



UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
Katedra optiky

Pavel Vlček

Digitální holografie

Bakalářská práce

*Studijní obor: Přístrojová optika
prezenční forma navazujícího studijního programu N1701 - Fyzika*

Vedoucí práce: RNDr. František Petráš

2014

Prohlašuji, že jsem vytvořil tuto bakalářskou práci samostatně pod vedením pana RNDr. Františka Petráše a v seznamu použité literatury jsem uvedl všechny zdroje, ze kterých bylo čerpáno při zpracování práce.

V Olomouci dne 24. července 2014

Podpis:.....

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce RNDr. Františku Petrášovi za veškerou podporu, kterou mi při psaní práce poskytl v podobě připomínek rad a námětu, za pomoc s hledáním zdrojových materiálů a za čas strávený v laboratoři.

Anotace

Tato práce je věnována holografii, obecnému seznámení se s problematikou a především digitální holografii a základním metodám nastavení, tedy metodě in-line (osové) a off-axis (mimoosové), pro záznam interferogramu (tzv. hologramu), pomocí digitální kamery. Práce se také zaměřuje na vlastnosti laserové diody v blízké infračervené oblasti, v našem případě 975 nm, v digitální holografii. Tato práce je zaměřena především experimentálně.

Klíčová slova: holografie, digitální holografie, hologram, in-line, off-axis, interference, koherence, difrakce, infračervené, laser, foveon

Abstract

This thesis deals with holography, a general explanation of the issue and especially digital holography and basic methods of setting, a method of in-line and off-axis for recording the interferogram (the hologram), using a digital camera. The work also focuses on the properties and use of a laser diode for digital holography in the near infrared region, in our case 975 nm. This work is focused experimentally.

Keywords: holography, digitalholography, hologram, in-line, off-axis, interference, coherence, diffraction, infrared, laser, foveon

OBSAH

ÚVOD.....	7
1. Základní principy holografie	8
1.1 Popis světla jako vlnění	8
1.2 Interference	9
1.3 Koherence	10
1.4 Difrakce	11
1.5 Shannonův teorém	11
2. Holografie.....	13
2.1 Klasická holografie.....	13
2.2 Digitální holografie.....	14
3. Metody uspořádání	15
3.1 Metoda In-line (osová)	15
3.2 Metoda Off-axis (mimoosová)	19
4. Kamera HVDUO-10M – Foveon X3	23
4.1 Senzor Foveon X3	25
4.2 Rozlišení	26
4.2.1 Vlastnosti obrazového snímače	26
4.2.2 Rozložení optické soustavy	28
5. Rekonstrukční program	30
5.1 Fresnelova difrakční metoda	30
5.2 Konvoluční metoda.....	31
5.3 Kirchhoffův-Helmholtzův rekonstrukční algoritmus	31
5.4 Rekonstrukce metodou Fresnelovy difrakce v programu Matlab	32
6. Popis experimentu	35
6.1 Měření koherenční délky infračervené laserové diody 975 nm	35
6.2 Parametry laserové diody (975nm Fiber Bragg Grating Pump Laser).....	36
6.3 Uspořádání in-line (osové)	38
6.4 Záznam hologramu a rekonstrukce pro sestavu in-line	40
6.5 Uspořádání off-axis (mimoosové).....	49
6.6 Záznam hologramu a rekonstrukce pro sestavu off-axis	50
Závěr.....	51
Použité zdroje a literatura	52

ÚVOD

Cílem této bakalářské práce byla snaha seznámit se s holografií všeobecně a především s digitální holografií a to jak teoreticky tak experimentálně. Porovnat jednotlivé metod pro záznam a rekonstrukci holografického interferogramu (hologramu). Také jsme se snažili experimentálně ověřit, jaké možnosti poskytuje námi použitá laserová dioda pracující v blízké infračervené oblasti. V našem případě laserová dioda generuje záření o vlnové délce 975 nm. Práce byla zaměřena především experimentálním směrem a představuje velké množství času stráveného v laboratoři. Práce se zabývá základními teoretickými poznatky z optiky, které se týkají jak všeobecně holografie, tak digitální holografie. Jsou zde také rozebrána základní optická uspořádání, kterými jsou In-line (osové), pro předměty transparentní a Off-axis (mimoosové), pro netransparentní předměty. Dále se práce zabývá záznamem a zpracováním obrazu prostřednictvím digitální kamery. K rekonstrukci iterferogramů byly použity algoritmy z literatury.

1. Základní principy holografie

1.1 Popis světla jako vlnění

Světlo můžeme charakterizovat jako příčné vlnění nebo jako elektromagnetickou vlnu. Nejčastěji se setkáme s označením \vec{E} , zastupující vektor elektrické intenzity vlny, který je odvozen z Maxwellových rovnic:[1]

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}(\vec{r})e^{-i\omega t} \quad (1.1)$$

ve které je \vec{r} polohový vektor, t čas, e Eulerovo číslo, i komplexní jednotka a ω úhlová frekvence. Každá elektromagnetická vlna má dvě složky. Kromě vektoru elektrické intenzity \vec{E} , je zde vektor intenzity magnetické \vec{H} , která je na něj kolmá. Pro vektor magnetické intenzity platí vztah:

$$\vec{H}(\vec{r}, t) = \vec{H}(\vec{r})e^{-i\omega t} \quad (1.2)$$

Světelnou vlnu můžeme vyjádřit i skalárně,

$$E(\vec{r}, t) = E(\vec{r})e^{-i\omega t} \quad (1.3)$$

což je postačující pro popis difrakce nebo interference, ale nezískáme tak polarizační stav. Ve vztahu (1.3) je oddělena prostorová složka $E(\vec{r})$ od časové. $E(\vec{r})$ je komplexní amplituda, kterou může takto rozepsat:

$$E(\vec{r}) = A \cdot e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \varphi_0)} = A \cdot e^{i\varphi} \quad (1.4)$$

kde A zastupuje maximální amplitudu, \vec{k} vlnový vektor a φ_0 počáteční fázi.

Obecně nám intenzitu světelné vlny popisuje vztah:[2]

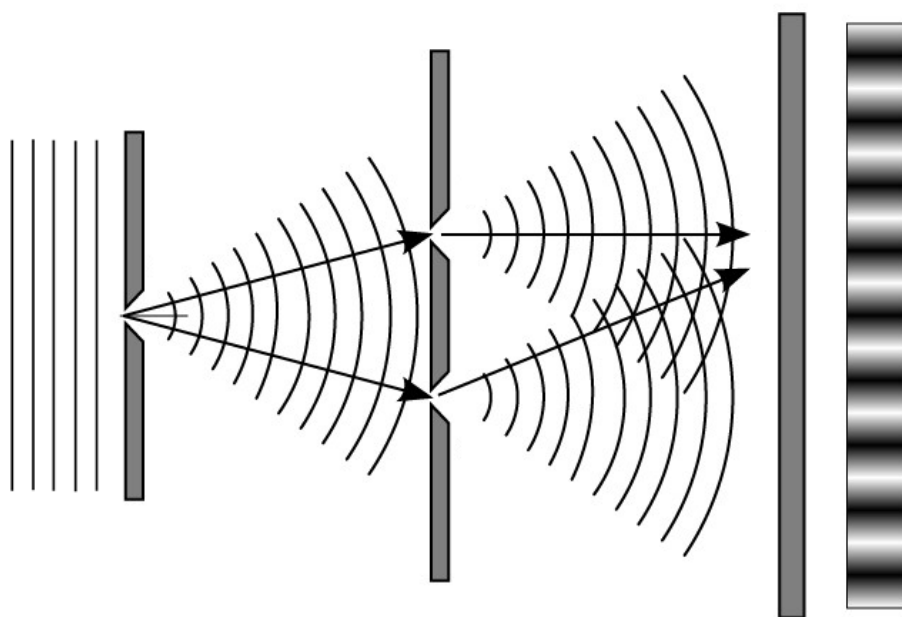
$$I = |\vec{E} \times \vec{H}| \quad (1.5)$$

1.2 Interference

„Interferenci můžeme definovat jako speciální typ superpozice dvou nebo většího počtu postupných vln z diskrétně rozložených zdrojů. Výsledkem této superpozice je vlnění (vlnové pole) s časově stálými maximy a minimy amplitudy vektoru elektrické intenzity. Díky tomu dochází k místnímu zesilování a zeslabování intenzity u elektromagnetického pole – mluvíme o konstruktivní a destruktivní interferenci [3].“

Světelné vlny spolu mohou interferovat, musí však splňovat podmínky koherence (viz. kapitola 1.1 Koherence). Výsledná vlna je pak složena z těchto dvou nebo více vln. V tomto výsledném tzv. interferenčním poli je pak intenzitně zaznamenán fázový rozdíl vln původních.

První člověk, který experimentálně prokázal vlnovou charakteristiku světla, byl britský fyzik Thomas Young, odtud Youngův experiment (obr. 1):



Obr. 1 –Youngův experiment – interference vlny na dvou-štěrbině [O1]

Rovinná vlna dopadá na stínítko s jednou štěrbinou, kde dochází k difrakci (viz. kapitola 1.4 Difrakce), odtud se jako z bodového zdroje světla šíří kulová vlnoplocha na stínítko se dvěma štěrbinami. Zde dochází k další difrakci (ohybu) a následné interferenci na posledním stínítku. Vzorec pro interferenci dvou vln s různými intenzitami je:

$$I = I_1 + I_2 + 2|\gamma|\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\varphi \quad (1.6)$$

kde I představuje výslednou intenzitu a I_1, I_2 intenzity jednotlivých vln. γ je pak stupeň koherence a $\Delta\varphi$ jejich fázový rozdíl.

Ke konstruktivní interferenci dochází v bodech, kde se vlnoplochy překrývají se stejnou fází a maximální amplitudou. U destruktivní interference je tomu naopak. Vzorec pro konstruktivní interferenci, kde vznikají maxima (fázový rozdíl $\Delta\varphi = 0$), je:

$$I_{MAX} = I_1 + I_2 + 2|\gamma|\sqrt{I_1 I_2} \quad (1.7)$$

Pro destruktivní interferenci, kdy vznikají minima (fázový rozdíl $\Delta\varphi = \pi$):

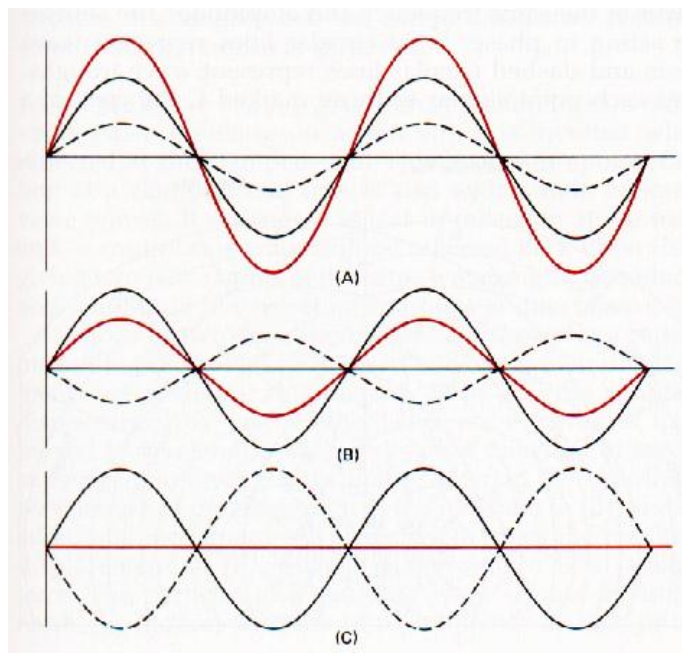
$$I_{MIN} = I_1 + I_2 - 2|\gamma|\sqrt{I_1 I_2} \quad (1.8)$$

Visibilitu, neboli kontrast interferenčních proužků vzniklých skládáním vln, můžeme vyjádřit vztahem:

$$V = \frac{I_{MAX} - I_{MIN}}{I_{MAX} + I_{MIN}} \quad (1.9)$$

1.3 Koherence

Aby mohla vzniknout interference, je nezbytné zajistit podmínku koherence. Koherentní záření je takové záření, které má s časem neměnný fázový rozdíl, vlnovou délku i amplitudu. To lze nejlépe demonstrovat na mechanickém příčném vlnění (obr. 2).



Obr. 2 – Konstruktivní a destruktivní skládání vln [O2]

Z obrázku 2, je patrné, že vlny mají ve všech případech konstantní fázový rozdíl. Pro všechny případy pak platí, že se skládá vlna znázorněná plnou čarou s vlnou znázorněnou čarou přerušovanou. Výsledným složením je pak vlna vyobrazená červenou křivkou. V případě (A) jde o konstruktivní skládání, v případech (B), (C) o skládání destruktivní.

Rozlišujeme dva typy koherence: *prostorovou* a *časovou*. To znamená, že záření vychází buď ze dvou různých míst, nebo z jednoho místa, ale se zajištěným časovým odstupem.

Koherenční délku značenou l_c , která souvisí s časovou koherencí, můžeme pro danou vlnovou délku určit ze vztahu [23].

$$l_c = \frac{\lambda^2}{2\Delta\lambda} = \frac{c}{\Delta f} \quad (1.10)$$

Ze vztahu vyplývá, že čím více bude světlo monochromatické, tj. čím užší bude jeho spektrální čára, tím bude větší jeho koherenční délka [2].

1.4 Difrakce

„Jestliže do dráhy šíření světla (monochromatického) bude vložena překážka, jejíž rozměry jsou srovnatelné s vlnovou délkou světla, nastává jev, kdy se světlo dostává za hranice geometrického stínu – dochází k difrakci (ohybu) světla [3].“

Tento jev byl popsán nizozemským fyzikem Christiaanem Huygensem a doplněn francouzským fyzikem Augustin-Jean Fresnelem. Odtud Huygens-Fresnelův princip, který nám říká, že každý bod vlnoplochy, do něhož v určitém okamžiku dospělo postupné vlnění izotropního (stejně ve všech směrech) prostředí, můžeme považovat za elementární zdroj sférického vlnění, které se z něj šíří v elementárních vlnoplochách. V dalším časovém okamžiku je vnější obálka všech vlnoploch, celkovou vlnoplochou postupující vlny [4].

1.5 Shannonův teorém

Shannonův teorém nám říká, že pro přesnou rekonstrukci spojitého, periodického signálu, musí být vzorkovací frekvence alespoň dvakrát vyšší, než nejvyšší frekvence vzorkovaného signálu. V opačném případě by došlo k ztrátě informace kvůli nízké vzorkovací úrovni. První podmínka, která musí být splněna, je tedy:

$$f_e \geq 2f_s \quad (1.11)$$

kde f_e je vzorkovací frekvence a f_s frekvence studovaného signálu [5].

Maximální prostorovou frekvenci v_{\max} , kterou ještě lze snímačem zachytit je dána Nyquistovým kritériem:

$$v_{\max} = \frac{1}{2\Delta x}, \quad (1.12)$$

kdy Δx představuje velikost pixelu.

Maximální prostorovou frekvenci v_{\max} , která je ve výsledném obrazci můžeme zapsat jako:

$$v_{\max} = \frac{2}{\lambda} \sin \frac{\theta_{\max}}{2} \quad (1.13)$$

kdy λ představuje velikost použité vlnové délky, θ_{\max} je úhel svíraný nejbližšími body (zdroji el-mag. vlnění) v předmětové rovině. Čím je úhel θ menší, tím je menší i prostorová frekvence, naopak se zvyšující se velikostí úhlu, roste i prostorová frekvence

U fotocitlivých senzorů s přesně danou velikostí a rozestupem pixelů, je úhel θ_{\max} , který svírají ramena referenčního a předmětového svazku, daný vztahem:

$$\theta_{\max} = 2 \arcsin \left(\frac{\lambda}{4\Delta x} \right) \approx \frac{\lambda}{2\Delta x} \quad (1.14)$$

kdy λ představuje velikost použité vlnové délky a Δx je velikost pixelu [8].

2. Holografie

2.1 Klasická holografie

Holografie je slovo vzniklé složením dvou řeckých slov - *holos*, což znamená úplný, a *grafos*, které znamená záznam. Jde o vyspělou metodu záznamu obrazu, umožňující zachytit obraz předmětu ve třech rozměrech. Prvním člověkem, který roku 1984 položil základy holografie, byl fyzik Dennis Gabor narozený 5. června 1900 v Maďarsku [6].

V klasické holografii je hologram obvykle zaznamenáván na fotografickou desku, nebo na citlivou vrstvu fotografického filmu. Výsledkem je ale trojdimenzionální obraz. Vytvoření hologramu nezahrnuje zachycení obrazu, ve smyslu jak jej známe. Abychom pochopili a porozuměli tomu, jak hologram vzniká, musíme začít od základních principů.

U konvenčních zobrazovacích technik jako je fotografie, je zaznamenáno pouze rozložení intenzit v původní scéně. Výsledkem toho je, že informace o optických drahách k různým částem scény je ztracena.

