



Středoškolská technika 2023

Setkání a prezentace prací středoškolských studentů na ČVUT

Holografie

Nela Vítová

První soukromé jazykové gymnázium
Brandlova 875, 500 03 Hradec Králové

Anotace

VÍTOVÁ, Nela. *Holografie*. Hradec Králové, 2023. První soukromé jazykové gymnázium. Vedoucí práce doc. Ing. Filip Malý, Ph.D.

Práce je zaměřena na jednu z možností záznamu informací, která se nazývá holografie. Práce se věnuje popisu využití holografie v praxi a vysvětlení základních principů a postupů. Teoretická část práce je rozdělena do tří hlavních kapitol s následnými podkapitolami. První kapitola teoretické části je zaměřena převážně na podrobné seznámení s holografií. Jsou v ní definovány základní pojmy, uvedeny příklady praktického využití holografie v různých oborech a popsány různé typy hologramů. Kapitola se také věnuje budoucnosti holografie. Druhá kapitola nese název Základní princip holografie. Kapitola rozebírá fyzikální jevy, které se pojí s tvorbou hologramu, např. povaha světla, základy interference nebo základní vlastnosti laseru. Třetí kapitola se zaměřuje na metodiku tvorby hologramů a tvoří tak základ praktické části. Praktickým výstupem práce je zaznamenání obrazového hologramu jednoduchých objektů na fotocitlivé médium za použití reflexní a transmisní metody, zpracování fotocitlivého materiálu (vyvolání hologramu) a následná rekonstrukce hologramu nebo jeho zobrazení v bílém světle.

Klíčová slova: holografie, hologram, laser, interference, transmise, fotocitlivé médium, bílé světlo

Annotation

VÍTOVÁ, Nela. *Holografie*. Hradec Králové, 2023. First Private Language Grammar School. Thesis Supervisor doc. Ing. Filip Malý, Ph.D.

The work is focused on one of the options for recording of information, which is called holography. The work describes the usage of holography in practice and explains the basic principles and procedures. The theoretical part of the thesis is divided into three main chapters with subsections. The first chapter of the theoretical part is mainly focused on a detailed introduction to holography. It defines basic terms, gives examples of the practical use of holography in various fields, and describes different types of holograms. The chapter also devotes the future of holography. The second chapter is entitled Basic principle of holography. The chapter discusses the physical phenomena associated with the creation of a hologram, such as the nature of light, the basics of interference, or the basic properties of a laser. The third chapter focuses on the methodology of creating holograms and thus forms the basis for the practical part. The practical output of the work is the recording of an hologram of simple objects on a photosensitive medium using the reflection and transmission methods, the processing of the photosensitive medium (development of the hologram) and the subsequent reconstruction of the hologram or its display in the white light.

Keywords: holography, holograms, laser, interference, transmission, photosensitive medium, white light

Seznam použitých veličin

a	(m)	mřížková konstanta
c	(m·s ⁻¹)	rychlost světla
d	(m)	vzdálenost
k	(l)	pořadí
t	(s)	čas
T	(s)	perioda
U	(m)	amplituda
x	(m)	poloha
α, β, ϕ	(rad)	úhel
λ	(m)	vlnová délka

