RAIL Z., LÉDL V., JAREŠ D.: Imaging System for Spectrograph with Multichanell Šolc Filter. In proceedings of the international conference The man in his terrestrial and cosmic neighbourhood. Úpice: Hvězdárna Úpice, 16. – 18. 5. 2006, ISSN 1029-7006. This paper was supported by Projekt 1SQ100820502: „Podpora projektů cíleného výzkumu AV ČR".

[2] RAIL Z., LÉDL V., JAREŠ D: Schmidt-Cassegrain Telescopes. In proceedings of the international conference The Man in His Terrestrial and Cosmic Neighbourhood. Úpice: Hvězdárna Úpice, 22. – 24. 5. 2007,. This paper was supported by Projekt 1SQ100820502: „Podpora projektů cíleného výzkumu AV ČR".

[3] SALAČOVÁ J., LÉDL V.: Contour Selection for Voids of Real Woven Composite Structure. In proceedings of The 14th International Conference on Composites / Nano Engineering. Colorado: Bromfield.

[4] LÉDL V , SALAČOVÁ J..: The Convolution Analyzer for Recognition and Segmentation of Woven Composite Structure. In Technical Computing Prague 2007 Proceedings of Conference. Praha, 14. 11. 2007, ISBN 978-80-7080-658-6. This paper was supported by the Czech Scientific Foundation within project No.106/03/H150 and by Ministryof Education, Youth and Physical Training VCT II - 1M4674788501.

[5] LÉDL V., KVĚTOŇ M. Characterization and Application of New Photopolymer Recording Media for Usage in Holography, In proceedings of the international conference Photonics Prague 2008, ISBN bude přiděleno, We gratefully acknowledge the support of „Research Centre TEXTIL II" of the program Research Centers, contract No. 1M0553 The research was supported by the Ministry of Education Research Plan No. 60840770022

[6] SALAČOVÁ J., LÉDL V.: Využití matlabu pro inovaci výuky textilních inženýrů. Technical Computing Prague 2008 Proceedings of Conference. Praha, 11. 11. 20087, ISBN 978-80-7080-692-0. Projekt byl podpořen z fondu rozvoje vysokých škol 1696/2008

[7] YEN-CHIH CHEN, TOMÁŠ VÍT, VÍT LÉDL, JOZEF KORDÍK, FRANTIŠEK MARŠÍK, AN-BANG WANG, ROMAN DOLEČEK, ZDENĚK TRÁVNÍČEK, Thermoacoustic prime mover - demonstration and preliminary experiments. ISBN bude přiděleno.

***Užitný vzor č.18622:** Zařízení na přesné celoplošné leštění sférických těles.*
Majitel: Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i., Praha
Původce: Jareš Daniel, Ing., Vít Lédl, Ing., Melich Radek, Mgr.