Unikátní charakteristikou holografie je myšlenka zaznamenávat jak fázi, tak amplitudu světla přicházejícího od objektu. Jestliže veškeré záznamové materiály reagují pouze na intenzitu obrazu, je nezbytné konvertovat informaci o fázi na změnu intenzit. V holografii toto děláme použitím koherentního osvětlení. Aby bylo možné hologram na médium zaznamenat, musíme předmět osvětlit nejenom předmětovým paprskem, který nese informaci o struktuře předmětu, ale také referenčním, neboli srovnávacím paprskem, který musí splňovat podmínky koherence. Toho dosáhneme tak, že použijeme stejný zdroj, ze kterého paprsky rozdělíme do dvou větví. Fotografický film poté zaznamená interferenční obrazec produkovaný referenčním paprskem a světlem rozptýleným a odraženým (prošlým, dle typu techniky záznamu) od povrchu předmětu.

Takto vzniklý hologram obsahuje informaci o fázi a také amplitudu vlny odražené od objektu. V této formě vypadá hologram jen jako nějaké kubistické dílo, jedná se většinou o změť různě zakřivených čar. Abychom rekonstruovali původní vlnoplochu objektu, musíme hologram znovu prosvětlit původním referenčním paprskem. Po tomto procesu můžeme pozorovat trojdimenzionální obraz zaznamenaného předmětu [7].

V posledních letech je holografie velmi intenzivně rozvíjenou disciplínou, kterou nastartoval právě objev laseru. V současné době je holografie uplatňovaná nejen ve výzkumu, ale má také praktické využití v podobě bezpečnostních log, ochranných prvků bankovek nebo ve zdravotnictví.

2.2 Digitální holografie

V dnešní moderní době máme možnost k záznamu hologramů místo klasického způsobu zaznamenávání na fotocitlivý materiál použít elektronické maticové snímací čipy. Hologram je tak ihned převeden do digitální podoby a uložen do počítače. Princip ale zůstává stejný jako u klasické holografie, stále jde o záznam interference mezi referenční a předmětovou vlnou.

Hologram je tedy rekonstruovaný přímo v počítači a není tak nutné používat původního referenčního svazku k opětovnému prosvícení. K tomu je zapotřebí rekonstrukčního programu s příslušným matematickým algoritmem. Do programu matematické rekonstrukce můžeme také zahrnout filtraci prostorových frekvencí, úpravu intenzity a kontrastu odstranění tzv. nultého řádu nebo zdvojeného obrazu, případně jiných pro nás nežádoucích složek.

S nástupem nových sofistikovaných technologií má digitální holografie čím dál větší potenciál využití. Nejčastěji se setkáme s využitím digitální holografie v oblastech, jakými jsou holografická mikroskopie nebo interferometrie. Toto ale není zdaleka jediné využití, digitální holografie se také používá v armádě (holografická projekce na sklo letounu), případně může být použita pro holografický přenos obrazu televize nebo k holografické kryptografii [8].

Klasický záznam hologramu na fotocitlivý materiál skládající se z fotografické desky nebo filmu, vyžadoval chemický proces. Tento typ procesu byl často limitující pro většinu aplikací, které většinou vyžadovaly záznam několika hologramů. To činilo jakékoli průmyslové použití velice náročné, například kvůli kontrole na výrobních linkách. Myšlenka digitální rekonstrukce optické vlnoplochy se zrodila v 60. letech 20. století. Nejstarší studie na toto téma se datuje do roku 1967, kdy byl publikován článek J.W. Goodmana: Applied Physics Letters [9].

Hlavní myšlenkou bylo nahradit “analogový” záznam/rekonstrukci předmětu “digitálním” záznamem/rekonstrukcí simulovanou pomocí digitální mřížky skládající se ze zaznamenaného obrazu. Holografie se tak stala “digitální”, nahrazující fotografickou desku maticí s diskrétními hodnotami hologramu. Později v roce 1971 Huang diskutoval počítačovou analýzu optické vlnoplochy a poprvé představil koncept “digitální holografie” [10]. Práce prezentovaná roku 1972 Kronrodem [11], představila historicky první pokus rekonstrukce pomocí výpočtu objektu zakódovaného v hologramu. Tehdy bylo zapotřebí šest hodin výpočtů pro rekonstrukci pole 512 x 512 pixelů. Diskrétní hodnoty byly získávány z 64-bitové holografické desky digitalizované skenerem. Nicméně až do devadesátých let 20. století trvalo, než byl řádkový detektor pro digitální holografii realizován [2]. To vyústilo v důležitý rozvoj ve dvou oblastech technologie.

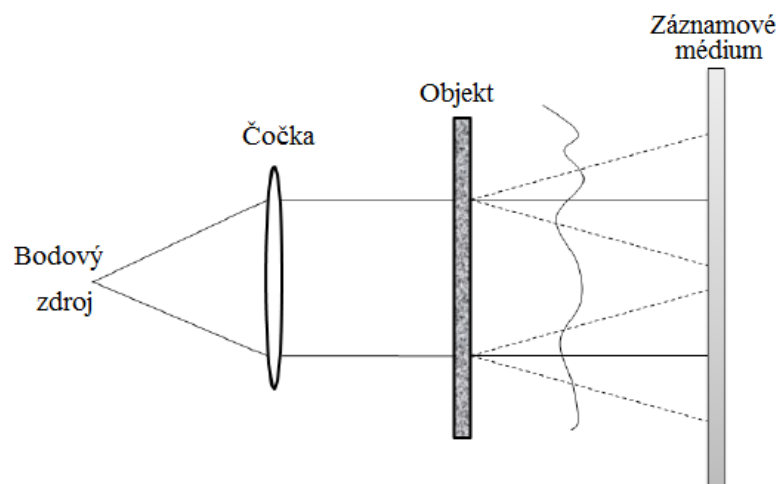
- Od této doby vedl mikro technologický proces k výrobě tzv. “charge – coupled device“ (CCD) senzory s dostatečně malými pixely, aby splňovali Shanonovy podmínky pro prostorové vzorkování hologramu.
- Počítačová úprava obrazů se stala dostupnou z velké části díky významnému vylepšení výkonu mikroprocesorů, zejména jejich procesorové jednotky a výpočetní kapacity.

3. Metody uspořádání

3.1 Metoda In-line (osová)

Tato takzvaná “Gaborovská“ metoda záznamu je schopna zaznamenávat a rekonstruovat optickou vlnoplochu. Když pomocí koherentního světla osvětlím předmět, světlo difraguje. Interference mezi difragovaným světlem (předmětová vlna) a světlem ze zdroje (referenční vlna), představuje hologram. Z uspořádání na obrázku (obr. 3) můžeme vidět, že je použit jen jeden paprsek na osvětlení objektu, z toho důvodu se difragované světlo na objektu chová jako předmětový paprsek a přímo prošlé světlo se chová jako referenční paprsek. Předmětový a referenční paprsek se tedy šíří podél stejné optické osy, poté co dopadnou na záznamové médium, dojde k interferenci a vytvoří in-line hologram [12].

Holografie je dvoustupňový proces: 1) záznam hologramu, který zahrnuje zachycení informace o fázi a amplitudě na médium, a 2) čtení hologramu, které spočívá v osvětlení hologramu referenčním paprskem shodným s paprskem použitým v kroku 1. Gaborova původní sestava pro záznam hologramu je vyobrazena na Obr. 3.



Obr. 3 – Schéma In-line uspořádání pro zápis [O3]

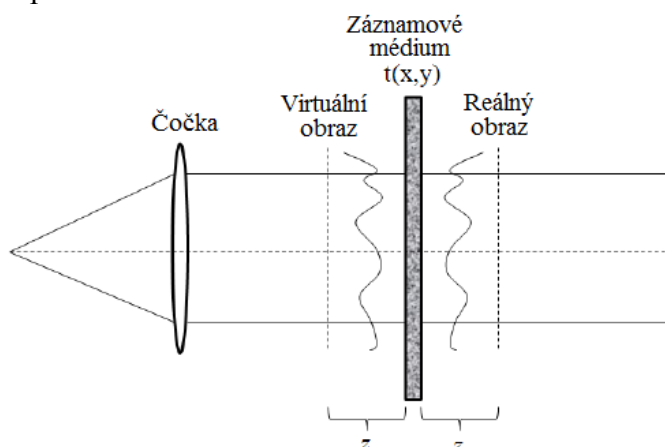
Bodový zdroj monochromatického světla je kolimován čočkou a výsledný kolimovaný paprsek osvětluje poloprůhledný objekt. Za zmínku stojí, že Gaborův experiment předcházela vynálezu laseru o více než dvanáct let. Zdrojem světla používaným v těchto prvních pokusech, byla rtuťová výbojka s vhodnou prostorovou (úhlovou) a časovou (barevnou) filtrací pro zvýšení prostorové a časové koherence, respektive médium zaznamená Fresnelův obrazec vzniklý difrakcí na objektu. Světlo procházející poloprůhledným objektem se skládá z rozptýleného (E_1) a nerozptýleného pole (E_0). Detektor za předmětem zaznamená ve vzdálenosti z rozložení intenzit vzniklých interferencí těchto dvou polí

$$I(x, y) = |E_0 + E_1(x, y)|^2 = |E_0|^2 + |E_1(x, y)|^2 + E_0 \cdot E_1^*(x, y) + E_0 \cdot E_1(x, y) \quad (3.14)$$

Za předpokladu lineární odezvy na intenzitu v souvislosti s fotocitlivým detektorem zjistíme, že jeho přenosová funkce má tvar

$$t(x, y) = a + bI(x, y) \quad (3.15)$$

kde a a b jsou konstanty. Takže hologram je nyní zaznamenán a všechny potřebné informace o objektu jsou ve funkci přenosu t .



Obr. 4 – Schéma In-line uspořádání pro rekonstrukci [O4]

Čtení hologramu v podstatě znamená, že hologram osvětlíme, jako kdyby to byl nový objekt (Obr. 4). Rozptýlená vlnoplocha E z hologramu je produkt rovinné vlny E_0 a funkce přenosu t ,

$$E(x, y) = E_0 \cdot t(x, y) = E_0(a + b|E_0|^2) + bE_0 \cdot |E_1(x, y)|^2 + b|E_0|^2 \cdot E_1(x, y) + bE_0^2 \cdot E_1^*(x, y) \quad (3.16)$$

V rovnici 3.16 je první podmínka prostorově konstantní a druhá podmínka $bE_0|E_1(x, y)|^2$ je zanedbatelná, vzhledem k posledním dvěma výrazům, protože pro průhledný objekt je rozptýlené pole daleko slabší, než pole nerozptýlené, $|E_0| \gg |E_1(x, y)|$. Proto jsou pro nás

relevantní poslední dva výrazy z rovnice. Všimněme si, že tyto podmínky obsahují komplexní pole E_I a jeho komplexně sdružené pole E_I^* . Z toho důvodu bude pozorovatel, umístěný za hologramem ve vzdálenosti z , vidět obraz podobající se původnímu objektu (pole E_I).

Pole E^* naznačuje „opačné“ šíření, takže druhý (virtuální) obraz je zformován ve vzdálenosti z , před záznamovým médiem. Pokud se pozorovatel zaměří na rovinu prvního (reálného) obrazu, uvidí překrytí mezi obrazem v ohnisku a obrazem mimo něj tzv. zdvojeným obrazem a to díky šíření na vzdálenost $2z$. Toto překrývání značně degraduje poměr signálu k šumu v rekonstrukci a představuje tak hlavní nevýhodu in-line holografie. To je zřejmě důvod, proč Gabor upustil od holografie v polovině roku 1950 [13].

In-line holografie lze shrnout jako proces zaznamenávání Fresnelova difrakčního vzoru předmětu, na fotosenzitivní médium. Zobrazení je potom opačný proces, při kterém je hologram osvětlen rovinnou vlnou a výsledné pole je pozorované ze stejné vzdálenosti. V následující části budeme diskutovat metodu, pomocí které je možné odstranit rušivý virtuální obraz a posunula holografii kupředu.

Výhody a nevýhody metody In-line:

Výhody:

- Prostorové frekvence nejsou u této metody tak vysoké a tak není nutné zajišťovat vysokou stabilitu použitých optických prvků.
- Světlo před dopadem na záznamové médium již většinou neprochází dalšími optickými elementy a médium tak může mít celkem velkou plochu.
- Díky nižším prostorovým frekvencím, můžeme u metody In-line použít záznamové médium s menší zrnitostí, případně s nižší hustotou pixelů. Zkrátí se tak doba expozice, což nám umožní zaznamenávat i dynamické děje.
- Oproti složitějšímu uspořádání Off-axis mívá metoda In-line nižší požadavky na koherenční délku světla použitého v experimentu.

Nevýhody:

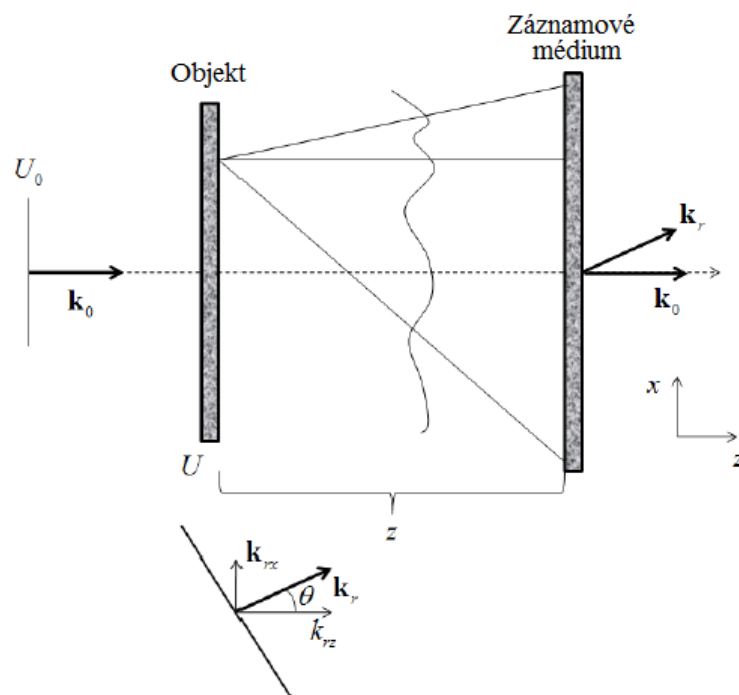
- Přesvětlení výsledného obrazu při osvětlení rekonstrukčním paprskem, tj. přesvětlení nultým difrakčním řádem.
- Světlo je omezeno předmětema může tak docházet k nesouvislosti reference a případným stínům.
- Konjugovaná vlna způsobující sdružený (imaginární) obraz, který může působit jako rušivý element.
- Samointerferenční šum [8].

3.2 Metoda Off-axis (mimoosová)

Tento typ uspořádání byl popsán americkými vědci Leithem a Upatnieksem [14], kteří tak učinili důležitý příspěvek v historii vývoje optické holografie. Fyzikální princip digitální holografie je podobný jako u klasické holografie. Termín "digitální off-axis holografie" znamená, že systém záznamu je obecně založený na metodě "šikmé reference", kdy je referenční paprsek uspořádán k paprsku předmětovému pod úhlem θ . Technika zaznamenávání "off-axis" hologramů, kterou navrhli, dovoluje oddělit zdvojený obraz. Můžeme tak obdržet holografický obraz, bez rušení zdvojeným obrazem. Nicméně velikost pixelu na záznamovém médiu (CCD charge-coupled device nebo complementary metal-oxid semiconductor CMOS) je poněkud větší než zrna na klasické fotografické desce (obvykle 2-3 μm , v porovnání s nějakými 10-15 μm) a kvůli těmto omezením musíme brát v úvahu určité parametry jako je plocha pixelu, počet pixelů, případně jejich náklon.

Pokrok holografie, od počáteční Gaborovy práce, k více praktické realizaci pomocí Off-axis metody, je dobře popsán Adolfem W. Lohmannem [15]: „*Úspěch holografie je do značné míry spojen s vynalezením takzvané Off-axis uspořádáním s referenčním svazkem Emmett Leithem a Juris Upatnieksem. Ve vývoji od Gaborova in-line hologramu k mimoosové holografii je důležitý mezistupeň tzv. single-sideband holografie* (o které pojednává [16]).“ Lohmanova vlastní práce na holografii předchází práci Leithovu, která je málo známá snad kvůli její publikaci v němčině. V Leithově práci z roku 1962, je zmíněn Lohmanův příspěvek [14]: „Diskuse o různých podobných technikách k odstranění zdvojení obrazu je zmíněn Lohmannem, *Optica Acta* (Paříž), 3, 97 (1956).

Průkopnická práce Leitha a Upatniekse na Off-axis holografii měla název "Reconstructed wavefronts and communication theory (Rekonstrukce vlnoploch a komunikační teorie)" [14], což předem naznačuje přechod od popisu holografie jako metody vizualizace ke způsobu přenosu informací. Obdobně jako u metody rádiové komunikace, mimoosová holografie v podstatě dodává prostorové modulace (tj. nosné frekvence) v optické oblasti. Gabor sám, stejně jako většina elektrotechniků té doby, byl obeznámen s pojmy teorie komunikace. Ve skutečnosti publikoval na toto téma ještě před jeho prací o holografii z roku 1948.