Seznam použitých zkratek

DS	dělič svazku
KO	kolimátor
M	zrcadlo
O	objektiv

OBSAH

Poděkování.....	Chyba! Záložka není definována.
Anotace	2
Annotation	3
Seznam použitých veličin	4
Seznam použitých zkratk.....	4
Obsah	5
Úvod	10
Záměr a cíle práce	10
1 Využití a principy holografie.....	11
1.1 Historie holografie.....	11
1.2 Holografie vs. hologram	12
1.3 Rozdíl mezi fotografií a hologramem	12
1.4 Využití holografie	12
1.4.1 Umění	12
1.4.2 Ukládání informací	13
1.4.3 Dynamická holografie pro on-line přenos 3D obrazu	13
1.4.4 Holografická interferometrie	14
1.4.5 Interferometrická (holografická) mikroskopie (DHM)	14
1.4.6 Zabezpečení	15
1.4.7 Metrologie, měření a montáž	15
1.5 Co není holografie (fauxlografie)	16
1.6 Typy hologramů	16
1.7 Budoucnost holografie	17
2 Základní princip holografie.....	18
2.1 Vlastnosti světla	18
2.1.1 Vlnová délka	18
2.1.2 Amplituda.....	18
2.1.3 Fáze vlny	19
2.1.4 Odras světla.....	19
2.1.5 Lom světla	19
2.2 Interference	20
2.3 Laser	22
2.3.1 Koherentní záření.....	23

2.3.2	Historie laseru	23
2.3.3	Princip laseru.....	25
2.3.4	Využití laseru	25
3	Různé metody záznamu obrazu za využití holografie	26
3.1	Metodika měření.....	26
3.2	Potřebné vybavení	26
3.2.1	Laserová dioda	26
3.2.2	Desky s fotocitlivou vrstvou	26
3.2.3	Chemikálie pro zpracování fotografických desek.....	27
3.2.4	Ostatní materiál	28
3.3	Uspořádání experimentů	29
3.4	Uspořádání pro záznam hologramů.....	30
3.4.1	Transmisní hologram.....	31
3.4.2	Reflexní hologram	32
3.4.3	Difrakční mřížka.....	32
3.5	Uspořádání pro rekonstrukci hologramu	33
3.5.1	Transmisní hologram.....	33
3.5.2	Reflexní hologram	34
3.5.3	Holografické difrakční mřížky.....	35
3.6	Holografická interferometrie	35
3.7	Průběh experimentů	37
3.8	Výsledky	39
3.8.1	Transmisní hologram.....	39
3.8.2	Reflexní hologram	41
3.8.3	Holografická difrakční mřížka.....	41
	Diskuse výsledků	43
	Závěr.....	44
	Seznam použité literatury	46
	Seznam obrázků	48
	Seznam tabulek.....	49

ÚVOD

Od nepaměti lidstvo touží po co nejpřesnějším a nejreálnějším zobrazení skutečnosti. Již ve starověké Číně a v antickém světě využívali lidé princip Camery obscury. Neukojitelná touha za poznáním napomohla vynálezů technik pro záznam a dlouhodobé uchování obrazu ve formě černobílé, později barevné fotografie. Ona touha napomohla i k vynálezů technologií, které umožňují přenos jednotlivých snímků či jejich sérií na velké vzdálenosti v reálném čase. Nikdo se dnes nepozastaví nad živým přenosem z druhé polokoule naší planety Země nebo z blízkého vesmíru. Videohovory se staly standardem. Fotografie a videa dokážou věrně zachytit obraz skutečnosti a ten kdykoliv zobrazit do plochy fotografického papíru nebo displeje. Informaci o skutečném rozložení scény, její hloubky a celkovou interpretaci fotografie zajišťuje až lidský mozek, který vytváří trojrozměrný obraz.



Obrázek 1: Camera obscura v Greenwich

Otázka záznamu a přenosu obrazu na velké vzdálenosti je tak vyřešena. Ale co otázka přenosu celých předmětů? Lidé sní o možnostech teleportace fyzických předmětů a živých bytostí. Tyto sny prozatím vyřešeny nejsou. Teleportace velkých objektů naráží na omezené možnosti současné fyziky a techniky. Možný a realizovatelný je však záznam a přenos celého světelného pole, které po náležité rekonstrukci dokáže vytvořit věrnou kopii jakéhokoliv 3D prostoru.