Obr. 5 – Schéma Off-axis uspořádání pro záznam, kde k_0 a k_r jsou vlnové vektory předmětové a referenční vlny [O5]

Princip záznamu Off-axis hologramu je vyobrazena na Obr. 5. Předmět je osvětlen monochromatickou rovinnou vlnou E_0 a vlnoplocha dosáhne záznamového média ve vzdálenosti z . Rozložení vlnoplochy na médiu, tj. Fresnelův difrakční obrazec $E_F(x, y)$, je konvoluce mezi přenosovou funkcí objektu, E a Fresnelovou difrakcí.

$$E_F(x, y) = E(x, y) * e^{\frac{ik_0(x^2+y^2)}{2z}} \quad (3.17)$$

V rovnici 3.17, jsme zanedbali faktory, které nejsou závislé na x a y . Na rozdíl od in-line holografie je zde referenční vlna E_r pod úhlem θ k vlně předmětové (odtud "Off-axis") s ohledem na objektový paprsek. Celkové pole E_t v rovině záznamového média je

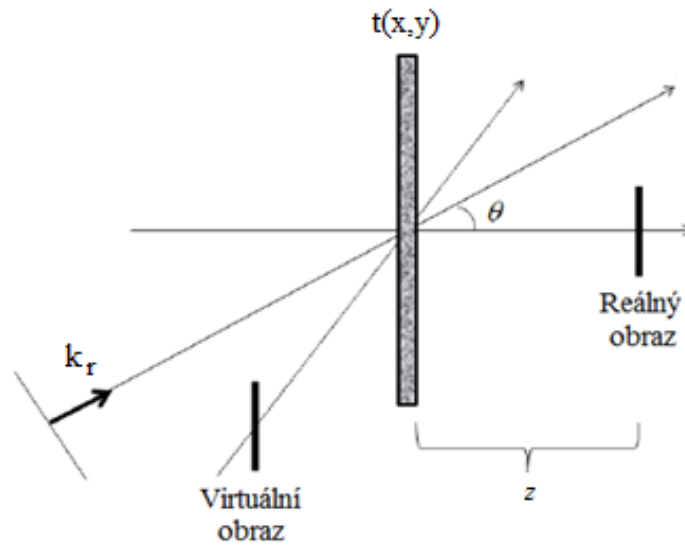
$$E_t(x, y) = E_F(x, y) + |E_r| \cdot e^{ik_r \cdot r} = E_F(x, y) + |E_r| \cdot e^{i(k_{rx} \cdot x + k_{rz} \cdot z)} \quad (3.18)$$

kde $k_{rx} = k_0 \cdot \sin\theta$ a $k_{rz} = k_0 \cdot \cos\theta$.

Všimněme si, že složka z referenčního vlnového vektoru, produkuje konstantní fázový posun $k_{rz} \cdot z$, který může být zanedbán. Takže výsledná přenosová funkce $t(x, y)$ spojená s hologramem je úměrná intenzitě dopadajícího záření, tj.

$$t(x, y) = |E_F(x, y)|^2 + |E_r|^2 + E_F(x, y) \cdot |E_r| \cdot e^{-ik_{rx}x} + E_F^*(x, y) \cdot |E_r| \cdot e^{ik_{rx}x} \quad (3.19)$$

Princip čtení hologramu je vyobrazeno na Obr. 6.



Obr. 6 – Schéma Off-axis uspořádání pro rekonstrukci hologramu [O6]

Osvětíme-li hologram referenční vlnou, E_r pole (E_h) v rovině zobrazovacího média bude

$$E_h(x, y) = |E_r| \cdot e^{ik_r \cdot r} \cdot t(x, y) = |E_F(x, y)|^2 \cdot |E_r| \cdot e^{ik_r \cdot r} + |E_r|^3 \cdot e^{ik_r \cdot r} + E_F(x, y) \cdot |E_r|^2 + E_F^*(x, y) \cdot |E_r|^2 \cdot e^{i2k_{rx}x} \quad (3.20)$$

Z rovnice 3.20 můžeme vidět, že pozorovatel má přístup ke komplexnímu poli $E_F(x, y)$ (třetí člen v rovnici), které, ve vzdálenosti z od zobrazovacího média, zrekonstruuje předmětové pole. Jinými slovy - při čtení hologramu se provádí inverzní operace k operaci v rovnici 3.17 a tou je dekonvoluce. Což je reálný obraz. Poslední výraz z rovnice 3.20 je modulován na frekvenci $2k_{rx}$. Pozorování podél tohoto směru dává přístup k E_F^* , který zrekonstruuje obraz předmětu za záznamovým médiem. A to je virtuální obraz.

Jak bylo očekáváno, hlavní přínos tohoto uspořádání je v tom, že oba obrazy jsou nyní pozorovány pod různými směry, aniž by narušoval jeden druhý. Všimněte si, že první dva výrazy v rovnici 3.20 jsou stejnosměrné složky šířené ve směru k_r , což je také vhodné. Se správným off-axis úhlem pro zápis nebo čtení, lze skutečný obraz získat bez problémů. K zajištění požadovaného rozlišení v konečné rekonstrukci, musí modulační frekvence k_{rx} splňovat Nyquistův teorém vztahující se k tomuto problému [24].

Výhody a nevýhody metody Off-axis:

Výhody:

- Zdánlivý obraz předmětu není rušen paprskem rekonstrukce, který odpovídá nultému difrakčnímu řádu, ani ostatními difrakčními řády. Jednotlivé obrazy jsou tak oddělené.
- Maximální prostorová frekvence interferenčního obrazce je dána úhlem mezi předmětovým a referenčním paprskem. Díky tomuto může být u metody off-axis dosaženo jemnějších interferenčních proužků. Avšak jsme omezeni hustotou zrn. U digitální holografie je to hustota pixelů, které jsou na záznamovém médiu.
- Jednoduchá regulace intenzity osvětlení předmětů, díky referenčnímu svazku.
- Samointerferenční šum lze odfiltrvat pomocí referenčního svazku nastaveným pod správným úhlem, dle vztahu

$$\sin \theta_{ref} \geq 3 \sin \left(\frac{\Delta \theta_{obj}}{2} \right) \quad (3.21)$$

Nevýhody:

- S rostoucí prostorovou frekvencí se zvyšují i nároky na stabilitu optické sestavy [8].

4. Kamera HVDUO-10M – Foveon X3

HVDUO-10M (obr. 7) je kompaktní digitální kamera jihokorejské firmy Hanavision schopna získávat přesné obrázky o vysokém rozlišení s využitím obrazového senzoru Foveon X3. Je vybavena třicetibitovým digitálním barevným výstupem se zpracováním barev v reálném čase [17].



Obr. 7 – Digitální kamera HVDUO-10M (Foveon X3) [O7]

Digitální kamera obsahuje CMOS detektor Foveon X3 Pro 10M, který dokáže zaznamenat barevný obraz v osmibitové hloubce, tj. 256 odstínů na každou barvu. Rozlišení kamery je 2268(H)×1512(V)×3 pixelů, rozlišení je stejné pro každou ze tří barevných vrstev snímače. Celkové rozlišení je tedy 10,2 Mpx (10,2 miliónů pixelů).

Snímače Foveon X3 Pro 10M mají zajímavou funkci VPS (Variable Pixel Size), pomocí které můžeme seskupit více pixelů dohromady v jeden velký. To má sice za následek snížení rozlišení detektoru, ale zvětší se tak odstup signálu od šumu a můžeme tak detekovat světlo o nižších intenzitách. Dojde také k vyšší rychlosti záznamu [18].

Tabulka 1.1 – Technické parametry kamery HVDUO-10M (F7X3-B91)

	Minimum	Typicky	Maximum	Jednotky	Poznámky
Spektrální rozsah	400		660	nm	s barevným filtrem
	330		1100	nm	bez barevného filtru
Dynamický rozsah		60		dB	
Saturace senzoru při expozici		13		nJ/cm ²	7 μm, 650 nm
		74		nJ/cm ²	14 μm, 750 nm
Kvantová účinnost		36		%	450 nm
		48		%	550 nm
		49		%	625 nm
Plnicí faktor		54		%	
Vzorový šum (řádky)			±3	DN ₈	
Vzorový šum (sloupce)			±2	DN ₈	
Výstupní šum			2	DN ₈	
Citlivost	100			ASA	norma ISO
Anti-blooming		30-1000x			podle módu
Operační teploty	0		40	°C	

Tabulka 1.2 – Parametry detektoru Foveon X3 PRO (F7X3-B91)

Počet pixelů	10,2 miliónů pixelů -2262 (H) x 1512 (V) x 3
Velikost pixelu	9,12 μm x 9,12 μm (čtverec)
Oblast pixelů	20,68 mm (H) x 13,79 mm (V) — aktivní
Poměr stran	3:2
Záznam videa – počet snímků	2268x1512 — 4,5 snímků/s 1024x1024 — 10,5 snímků/s 640x480 — 27,5 snímků /s 576x378 — 36 snímků/s

[19]

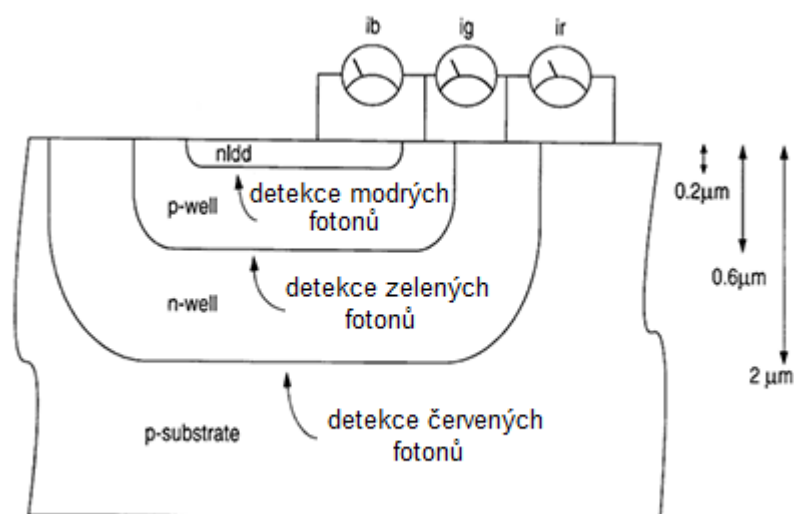
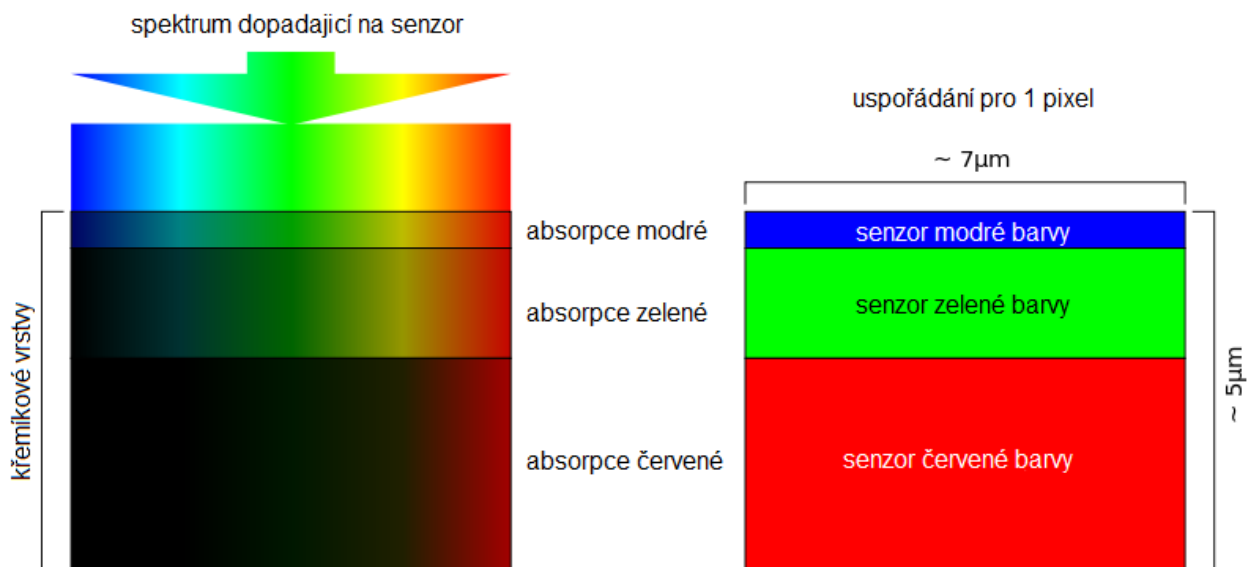
4.1 Senzor Foveon X3

Název detektoru byl odvozen od části sítnice oka - „fovea“, která se označuje jako žlutá skvrna a je to bod nejostřejšího vidění. Název si vynálezce, Carvel Mead vybral zřejmě proto, že detektor pracuje podobně jako čípkový senzor na sítnici oka.

Snímač Foveon X3, je založen na jedné z vlastností křemíků, kterou je postupné pronikání světla o různých vlnových délkách. V uspořádání detektoru, vrchní vrstva nejlépe detekuje modrou barvu, v následující vrstvě se nejlépe detekuje zelená a v poslední vrstvě červená barva.

Na obrázku Obr. 8a Obr. 9, je vyobrazena absorpce jednotlivých vrstev v křemíkovém detektoru. Vrstvy jsou různě široké, právě kvůli různému pronikání světla o odlišných vlnových délkách do křemíku. V našem případě probíhal záznam infračerveného záření do spodní vrstvy senzoru.

Obr. 8 – Absorpce světla v jednom z pixelů Foveon X3 [O8]

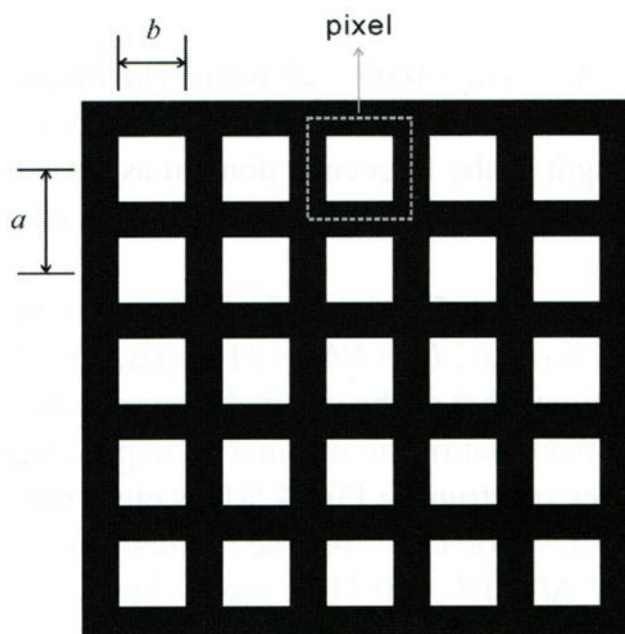


Obr. 9 – Schéma trojnásobného PN přechodu v jednom z pixelu Foveon X3 [O9]

4.2 Rozlišení

4.2.1 Vlastnosti obrazového snímače

U digitální holografie je rozlišení ovlivněno velikostí jednotlivých pixelů ve snímacím senzoru. Snímač „charge-coupleddevice“ (CCD) a complementary metal-oxid-semiconductor“ (CMOS) jsou dva nejběžněji používané senzory používané zařízení digitální fotografie. Oba tyto zobrazovací snímače se skládají z mnoha světlo snímajících jednotek, takzvaných pixelů, které jsou uspořádány jako dvourozměrné pole. Hlavní rozdíl mezi CCD a CMOS snímačem je, že u CCD snímače je signál ze všech pixelů sdílen jedním nebo více zesilovači, zatímco u snímače CMOS má každý pixel nezávislý zesilovač. Ačkoliv nezávislé zesilovače umožňují snímači CMOS zpracování většího počtu snímku za sekundu tzv. „framerate“, vlastnosti těchto zesilovačů nejsou vždy jednotné, což má za následek mírné zkreslení výstupního obrazu. Také tzv. zkreslení temným proudem je u CMOS větší než u CCD. Proto je obvykle upřednostňovaný snímač CCD při aplikacích s nízkou svítivostí nebo aplikacích, které vyžadují vysokou kvalitu obrazu. Hlavní výhodou CMOS je, že jeho struktura je jednoduchá, a proto jej lze snadno vyrábět. CMOS senzory s více než deseti tisíci pixelů ve velikosti „full-frame“ (36 mm x 24 mm), jsou používány v komerčních digitálních fotoaparátech a kamerách. Je-li osvětlení dostatečně velké, snímač CMOS může také poskytovat vysoce kvalitní snímky. Proto je stále více používán pro experimenty s digitální holografii.

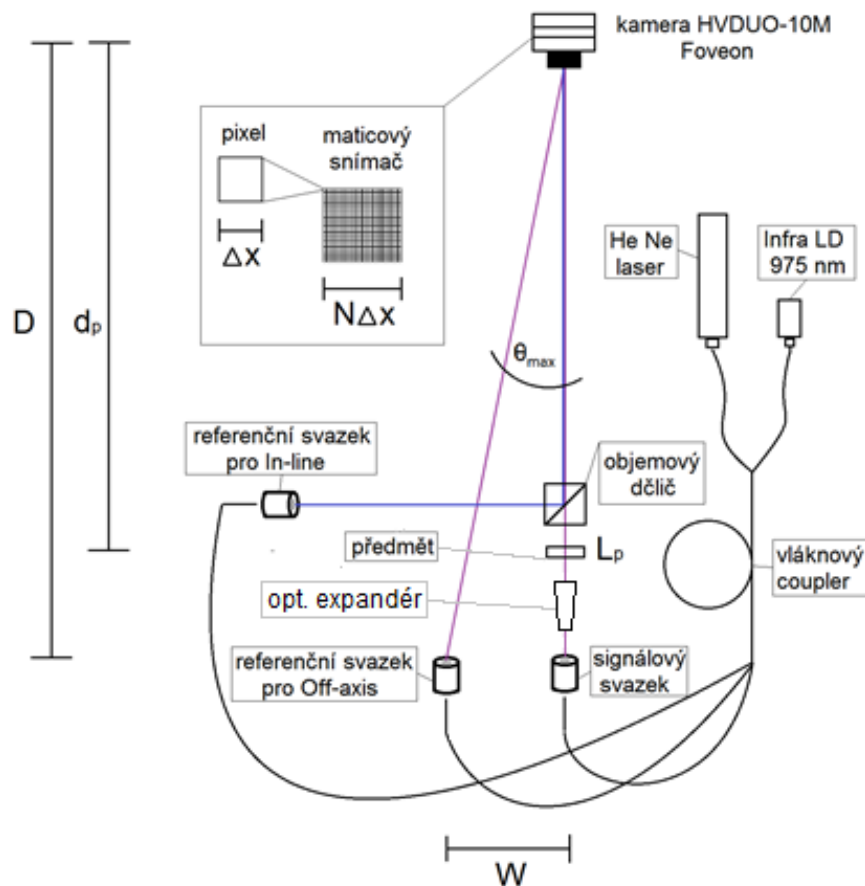


Obr. 10 – Schéma uspořádání pixelů na detektoru [O10]

U CCD i CMOS snímače se obraz skládá z dvourozměrného pole pixelů, jak je znázorněno na Obr. 10V každém pixelu je stínění okolo aktivní plochy pixelu (bílý čtverec na Obr. 10). Energie fotonů dopadajících na aktivní oblasti pixelu je převedena na energii elektronů. V ideálním případě je počet elektronů v každém pixelu v poměru k průměrné intenzitě dopadající na pixel. Vzhledem k tomu, že každý pixel dodává pouze jeden signál při jednom osvětlení, má pak získaný obraz matice stejný rozměr jako snímač. Rozteč obrazových bodů, nebo velikost pixelu, je vzdálenost mezi pixely ("a" v Obr. 10). Velikost snímače, rozteč pixelů a faktor plnění, což je poměr aktivní plochy $b \times b$ k celkové ploše uvnitř pixelu (b^2/a^2), jsou tři důležité parametry snímače. Pro běžné CCD snímače bývá typická rozteč bodů (pixelů) 4-8 μm a faktor plnění 80-90%. Běžný CCD snímač má 1024 x 768 pixelů, takže velikost čipu je asi $6,0 \times 4,5 \text{ mm}^2$. Perfektní snímač by měl zaznamenat vzor, jehož hodnota je přiměřená intenzitě dopadající na CCD nebo CMOS čip. V digitální holografii předpokládáme, že interferenční obrazec lze zaznamenat věrně. Nicméně, vlastnosti záznamu jsou ovlivněny roztečí pixelů a dalšími parametry snímače. V následujících odstavcích budeme diskutovat o vlivu kvality a omezení snímače [21].

4.2.2 Rozložení optické soustavy

S pomocí následujícího schématu na obrázku (Obr. 11), určíme rozteč mezi signálovým a referenčním svazkem W pro Off-axis, která nás zajímá především. Důležitá je pro nás také vzdálenost D , která představuje vzdálenost od výstupu vláken k rovině kamery, a vzdálenost d_p představující vzdálenost od předmětu k rovině snímacího čipu v kameře.



Obr. 11 – Schémauspořádání aparatury pro současné osově a mimoosově uspořádání.

W – vzdálenost mezi výstupy z vláken pro Off-axis, D – vzdálenost mezi rovinou snímacího čipu v kameře a rovinou mikroskopových objektivů; L_p – příčná velikost předmětu; d_p – vzdálenost předmětem a rovinou záznamového média; θ_{\max} – maximální úhel pro Off-axis uspořádání, pod kterým může světlo z bodových zdrojů na senzor dopadat; Δx – velikost pixelu v ose x ; $N\Delta x$ – rozměr snímacího čipu v ose x .

Vztah pro maximální rekonstruovatelnou frekvenci je pak:

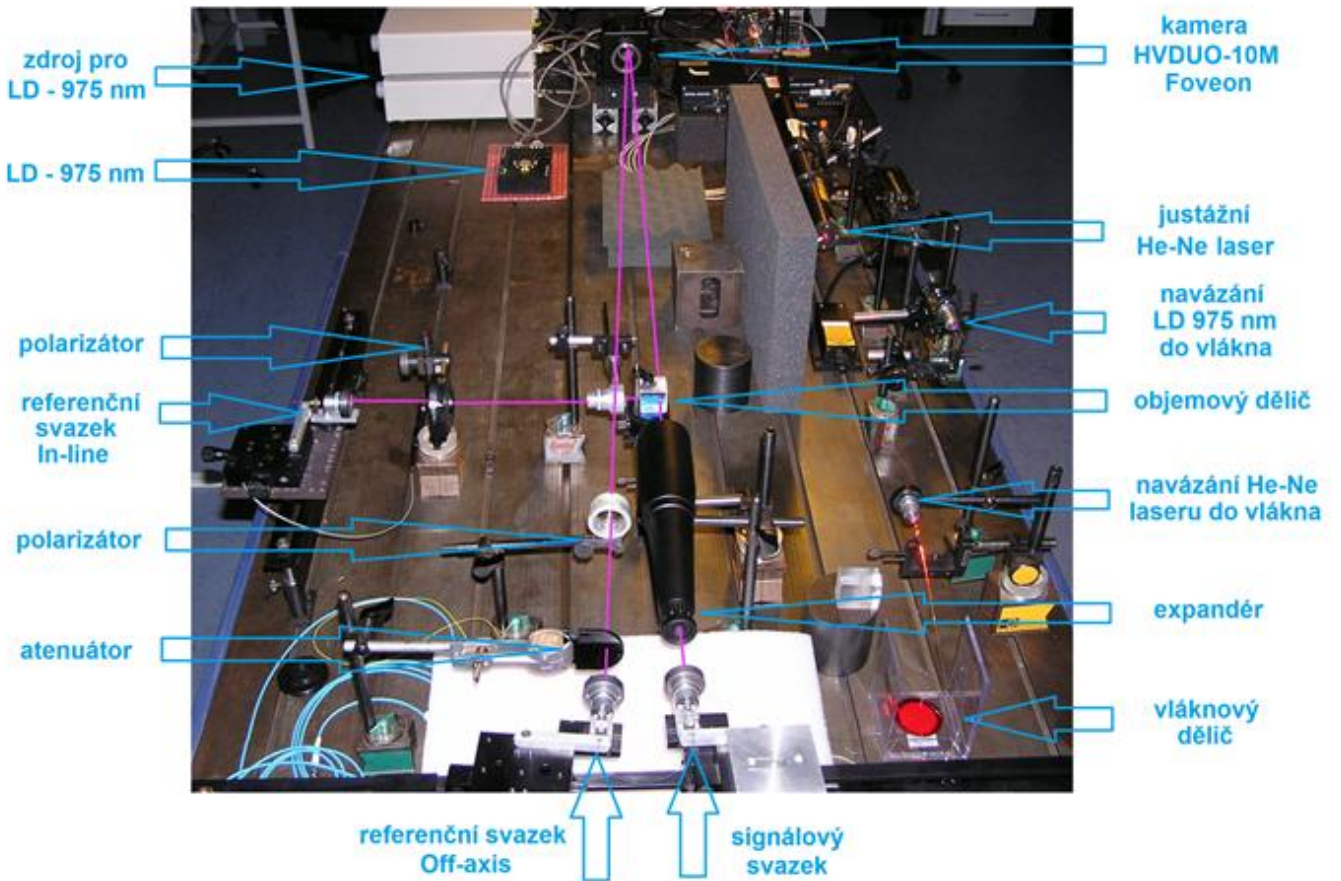
$$\lambda \left(\frac{1}{2\Delta x} - \frac{L_p}{2\lambda d_p} \right) \geq \frac{W}{D} \quad (4.22)$$

Pro úhel θ_{max} pak platí vztah:

$$\theta_{max} = 2 \arcsin \left[\frac{\lambda}{2} \left(\frac{1}{2\Delta x} - \frac{L_P}{2\lambda d_P} \right) \right] \quad (4.23)$$

a tedy pro malý úhel θ_{max} dostaneme vztah:

$$\theta_{max} \approx \lambda \left(\frac{1}{2\Delta x} - \frac{L_P}{2\lambda d_P} \right) \quad (4.24)$$



Obr. 12 – Uspořádání aparatury pro současné osově a mimoosově uspořádání

5. Rekonstrukční program

Program pro off-axis a in-line uspořádání jsem převzal z webových stránek [20] a upravil pro náš případ v programu Matlab, ve kterém následné rekonstrukce také probíhaly.

5.1 Fresnelova difrakční metoda

Pro rekonstrukci jsme použili Fresnelovu difrakční metodu, kterou můžeme popsat rovnicí.

$$E_p(x, y, z) = \exp(-jk_0 z) \frac{jk_0}{2\pi z} \exp\left[\frac{-jk_0}{2z}(x^2 - y^2)\right] \times F\left\{E_{p0}(x, y) \exp\left[\frac{-jk_0}{2z}(x^2 - y^2)\right]\right\} \quad (5.23)$$

Zláme-li komplexní amplitudu difragovaného světla v rovině clony, můžeme pomocí difrakčního integrálu, vypočítat, v libovolné rovině za clonou, komplexní amplitudu difragovaného světla. Difrakční integrál můžeme zapsat jako

$$E(x', y', z') = \frac{z'}{i\lambda} \iint_{-\infty}^{+\infty} E(x, y) \frac{\exp(ikr)}{r^2} dx dy,$$

přičemž $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ je komplexní amplituda v rovině clony a $E(x', y', z')$ je komplexní amplituda v rovině, paralelní k rovině clony, ležící ve vzdálenosti z' . Potom r značí vzdálenost jednotlivých bodů clony a bodů roviny, na které komplexní amplitudu počítáme.

Fresnelova aproximace difrakčního integrálu [25]

$$E(x', y', z') = \frac{\exp(ikz')}{i\lambda z'} \iint_{-\infty}^{+\infty} E(x, y) \exp\left\{i \frac{\pi}{\lambda z'} [(x - x') + (y - y')^2]\right\} dx dy.$$

5.2 Konvoluční metoda

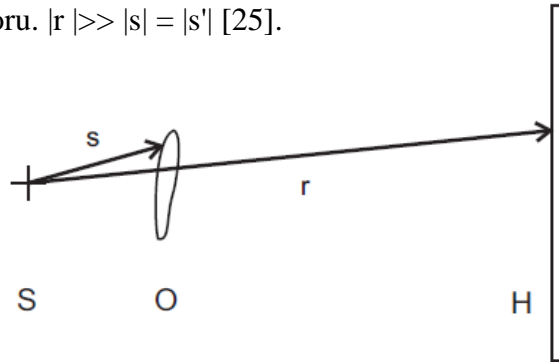
Níže popsaný algoritmus vychází z Fresnelova difrakčního integrálu, je zde využito konvolučního teorému, který nám říká, že můžeme konvoluci zapsat jako inverzní Fourierovu transformaci součinu dvou funkcí. První z nich je dána Fourierovou transformací konvolučního jádra a druhá funkce vstupující do konvoluce je Fourierova transformace funkce. Mezi komplexní amplitudou zdrojové a koncové roviny pak platí vztah

$$E(x', y', z') = E(x, y) \otimes g(x, y, z) = F^{-1}\{F(E)F(g)\},$$

kde g představuje Fresnelovu aproximaci přenosové funkce volného prostoru [25].

5.3 Kirchhoffův-Helmholtzův rekonstrukční algoritmus

Algoritmus je přizpůsoben geometrii záznamu osového hologramu se sférickou referenční vlnou, jak můžeme vidět na obr. 13. S zde označuje zdroj sférické vlny, O předmět a H hologram. Je-li počátek souřadnic umístěn do zdroje sférické vlny, polohy bodů předmětu a roviny (ve které je pořízen záznam hologramu), můžeme popsat vektory $s = (u, v, w)$ a $r = (x, y, d)$. Vynásobíme-li hologram komplexně sdruženou sférickou vlnou, obraz předmětu bude při rekonstrukci generován před hologramem ve stejné vzdálenosti, jako původní předmět a tedy $s' = s$, přičemž $s' = (u', v', w')$ je vektor popisující polohu. Z obr. 13 můžeme vidět, že vzdálenost od zdroje k předmětu, případně obrazu, bude pro malé předměty menší, než vzdálenost k detektoru. $|r| \gg |s| = |s'|$ [25].



Obr. 13 – Popis polohy předmětu a hologramu pomocí vektorů [O11]

Po dosažení aproximace do difrakčního integrálu a provedení transformace souřadnic dostaneme výraz ve tvaru [25]

$$E(s') = \iint_{-\infty}^{+\infty} I'_H(\xi, \eta) \exp[ik(u'\xi + v'\eta)/d] d\xi d\eta,$$

kde $\xi = \frac{xd}{|r|}$, $\eta = \frac{yd}{|r|}$ a $|r| = \sqrt{x^2 + y^2 + d^2}$.

5.4 Rekonstrukce metodou Fresnelovy difrakce v programu Matlab

a) Pro In-line uspořádání

```
% Pro In-line hologram

clearall; closeall;

%%Načte vstupní obraz

HH=imread('Ledka.bmp','bmp');  původní předmět, 8bit obraz

HH=double(I);

IH=HH(:, :, 1);

% parametry sestavy

M=1024;

deltax=0.001; % velikost pixelu 0.000912 cm (9.12 um)

w=975*10^-9; % vlnová délka 975 nm

z=25; % 25 cm, % vzdálenost šíření k předmětu

% Krok 1: simulace šíření

r=1:M;

c=1:M;

[C, R]=meshgrid(c, r);

A0=fftshift(iff2(fftshift(I)));

deltaf=1/M/deltax;

p=exp(-2i*pi*z.*((1/w)^2-((R-M/2-1).*deltaf).^2-...

    ((C-M/2-1).*deltaf).^2).^0.5);

SP=abs(fftshift(iff2(fftshift(IH))));

figure; imshow(500.*mat2gray(SP));

title('Hologram spectrum')

axis off
```



```

% rekonstrukce
A1=fftshift(iff2(fftshift(IH)));
Az1=A1.*conj(p);
EI=fftshift(fft2(fftshift(Az1)));
EI=mat2gray(EI.*conj(EI));
figure; imshow(EI);
title('Reconstructed image')
axis off

```

b) Pro Off-axis uspořádání

```

% Pro Off-axis hologram
clearall; closeall;

%% Načte vstupní obraz
I0=imread('Ledka.bmp','bmp'); % původní předmět, 8bit obraz
I0=double(I0);

% parametry sestavy
M=512;
deltax=0.001; % velikost pixelu 0.000912 cm (9.12 um)
w=975*10^-9; % vlnová délka 975 nm
z=20; % z=M*deltax^2/w; % vzdálenost šíření k předmětu

% rekonstrukce
r3=1:2*M;
c3=1:2*M;
[C3, R3]=meshgrid(c3, r3);
THOR=((R3-M-1).^2+(C3-M-1).^2).^0.5;
A=THOR.*deltax/4;
QP=exp(1i*pi/w/z.*(A.^2));
FTS=fftshift(fft2(fftshift(IH.*QP)));

```

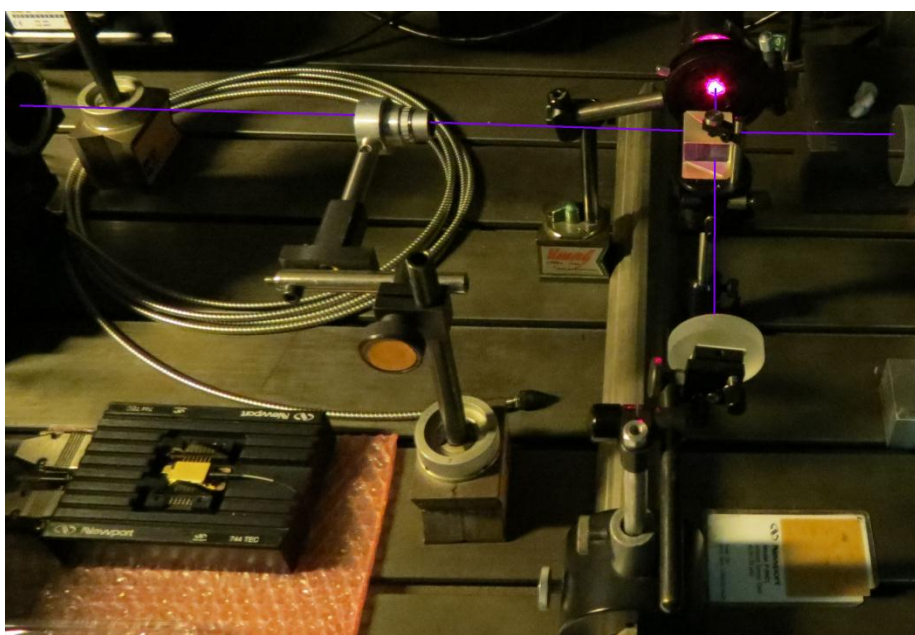
```
I2=FTS.*conj(FTS);  
figure; imshow(5.*mat2gray(I2));  
title('Reconstructed image')  
axis off
```