Záměr a cíle práce

Předložená práce se zabývá popisem principu holografie a následným použitím v praxi. Cílem práce je:

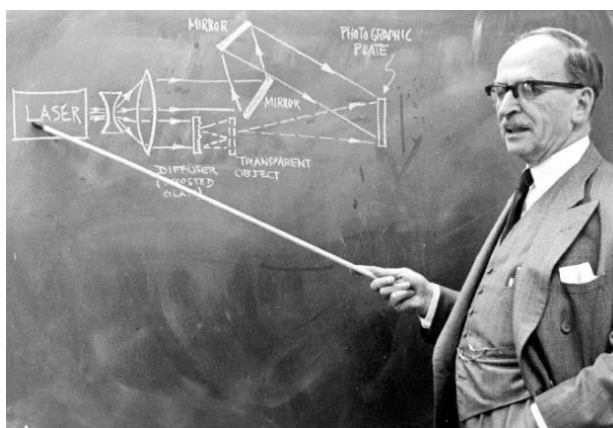
- provést rešerši možností současného využití holografické interferometrie,
- popsat základní fyzikální princip metody,
- navrhnout a provést experimenty využívající holografickou interferometrii k vytvoření trojrozměrného obrazu,
- navrhnout a provést experiment k vytvoření holografické mřížky.

1 VYUŽITÍ A PRINCIPY HOLOGRAFIE

1.1 Historie holografie

Termín holografie vznikl spojením dvou řeckých slov, „holos“-úplný a „graphé“-záznam. Jedná se o moderní a vyspělou formu technologie, která se používá pro záznam obrazců. Zaznamenaným obrazcům pomocí této technologie říkáme hologramy.

Za zakladatele holografie je považován Dennis Gabor, který princip holografie využil při vylepšování elektronové mikroskopie. V roce 1971 Dennis Gabor obdržel za svoji práci Nobelovu cenu za fyziku. Princip byl patentován v roce 1974.



Obrázek 2: Denis Gabor 1900–1979

Rozvoj holografie nastal s objevením laseru v roce 1960. V roce 1962 byly vědci Yuriem Denisyukem, Emmettem Leithem a Jurisem Upatnieksem vytvořeny první hologramy 3D objektů.

V současné době tato technologie nachází uplatnění ve výzkumu i praxi např. magnetické disky, bankovníctví, ochranné známky atd. [1].



Obrázek 3: 1964 jeden z prvních holografických obrazů Emmeretta Leithe

1.2 Holografie vs. hologram

Na začátku je důležité si říct rozdíl mezi holografií a hologramem. Neboť holografie je metoda záznamu a trojrozměrné rekonstrukce obrazu. Naopak hologram je záznam předmětu v citlivé vrstvě fotocitlivého materiálu. Nese tedy informace nejen o intenzitě, ale i o fázi světla odražené od zaznamenávaného předmětu [2], [3].

1.3 Rozdíl mezi fotografií a hologramem

Fotografie zachycuje dvojrozměrný obraz objektu. Při pořízení fotografie, světlo odražené od objektu prochází objektivem fotoaparátu. Tento obraz je zmenšeně a převráceně zaznamenán na fotografický negativ nebo fotocitlivý čip, který je schopen zaznamenat intenzitu světla přicházející z fotografovaného objektu. V případě fotografie je zaznamenána pouze intenzita světla. Ostatní informace, jako je vzdálenost objektu, nebo informace o tvaru, není zaznamenána. Proto, když pořizujeme fotografický obraz, získáme jen informaci o barvě a velikosti předmětu, ale prostorový dojem si vytvoří sám pozorovatel.

Při použití holografie jsme schopni zaznamenat trojrozměrnou scénu obrazce. Na rozdíl od fotografie hologram dokáže zaznamenat nejen intenzitu světla, ale i jeho fázi. Díky těmto informacím umíme zrekonstruovat přesný 3D obraz objektu [4].

1.4 Využití holografie

Hologramy, s nimiž se v praxi nejčastěji setkáváme, se nachází na různých dokumentech, výrobcích a v řadě odvětvích.

1.4.1 Umění

Velmi rozšířené uplatnění pro holografii je v umění. Přestože se hologramy vyrábějí pomocí laserů, některé typy hologramů lze pozorovat v běžném bílém světle.

Každý hologram je 3D obraz. Ne každý obraz, který vypadá, že má tři rozměry je ve skutečnosti hologram. Některé z těchto „nehologramů“ mohou být samy o sobě velkolepé.

3D obraz, který můžeme vidět například na výstavách, není o nic větší iluzí než obyčejná dvourozměrná fotografie. Hologramy považujeme pouze za iluze, protože na ně ještě nejsme zvyklí. Jak poznamenává Catta-Preta, existují i jiné způsoby, jak vytvářet zdánlivé 3D obrazy, které jsou skutečnými iluzemi. V původním filmu Star Wars: Epizoda IV. si mladý Luke Skywalker prohlížel prostřednictvím astromechanického droida R2-D2 „něco“, co vypadalo jako hologram princezny Leiy Organy. Ale film je tradiční 2D, a tak je hologram Leiy „pouze“ speciální efekt. Všechny tyto optické efekty mohou být pro lidské oko působivé, avšak od holografie se liší tím, že skutečně nevidíme 3D obraz.

Mezi přední současné umělce, kteří se zabývají hologramy, patří Margaret Benyon [5]. Margaret Benyon, původně malířka, začala vyrábět umělecké hologramy v roce 1968, kdy byla holografie dostupná pouze vědcům. Jejím cílem bylo odstranit holografii z vědecké laboratoře a rozšířit hranice toho, co bylo tradičně vnímáno jako výtvarné umění. Byla dlouho uznávána jako přední kreativní holografická umělkyně. Vystavovala po celém světě a její díla jsou v mnoha veřejných i soukromých sbírkách.



Obrázek 4: Tigirl by Margaret Benyon. Reflection hologram, glass. 16 in x 12 in. 1985

1.4.2 Ukládání informací

Ukládání holografických dat je technologie pro ukládání velkého objemu informací a dat na pevném médiu. Umožňuje vytvořit jeden úložný svazek na kterém je umístěno velké množství dat. Je také známý jako trojrozměrné (3D) úložiště. Holografická média se dělí na média pro jeden zápis (nezměnitelná) a prepisovatelná (změnitelná). Prepisovatelného holografického ukládání lze dosáhnout prostřednictvím fotorefrakčního dopadu v krystalech. [2]

1.4.3 Dynamická holografie pro on-line přenos 3D obrazu

Dynamická holografie ukazuje možnost přenosu 3D holografických informací v reálném čase se snímkovou frekvencí TV. Dynamické hologramy se od konvenčních liší tím, že v běžném hologramu je několik perspektivních pohledů sestaveno do 1 holografického tisku, což vede k vnímání 3D struktury se změnou úhlu pohledu. Naproti tomu u dynamického hologramu je podobným způsobem sestaveno více snímků obsahujících po sobě jdoucí časové body, což vede k vnímání pohybu při změně úhlu pohledu [6].

Holografie byla široce rozšířena ve filmech, TV a často ve sci-fi, počínaje koncem 70. let 20. století. Spisovatelé sci-fi absorbovali myšlenku světa, který je obklopen hologramy. Tuto iluzi šířili příliš nadšení vědci a podnikatelé, kteří se jí snažili prodat. To vedlo k tomu, že veřejnost nadměrně očekávala schopnost holografie, kvůli jejím nerealistickým zobrazením ve většině beletrií, kde se jedná o plně trojrozměrné počítačové projekce, které jsou někdy hmatatelné díky použití silových polí. Příklady tohoto typu zobrazení zahrnují například film Star Wars (hologram princezny Lei Organy, velmistra Yody), seriál Červený trpaslík (Arnold Jidáš

Rimmer – status mrtví hologram) a Star Trek (tréninkové a rekreační zařízení). Představa, kterou nám tyto filmy dávají je mnohdy velice odlišná od reality. Závěrem lze konstatovat, že v současné době není možné vyrobit takový hologram, jako známe z filmů.