6. Popis experimentu

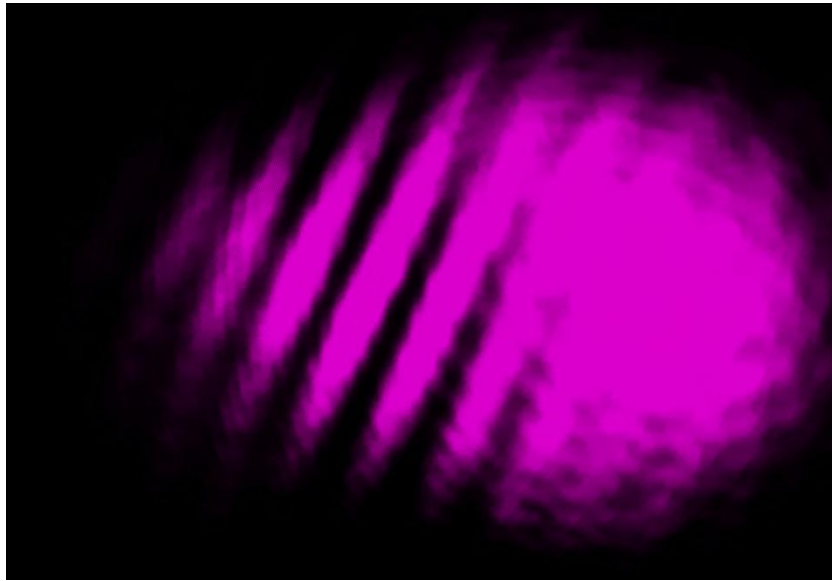
6.1 Měření koherenční délky infračervené laserové diody 975 nm

Nejdříve ze všeho bylo nutné přibližně určit koherenční délku infračervené laserové diody, se kterou jsme experiment prováděli. Koherenční délku jsme změřili prostřednictvím Michelsonova interferometru, který jsme sestavily na optické lavici. K jeho konstrukci jsme potřebovali dvě zrcadla a objemový dělič svazku paprsků a digitální kameru pro záznam interferenčního pole. Koherenční délku jsme pro infračervenou laserovou diodu 975 nm, naměřili pro dráhový rozdíl větší než 10 cm, což pro náš experiment bylo více než dostačující.

Pojmem koherenční délka, tedy rozumíme vzdálenost, na které má záření v čase neměnný fázový rozdíl, vlnovou délku i amplitudu, velice úzce souvisí s šířkou spektrální čáry. A to tak, že čím je spektrální čára (Obr. 18) užší, tím má světelný zdroj větší koherenční délku, naopak čím více je čára roztažená do šířky, tím koherenční délka klesá [22]. Pro určení koherenční délky použijeme vzorec (1.10)



Obr. 14 – Uspořádání aparatury (Michelsonův interferometr) pro měření koherenční délky



Obr. 15 – Interferenční pole měřené laserové diody

6.2 Parametry laserové diody (975 nm Fiber Bragg Grating Pump Laser)

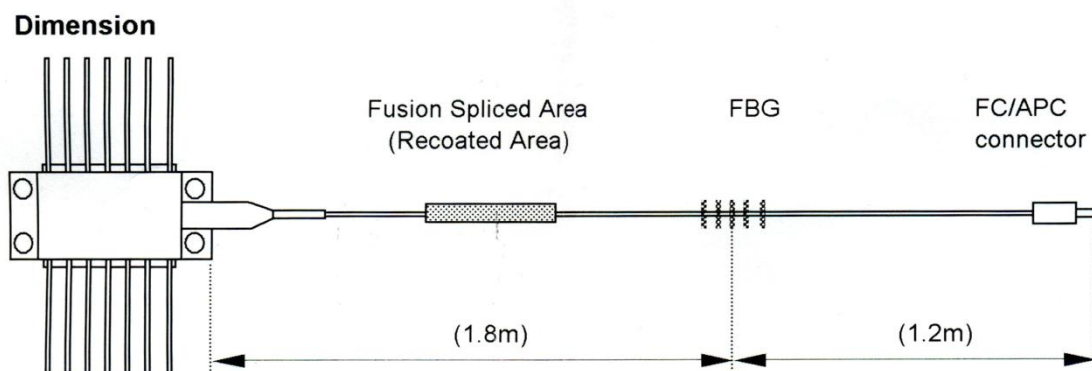
- Jedná se o laserovou diodu, přímo navázanou do vlákna (Obr. 15, 16).

Parametry laserové diody:

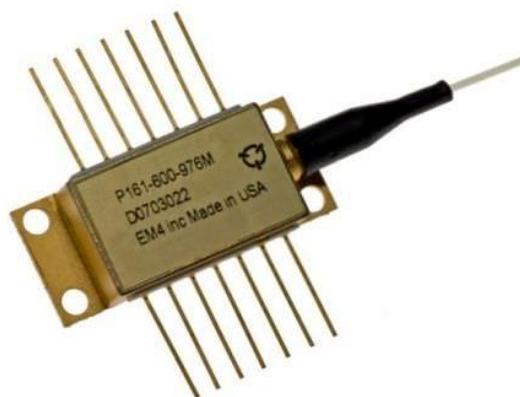
- vlnová délka: 975 nm
- výkon: 200 mW
- maximální provozní proud: 450 mA
- prahový proud: 40,9 mA

Parametry vlákna:

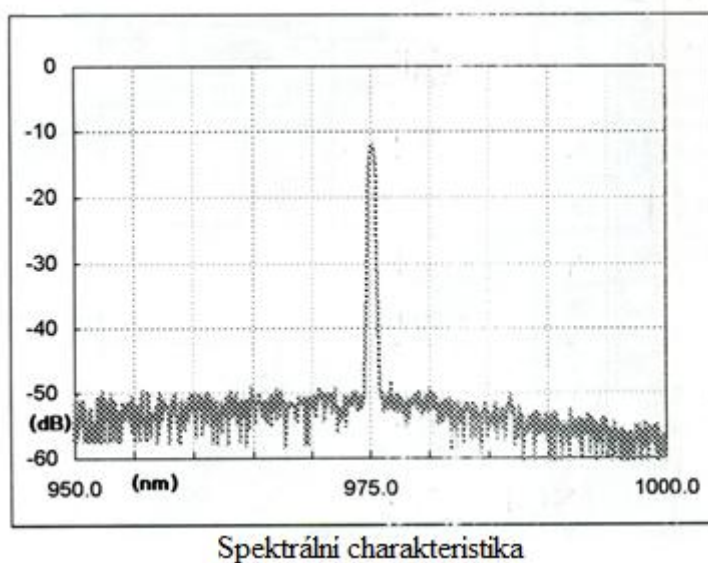
- mezní vlnová délka: 920 ± 50 nm
- průměr jádra: $5,9 \pm 0,5$ μm
- vnější průměr: 250 μm



Obr. 16 – Schéma infračervené laserové diody 975 nm navedené do vlákna [O12]



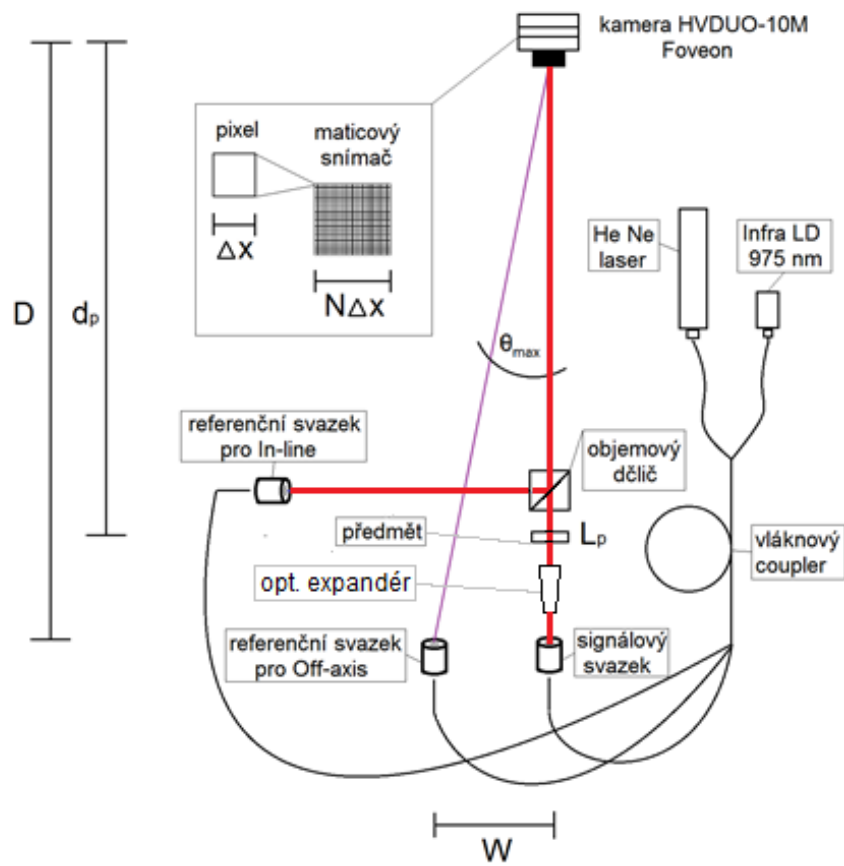
Obr. 17 – Foto infračervené laserové diody 975 nm [O13]



Obr. 18 – Spektrální charakteristika infračervené laserové diody 975 nm [O14]

6.3 Uspořádání in-line (osové):

K sestavení experimentu na optické lavici bylo potřeba několika optických elementů. Aby bylo možné experiment provést, potřebovali jsme He-Ne laser o vlnové délce 632,8 nm, který jsme použili k justování celé soustavy, z toho důvodu, že infračervená laserová dioda zářící na vlnové délce 975 nm, se kterou jsme následný experiment prováděli, negeneruje pro lidské oko viditelné záření. Jak helium-neonový laser, tak laserovou diodu vyzařující v infračervené oblasti, jsme navázali do jednovidového vláknového vazebního členu 3x3 (to znamená tři vstupní a tři výstupní optická vlákna). Pro kolimaci laserových svazků, vystupujících z optických vláken, jsme použili tři mikroskopových objektivů o zvětšení 10x s numerickou aperturou $NA < 0,3$. Na výstupu optického vlákna byl svazek LP_{01} módu, pro následné rozšíření svazku jsme použili optický expandér se zvětšením 20x, který nám zajistí snížení divergence (tedy rozbíhavosti svazku paprsků) a zvětší průměr laserového svazku. Za optickým expandérem jsme měli umístěn objekt, který jsme chtěli zaznamenat. Další důležitou součástí byl objemový dělič svazku paprsků, nezbytný pro metodu osového zaznamenávání hologramu, dělící svazky pod úhlem 90° . Na tento objemový dělič jsme přiváděli signální svazek a svazek reference, které byly navzájem kolmé a z děliče vycházely v jedné ose (jak si můžete všimnout na obr. 11 popřípadě obr. 12 – referenční svazek pro in-line). Neméně důležitou součástí, byla digitální kamera HVDUO-10M – Foveon X3, která zaznamenávala interferogram (hologram) signálního a referenčního svazku. Záznam vznikající na maticovém snímači digitální kamery, jsme poté pozorovaly v reálném čase na monitoru počítače. Všechny optické prvky byly vhodné pro obě vlnové délky, tedy jak 632,8 nm, tak 975 nm.

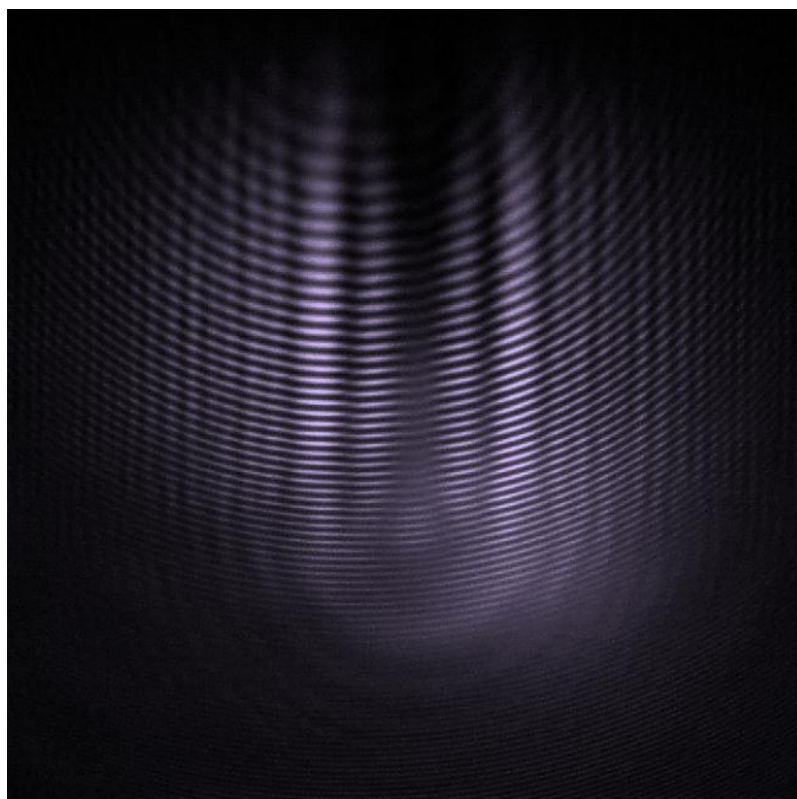


Obr. 18 – Schéma aparatury pro mimoosové uspořádání (červeně vyznačeno)

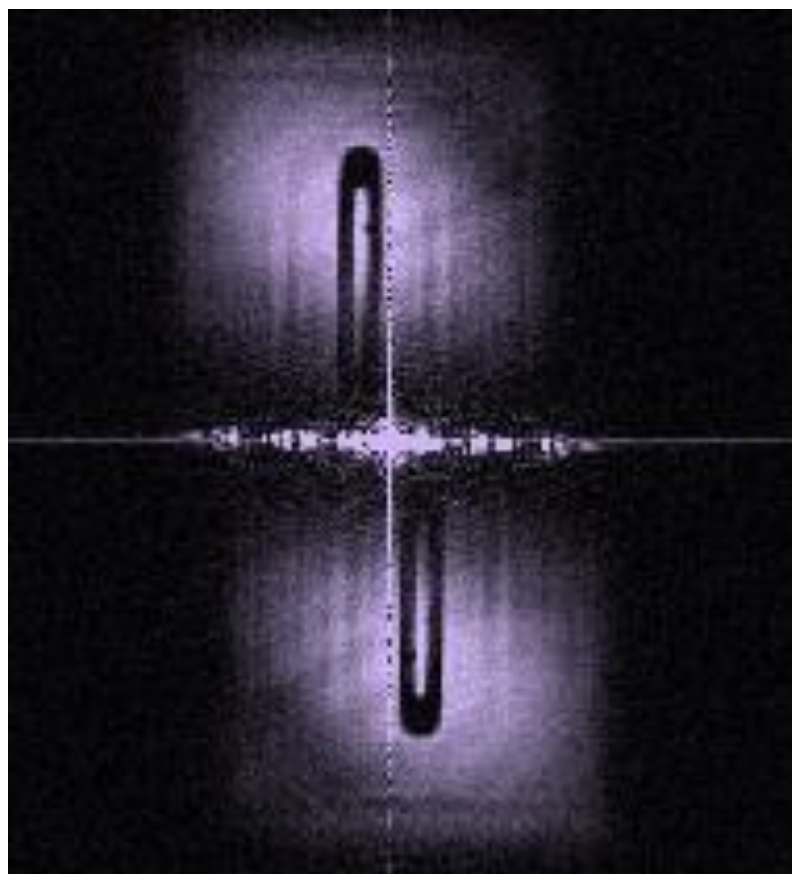
Na následujících stránkách jsou uvedeny hologramy, pořízené pomocí osové metody (in-line).

6.4 Záznam hologramu a rekonstrukce pro sestavu il-line.

Hologramy ucha jehly (pozice 1), zaznamenané zářením LD o vlnové délce 975 nm.



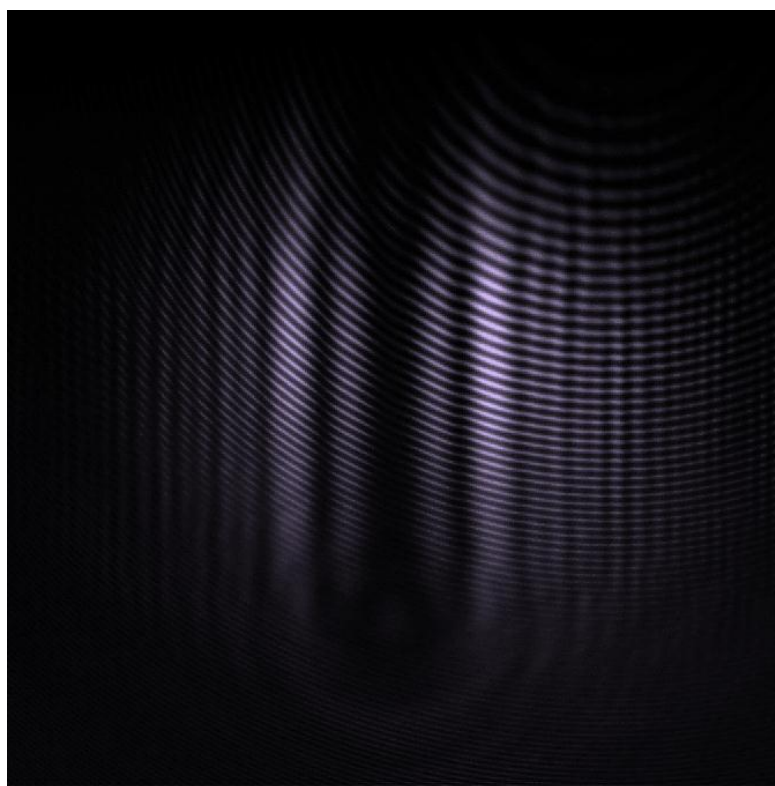
Zaznamenaný hologram



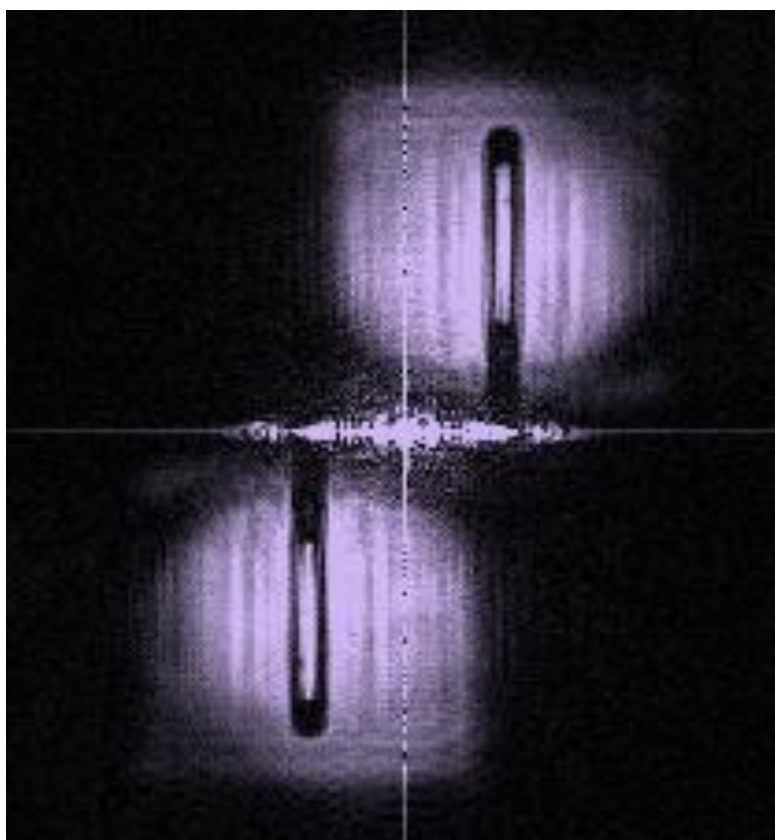
Rekonstrukce

Hologramy ucha jehly (pozice 2), zaznamenané zářením LD vlnové délce 975 nm.

Jehlu jsme posunuli více excentricky od svazku paprsků.

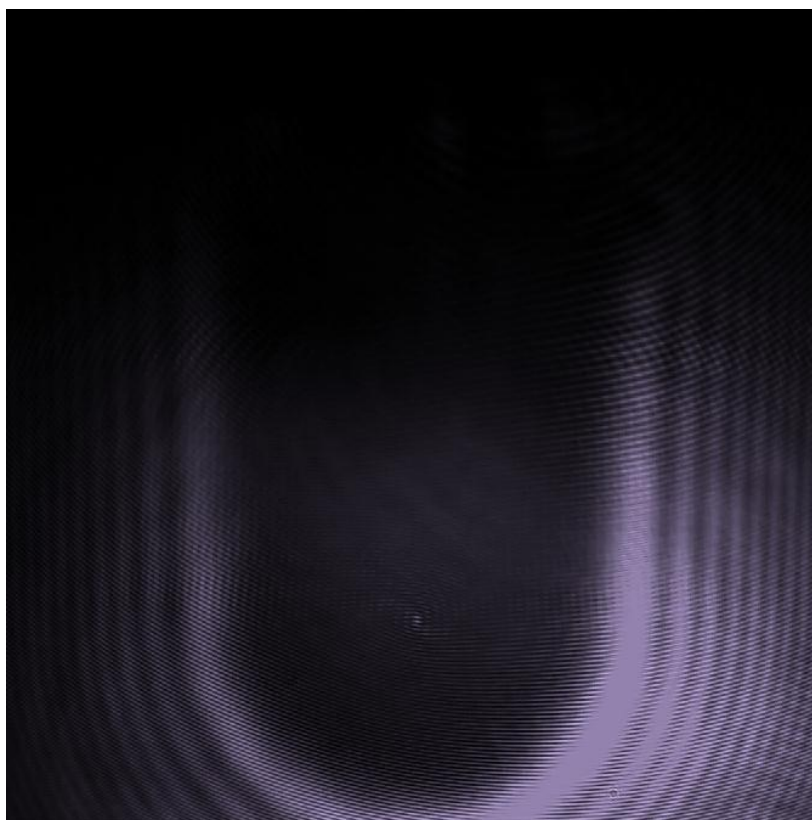


Zaznamenaný hologram

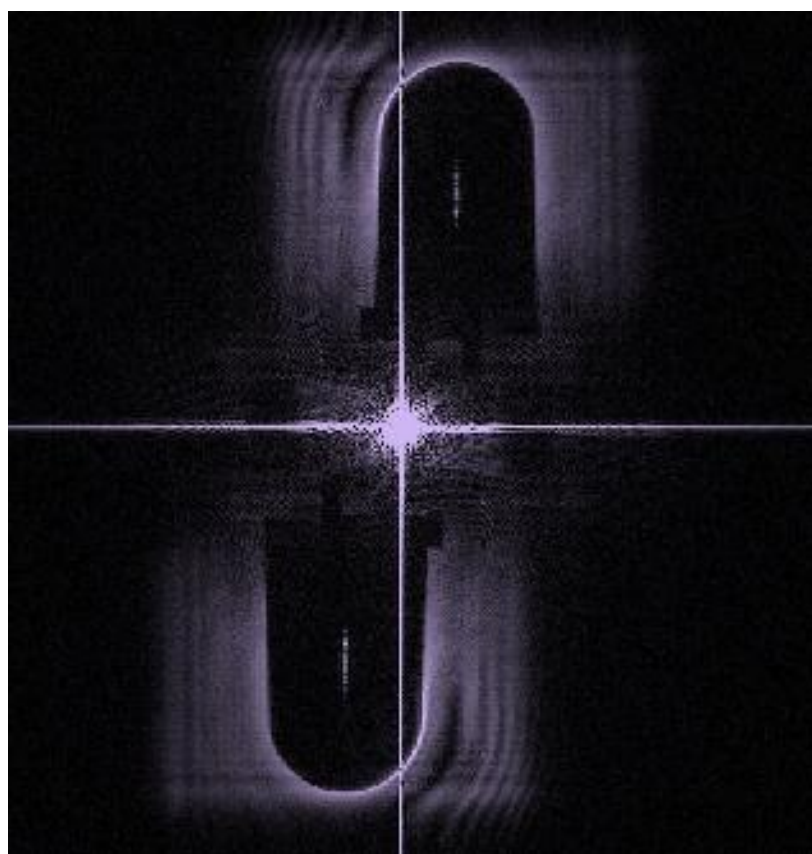


Rekonstrukce

Hologramy čiré LED diody, zaznamenané zářením LD o vlnové délce 975 nm.



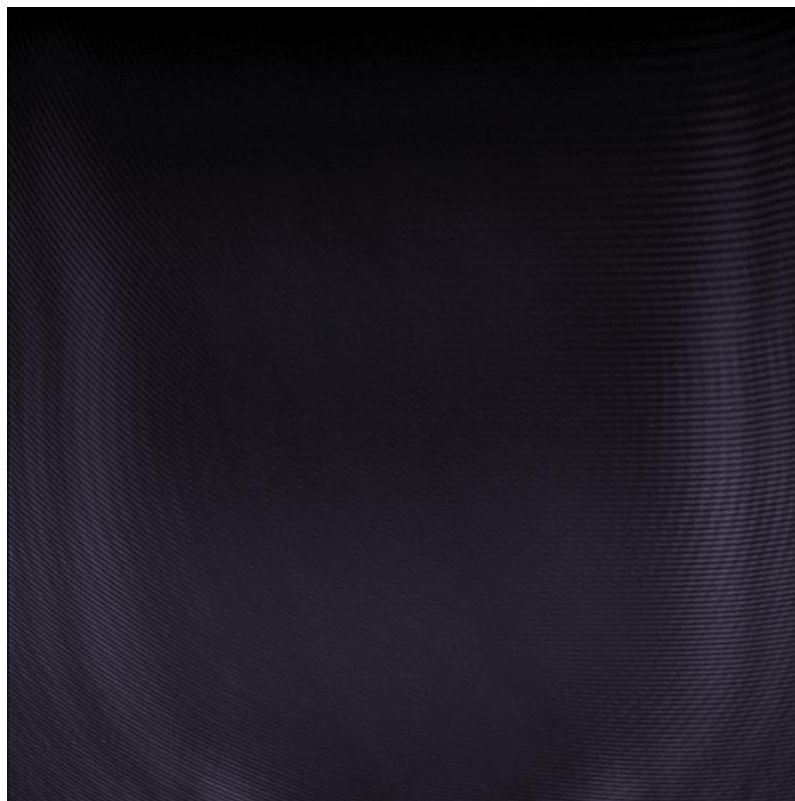
Zaznamenaný hologram



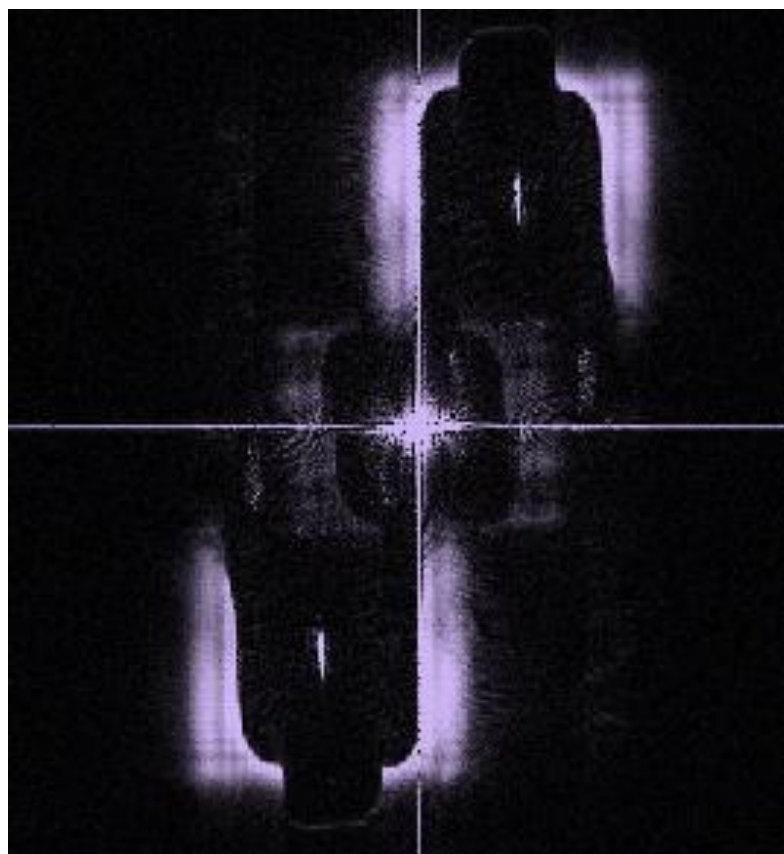
Rekonstrukce

Hologramy halogenové žárovky, zaznamenané zářením LD o vlnové délce 975 nm.

- U této halogenové žárovky si můžeme všimnout, že infračervený laserový paprsek neprochází křemenným sklem.