Obrázek 5:-Umělecké znázornění možností dynamické holografie, Star Wars: Episode III – Revenge of the Sith (2005)

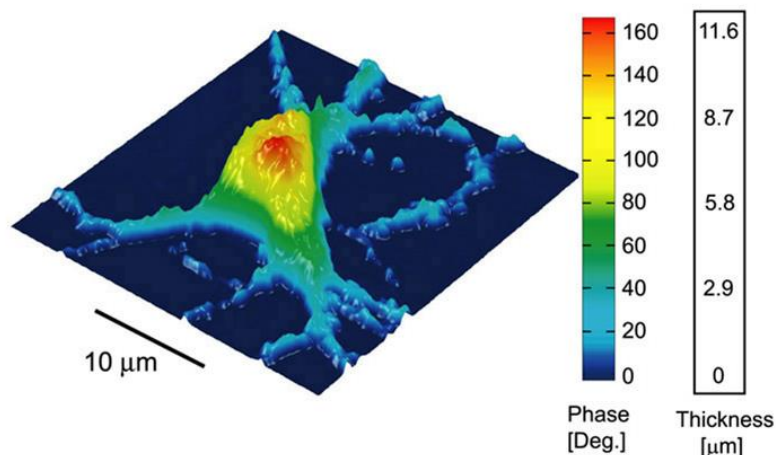
Holografie posloužila jako inspirace pro videohry s prvky sci-fi. Jako příklad lze uvést videohru Command & Conquer: Red Alert 2. Zkreslené představy taktické hry využívají hologramů (tanky Mirage – maskovatelné jako stromy). Dále sci-fi hra Halo: Reach a Crysis 2 (hologramy používány k matení nepřítele) [7].

1.4.4 Holografická interferometrie

Laserová holografická interferometrie je technika kombinující laserovou interferometrii a holografii. Princip holografie je založen na tom, že současným záznamem referenčního světelného (laserového) paprsku a paprsku objektového, lze dosáhnout repliky objektu. Obraz zaznamenaný na holografické desce se nazývá hologram objektu, který nese jak amplitudu, tak fázi paprsku odraženého od objektu nebo objektem procházející. První expozice holografické desky má za následek referenční hologram, zatímco druhá expozice umožní záznam všech změn objektu. Výsledkem je interferenční struktura, obsahující všechny informace o změně, ke které došlo mezi první a druhou expozicí [8].

1.4.5 Interferometrická (holografická) mikroskopie (DHM)

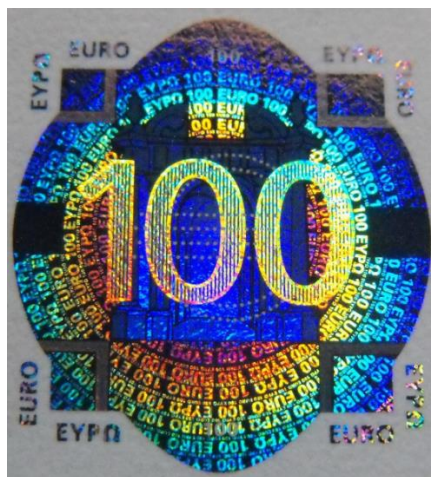
Digitální holografická mikroskopie (DHM) je typ mikroskopie, který kombinuje digitální holografii s mikroskopií a umožňuje lepší vizualizaci objektů. DHM se liší od jiných typů mikroskopie, protože nevytváří promítnutý obraz objektu, ale místo toho vytváří digitální hologram ze světelných vln, které prošly kolem objektu. K vytvoření hologramu se používá numerický rekonstrukční algoritmus v počítači. V tradiční mikroskopii se k vytvoření vzorku obrazu používá zobrazovací formovací čočka. Existují dva odlišné typy digitální holografické mikroskopie: transmisní DHM a reflexní DHM. Transmisní DHM měří rozdíl v optické dráze paprsku, který prochází analyzovaným vzorkem. Tento typ mikroskopie je často užitečný při měření mikrooptických komponentů, mikrofluidních zařízení a defektů uvnitř průhledných vzorků. Reflexní DHM vytváří obraz na základě odražené vlnoplochy od vzorku. To poskytuje pohled na topografii povrchu vzorku [9].



Obrázek 6: Obraz živých myších kortikálních neuronů, Digital holographic microscopy to identify cellular biomarkers of psychiatric disorders, 01 December 2016 Pierre Marquet, Pascal Jourdain and Pierre Magistretti

1.4.6 Zabezpečení

Hologramy se běžně používají pro zabezpečení. Jsou replikovány z hlavního hologramu, jehož vytvoření vyžaduje drahé, specializované a technologicky pokročilé vybavení, a proto je obtížné je padělat. Jsou široce používány v ochranných prvcích mnoha bankovek. Lze je nalézt také na kreditních a bankovních kartách, kolkových známkách, cestovních, průkazech totožnosti, knihách, obalech potravin, DVD a sportovním vybavení. Takové hologramy se nacházejí v různých formách. Jedná se například o lepicí proužky, které jsou laminovány na obalech pro spotřební zboží. Dále holografické štítky na elektronických produktech. Často obsahují textové nebo obrazové prvky k ochraně před paděláním.



Obrázek 7: Holografická ochrana €100 bankovky

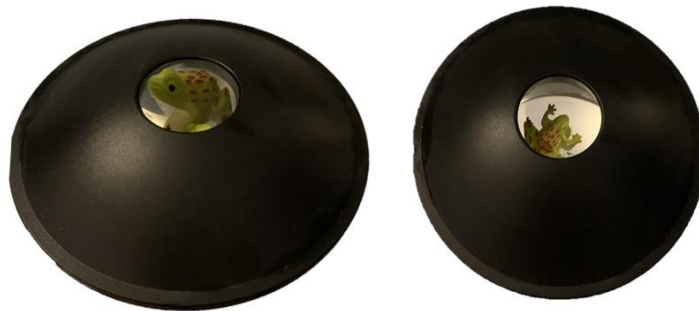
1.4.7 Metrologie, měření a montáž

Holografické skenery se používají na poštách, ve větších přepravních společnostech a v automatizovaných dopravníkových systémech k určení trojrozměrné velikosti zásilek. Často se používají ve dvojici s kontrolními váhami, aby umožnily automatizované předbalení daných objemů.

Významnou aplikací je využití holografie a holografické interferometrie v metrologii při měření tvaru a tvarových odchylek přesných ploch. Významnou oblast tvoří využití holografie při montáži složitějších celků například v automobilovém nebo elektrotechnickém průmyslu [11].

1.5 Co není holografie (fauxlografie)

Každý hologram je 3D obraz, ale ne každý obraz, který vypadá, že má tři rozměry, je ve skutečnosti hologram. Někdy se jedná pouze o optický dojem prostorového obrazu. Tyto nepravé hologramy nazýváme fauxlografi. Na rozdíl od holografie nevyžadují koherentní neboli laserové světlo. Můžeme je například vidět využité při projekci za pomoci smartphonu. Díky bílému světlu z mobilního telefonu a soustavy čtyř zrcadel umístěných do čtverce vzniká 3D obrazec. Tento 3D obrazec jsme schopni vidět i na běžném bílém světle bez použití laserového světla [12].



Obrázek 8:Projekce 3D žáby (autor, 2023)

1.6 Typy hologramů

Existují dva základní typy hologramů tzv. transmisní a reflexní. Hlavní rozdíl mezi nimi je ve způsobu, kterým jsou zaznamenávány.