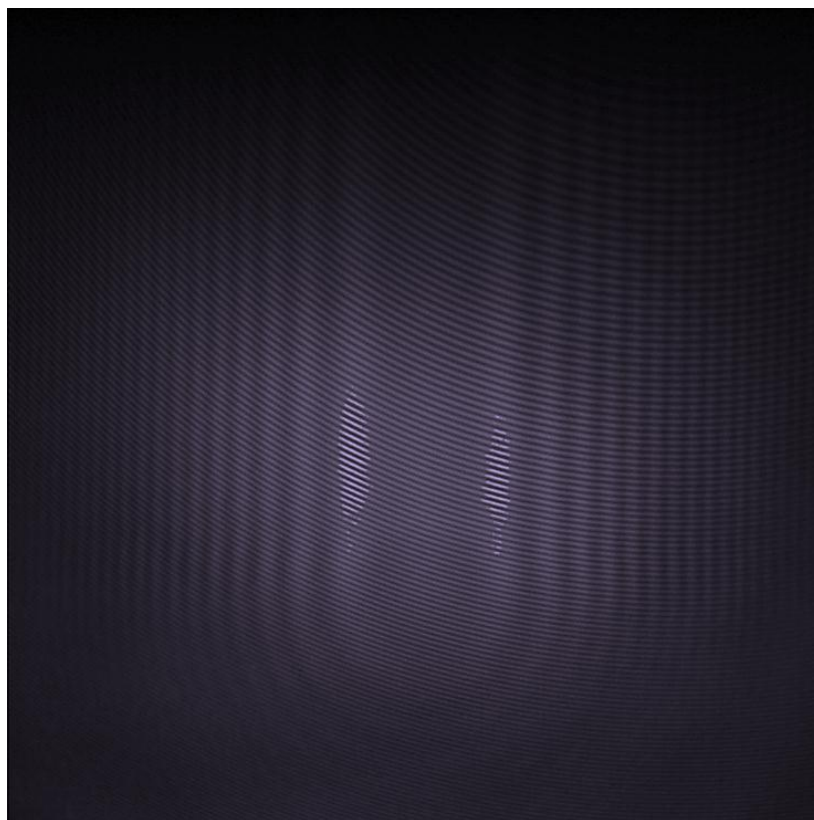


Zaznamenaný hologram

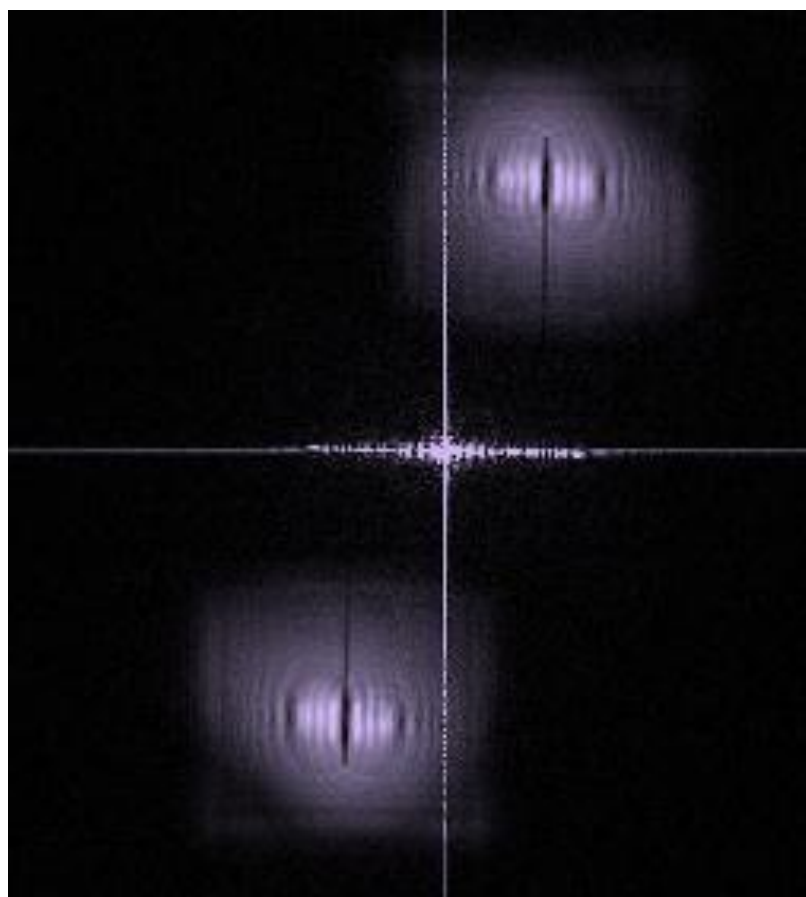


Rekonstrukce

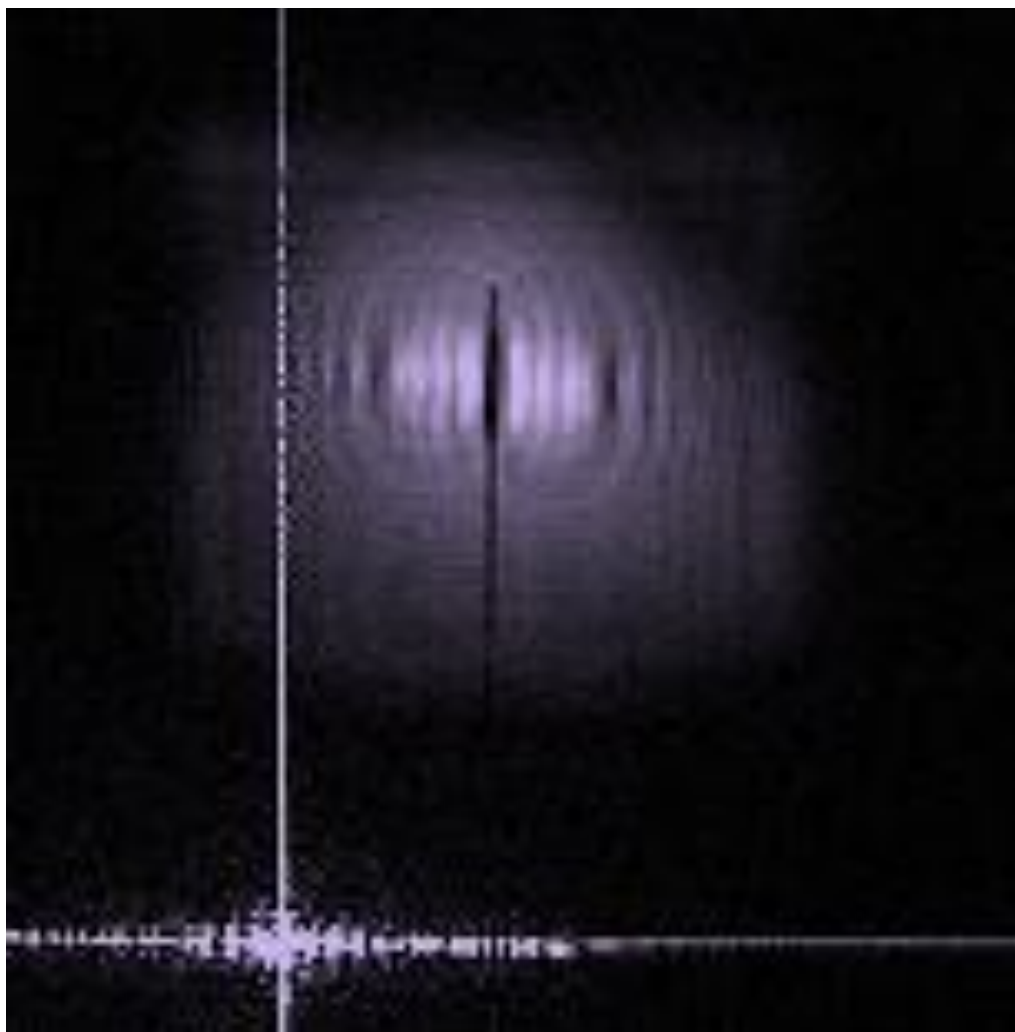
Hologramy optického vlákna (pozice 1), zaznamenané zářením LD o vlnové délce 975 nm.



Zaznamenaný hologram

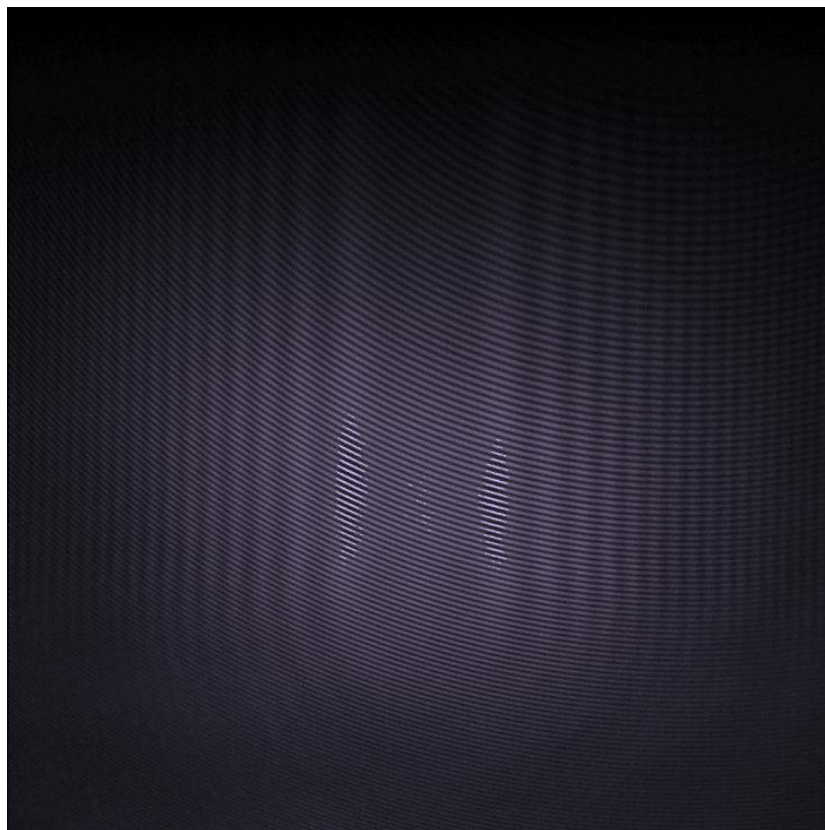


Rekonstrukce

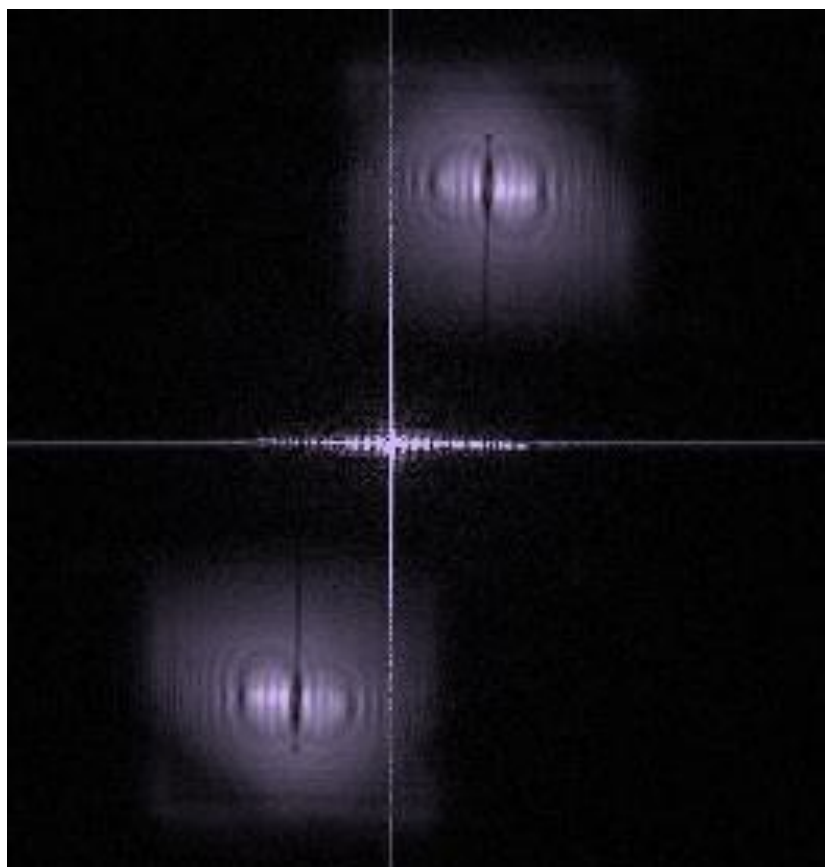


Rekonstrukce optického vlákna v přiblížení

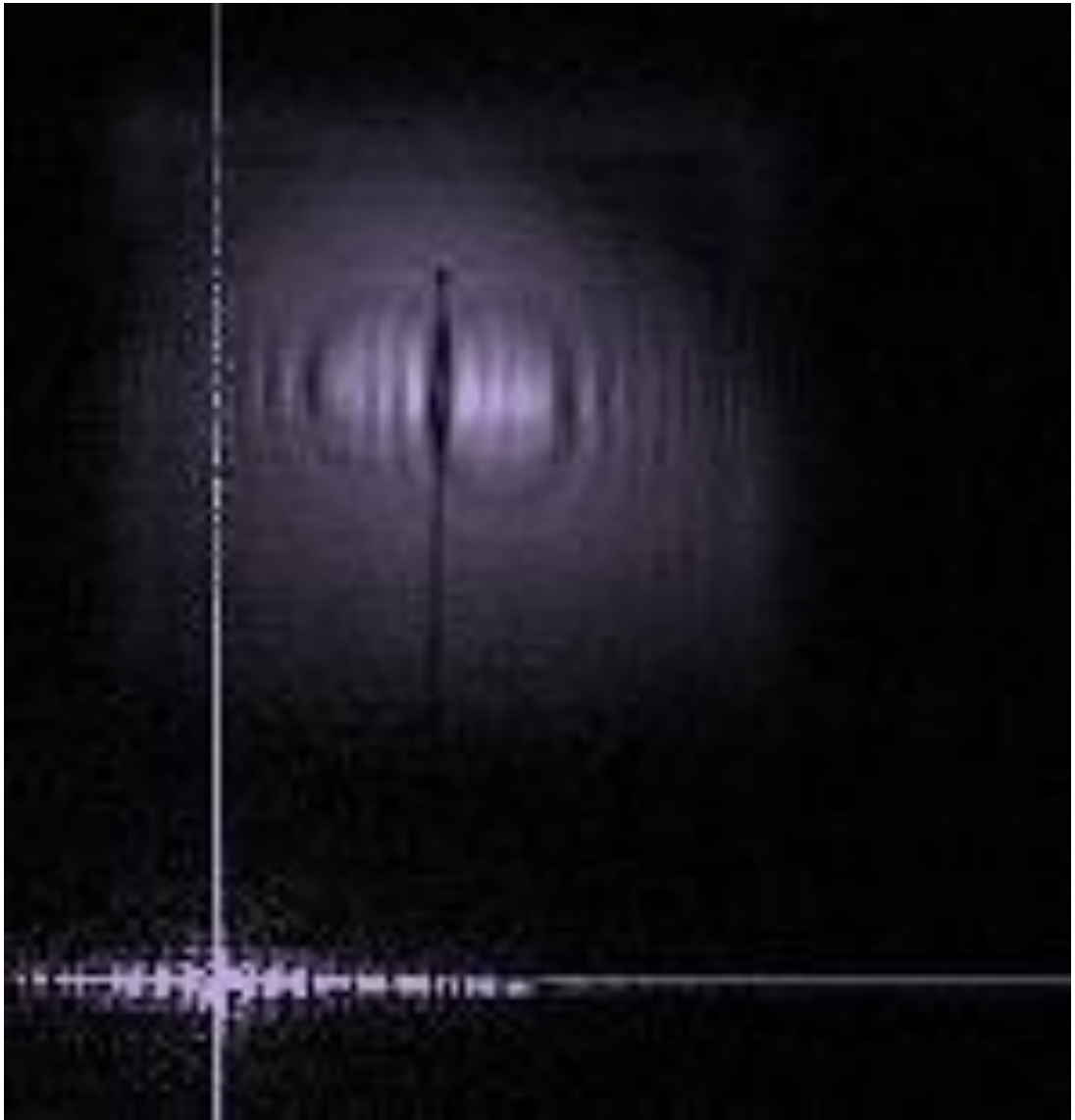
Hologramy optického vlákna (pozice 2), zaznamenané zářením LD o vlnové délce 975 nm.



Zaznamenaný hologram



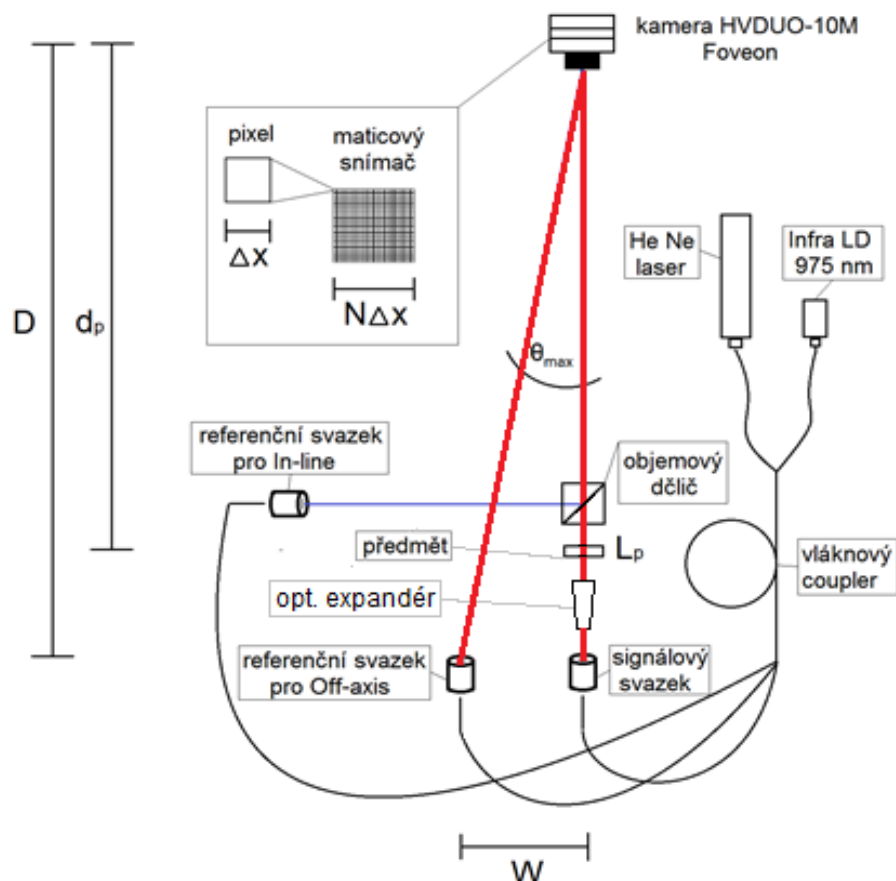
Rekonstrukce



Rekonstrukce optického vlákna v přiblížení

6.5 Uspořádání off-axis (mimoosové)

Pro mimoosové uspořádání experimentu, bylo zapotřebí obdobných optických elementů jako v případě osového uspořádání. Jediný rozdíl byl v tom, že v sestavě nebylo nutné použít objemový dělič optického svazku. U mimoosového uspořádání chceme, aby paprsky dopadali na snímač pod daným úhlem (jak můžete vidět na obr. 19 popřípadě obr. 12 – reference pro off-axis), v čemž spočívá hlavní odlišnost od osového uspořádání, kdy je nutné, aby paprsek signálový i referenční dopadaly na snímač v jedné ose. Velikost úhlu je určena vzdáleností v rovině mezi referenčním a signálovým svazkem a hodnota jejich maximální vzdálenosti W je určena vzorcem odvozeným ze (4.22): $W \leq \lambda \left(\frac{1}{2\Delta x} - \frac{L_p}{2\lambda d_p} \right) \cdot D$, ze vztahu vyplývá vliv použité vlnové délky na maximální možnou vzdálenost mezi referenčním a signálovým svazkem. Pro větší vlnovou délku λ můžeme tento úhel (θ_{max}) zvětšovat.

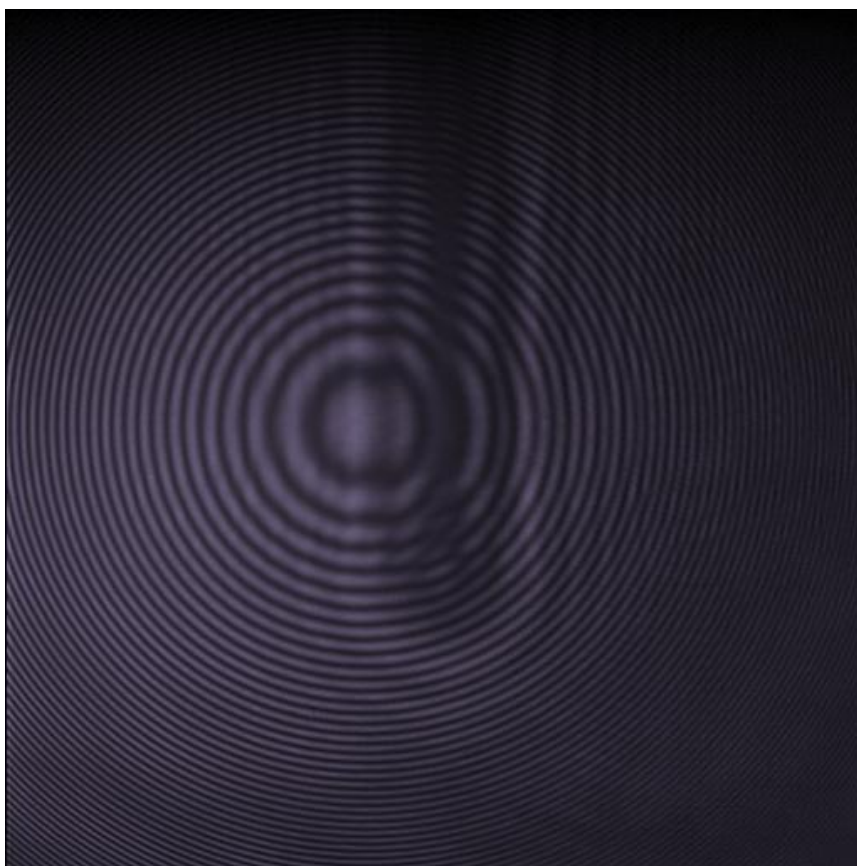


Obr. 19 – Schéma aparatury pro osové uspořádání (červeně vyznačeno)

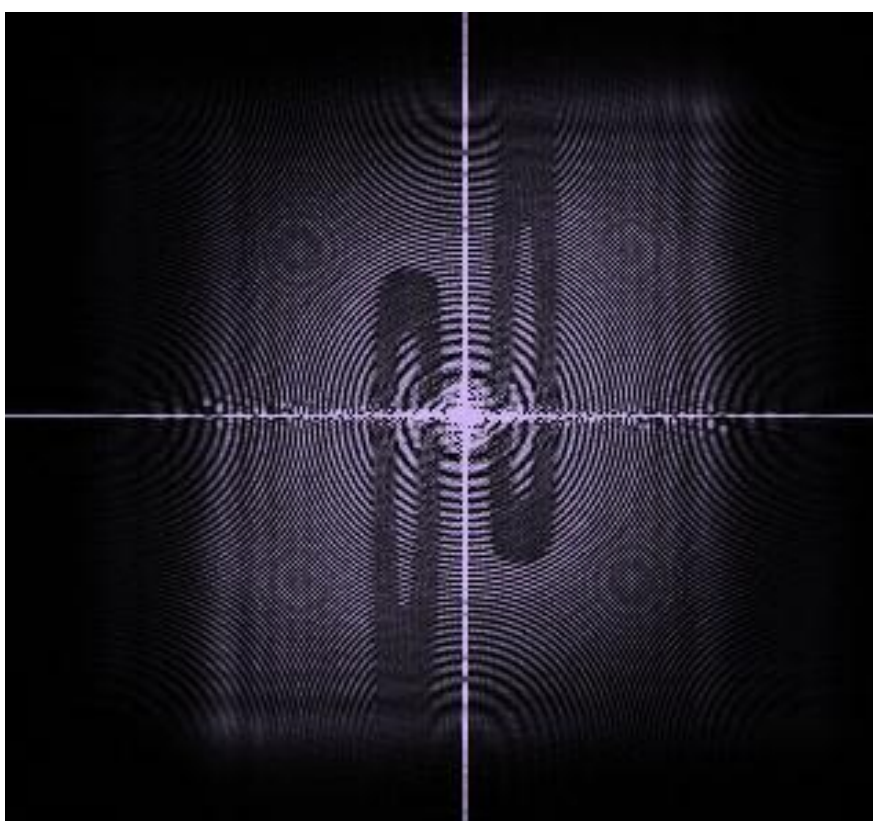
Na následujících stránkách jsou uvedeny hologramy, pořízené pomocí mimoosové metody (off-axis).

6.6 Záznam hologramu a rekonstrukce pro sestavu off-axis.

Hologramy ucha jehly, zaznamenané zářením LD o vlnové délce 975 nm.

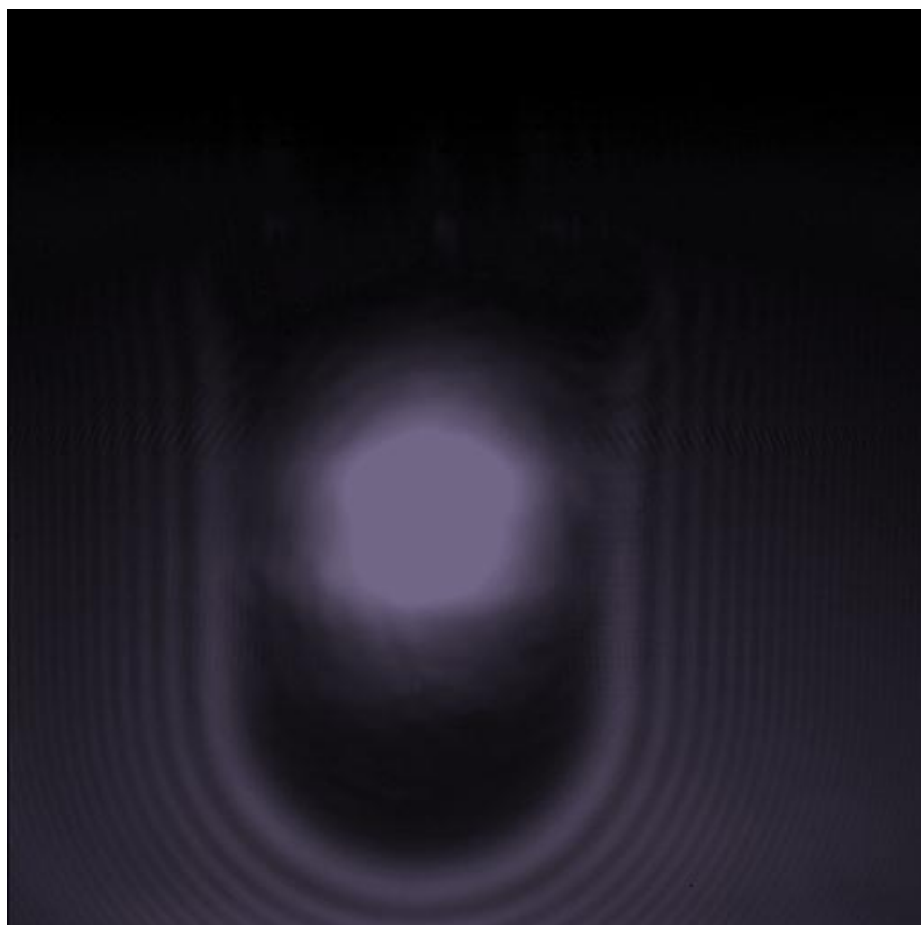


Zaznamenaný hologram

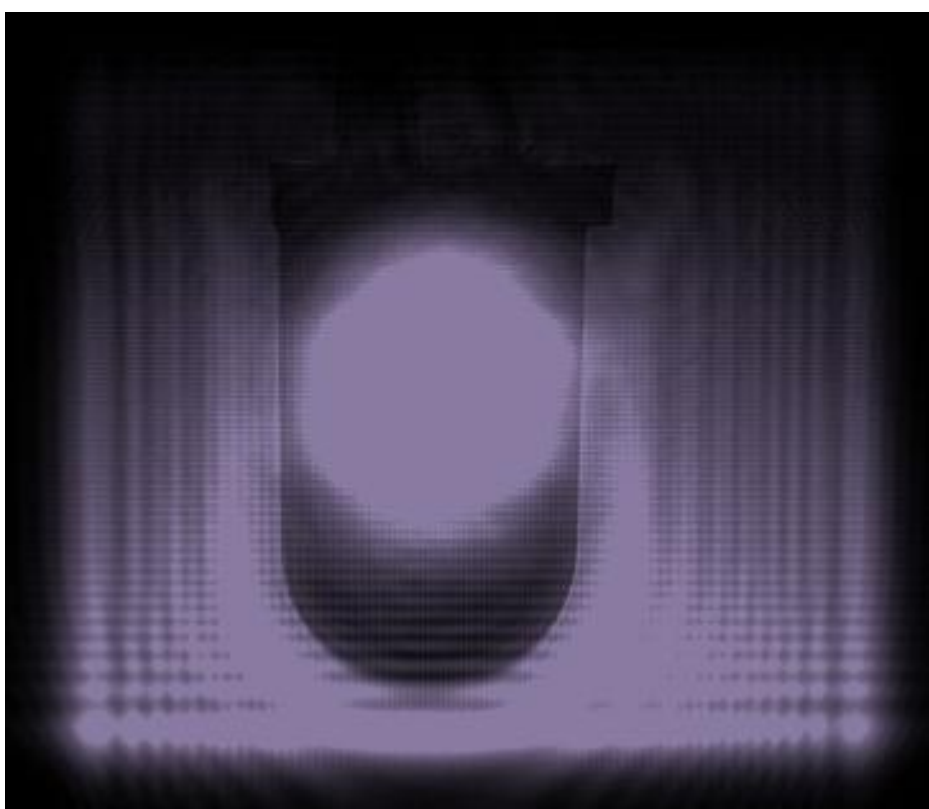


Rekonstrukce

Hologramy čiré LED diody, zaznamenané zářením LD o vlnové délce 975 nm.



Zaznamenaný hologram



Rekonstrukce

Závěr

Během realizace aparatury a záznamu hologramů v laboratoři a při vypracování této bakalářské práce jsem se postupně seznámil se základy a principy digitální holografie. A to jak po stránce teoretické, kdy jsou v práci zmíněny především základy, tak hlavně po stránce experimentální. Při nezanedbatelném množství hodin strávených v laboratoři jsem získal cenné zkušenosti, které bych rád uplatnil v následné diplomové práci, ve které bych rád pokračoval v podobné tématice. Při srovnávání metody in-line (osové) a metody off-axis (mimoosové), za použití laserové diody, generující na 975 nm, jako zdroje, jsem zjistil několik poznatků. Osová metoda, je oproti mimoosové metodě stabilnější, méně náročná na přesnost justáže soustavy a je i méně náchylná na otřesy. To je způsobeno tím, že prostorové frekvence nejsou u této metody tak vysoké. Metoda má také nižší požadavky na koherenční délku. S použitím mimoosové metody se dá dosáhnout vyšší prostorové frekvence a tedy jemnějšího interferenčního obrazce. Maximální prostorová frekvence interferenčního obrazce je dána úhlem mezi předmětovým a referenčním paprskem (tedy úhlem θ_{max}) ze vzorce $\theta_{max} \approx \lambda \left(\frac{1}{2\Delta x} - \frac{L_P}{2\lambda d_P} \right)$. S příliš velkou prostorovou frekvencí by nám však už nemusela dostačovat hustota a velikost snímacích bodů na maticovém snímači. Práce byla zajímavá také tím, že laserová dioda generovala záření mimo viditelnou oblast, což kladlo náročnější požadavky na přípravu experimentu. Dalším zajímavým poznatkem při práci v blízké infračervené oblasti bylo, že při záznamu hologramu halogenové žárovky, jsem zjistil, že křemenné sklo, ze kterého byla žárovka zhotovena, nepropouští vlnovou délku 975 nm. S použitým rekonstrukčním kódem vytvořeným v programu Matlab, jsem pracoval víceméně pasivně a pouze jsem aplikoval algoritmy, obsažené v literatuře. Během studia jsem zatím nemněl možnost se s programem Matlab blíže seznámit.

Použité zdroje a literatura

- [1] KREIS, T. *Handbook of Holographic Interferometry: Optical And Digital Methods*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim 2005.
- [2] SCHNARS, U., JUEPTNER, W. *Digital Holography Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction and Related Techniques*. Springer. Berlin, 2005.
- [3] VYŠÍN, I., ŘÍHA, J. *Paprsková a vlnová optika*. 1.vyd. Olomouc, 2012. s. 96-112. ISBN 978-80-244-3334-9.
- [4] Wikipedie – *Huygensův princip*, 2013 [cit. 17. 4. 2014]. Dostupné na World Wide Web: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Huygens%C5%AFv_princip>.
- [5] Optique ingénieur – *Holography : Recording/Reconstruction*[cit. 17. 4. 2014]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.optique-ingenieur.org/en/courses/OPI_ang_M02_C10/co/Contenu_04.html>.
- [6] GABOR, D. *A new microscopi c principle*. Nature. 1948. 161:777-778.
- [7] HARIHARAN, P. *Basicsof Holography*. 1. vyd. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. 161 s. ISBN 0-521-00200-1.
- [8] HIMMER, A. *Digitální holografie a její aplikace*. Olomouc: Přírodovědecká fakulta, 2012.
- [9] GOODMAN J. W., LAWRENCE R. W. *Digital image formation from electronically detected holograms*. vyd. 11. 1967. s. 77-79.
- [10] HUANG, T. S. *Digital holography*. IEEE. vyd. 159. 1971.s. 1335-1346.
- [11] KRONROD, A., MERZLYAKOV, N. S., YAROSLAVSKY, L. P. *Computer Synthesis of Transparency Holograms. Soviet Physics-Technical Physics*. vyd. 13. 1972. s. 414-418.

- [12] ASUNDI A. *Digital Holography for MEMS and Microsystem Metrology*. Wiley, 2011. ISBN 978-0-470-97869-6.
- [13] HECHT, J. *Holography and the laser*. Optics and Photonics News. 2010.
- [14] LEITH, E.N., UPATNIEKS. J. *Reconstructed Wavefronts and Communication Theory*. J. Opt. Soc. Am. 52. 1962. s. 1123-1128.
- [15] TESTORF M., LOHMANN A. W. *Holography in phase space*, *Applied Optics*, 47, A70-A77 2008.
- [16] BRYNGDAH O., LOHMANN A. *Single-Sideband Holography*, *Journal of the Optical Society of America*, 58, 620-& 1968.
- [17] *Foveon – Hanvision HVDUO-10M*. FOVEON, 2010 [cit. 2. 4. 2014]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.foveon.com/article.php?a=192>>.
- [18] LOŠŤÁK, J. *Technologie Foveon X3, kamera HVDUO-10M a její aplikace*. Olomouc: Přírodovědecká fakulta, 2006.
- [19] *Installation and Operation Manual*, HV-US 0005, 2004
- [20] Introduction modern digital holography matlab – *opticsopto electronics and photonics*, Cambridge universitipress [cit. 17. 4. 2014]. Dostupné na World Wide Web <<http://www.cambridge.org/fr/academic/subjects/physics/optics-optoelectronics-and-photonics/introduction-modern-digital-holography-matlab>>.
- [21] Introduction modern digital holography: With matlab – Ting-Chung Poon, Jung-Ping Liu – Knihy Google [cit. 17. 4. 2014]. Dostupné na World Wide Web: <http://books.google.cz/books?id=9xliAgAAQBAJ&dq=Introduction+to+Modern+Digital+Holography&hl=cs&sa=X&ei=duW0U8L2A4WsON6_gYAJ&redir_esc=y>.
- [22] Koherence (vlnění) – Wikipedie [cit. 18. 4. 2014]. Dostupné na World Wide Web <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Koherence_\(vln%C4%9Bn%C3%AD\)](http://cs.wikipedia.org/wiki/Koherence_(vln%C4%9Bn%C3%AD))>.

- [23] Koherence záření [cit. 18. 4. 2014]. Dostupné na World Wide Web <<http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0206.htm>>.
- [24] POPESCU, G. *Quantitative phase imaging of cells and tissues*. New York, 2011.
- [25] MOŤKA, L. *Základní principy, experimentální ověření a aplikace digitální 'in-line' holografie*. Olomouc: Přírodovědecká fakulta, 2012.

Použité obrazové zdroje

- [O1] - http://www.physicsoftheuniverse.com/images/quantum_double_slit.jpg
- [O2]- http://www.techmania.cz/edutorium/data/fil_2019.gif
- [O3]- <http://light.ece.illinois.edu/ECE460/PDF/Holography.pdf>
- [O4]- <http://light.ece.illinois.edu/ECE460/PDF/Holography.pdf>
- [O5]- <http://light.ece.illinois.edu/ECE460/PDF/Holography.pdf>
- [O6]- <http://light.ece.illinois.edu/ECE460/PDF/Holography.pdf>
- [O7] - https://encrypted-tbn1.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcR_bdwKx8twwkfx-86kceKw9uTmlPJrDiAnSVvc2LVOa_NfTz7gYw
- [O8] - <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/9d/Absorption-X3.svg/500px-Absorption-X3.svg.png>
- [O9]- <http://www.freepatentsonline.com/6632701-0-display.jpg>
- [O10] - http://books.google.cz/books?id=9xliAgAAQBAJ&dq=Introduction+to+Modern+Digital+Holography&hl=cs&sa=X&ei=duW0U8L2A4WsON6_gYAJ&redir_esc=y
- [O11] - MOŤKA, L. *Základní principy, experimentální ověření a aplikace digitální 'in-line' holografie*. Olomouc: Přírodovědecká fakulta, 2012.
- [O12] - 975 nm Fiber Bragg Grating Pump Laser, Data sheet, ThorLabs.
- [O13] - http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/pumping-laser-diodes-36218-6137085.jpg
- [O14] - 975 nm Fiber Bragg Grating Pump Laser, Data sheet, ThorLabs.