Transmisní typ hologramu získáváme při použití dostatečně širokého svazku světelných paprsků vyzařovaných laserem, který se díky optickým prvkům (např. polopropustné zrcadlo) rozdělí na dva svazky. První, tzv. osvětlovací svazek, který dopadá na zobrazovaný objekt. Odrazem od objektu vznikne tzv. předmětový svazek. Tento svazek v sobě nese informace nejen o intenzitě světla, které předmět vyzařuje ale i o jeho trojrozměrné struktuře, které odpovídá fázi odražené vlny. Přinesené informace jsou následně zaznamenávány do fotografického negativu tak, že předmětový svazek interferuje s druhým, tzv. referenčním svazkem. V místech, kde se nachází interferenční maximum je fotografický negativ nejvíce osvětlený naopak v místech s interferenčním minimem je osvětlení nejnižší. Pro přesné zaznamenání hologramu je třeba velké přesnosti a mechanické stability polohy všech součástí a zařízení.

Druhý typ, tedy reflexní hologram, vzniká pouze pomocí jednoho laserového paprsku. Tento paprsek dopadá na fotocitlivý materiál a interferuje se svazkem, který fotografickým

materiálem prošel a odrazil se od zobrazovaného předmětu. Při rekonstrukci reflexního hologramu je zdroj i rekonstruovaná vlna ve stejném poloprostoru. [13].

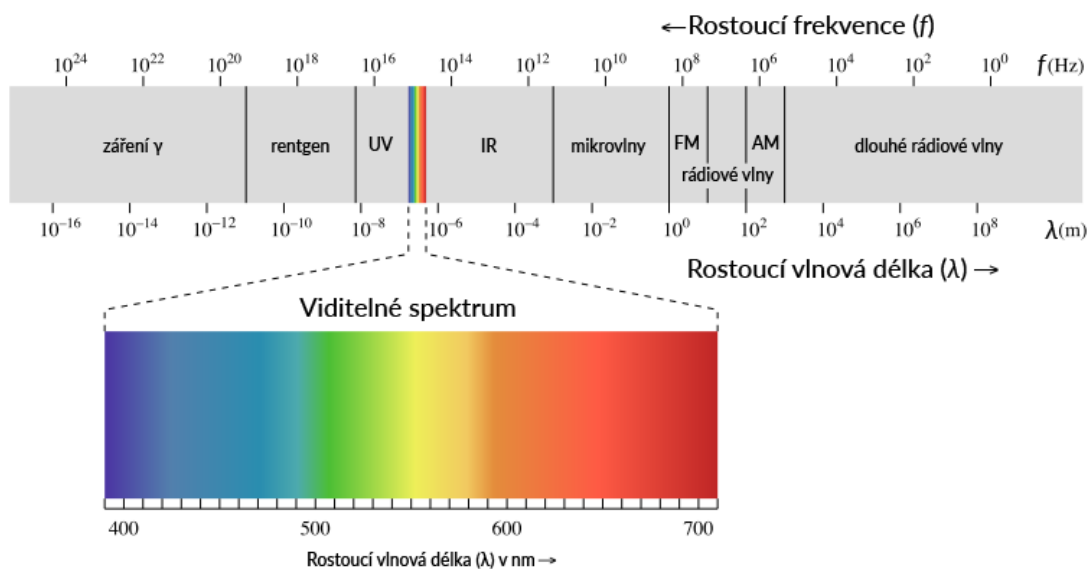
1.7 Budoucnost holografie

Holografie je veřejností stále považována za sci-fi. Vědci ale tvrdí, že se brzy stane nedocenitelnou v mnoha oborech, jako je medicína a astronomie. Jak už bylo více zmíněno, například v digitální holografii, umožňuje vytvořit skutečnou trojrozměrnou vizualizaci objektů a scén. Je to metoda zaznamenávání informací o objektu a obnovení jeho obrazu na trojrozměrném povrchu za pomoci amplitudy světla (jako ve fotografii). Pro pozorování hologramu přitom nejsou zapotřebí žádné speciální brýle ani umístění pozorovatele, pouze koherentní typ světla, kterým je laser. Rychlý rozvoj digitální holografie v poslední době začal právě s příchodem vysoce kvalitních digitálních kamer a fotoaparátů. Digitální holografie se již používá v lékařských a biologických zobrazovacích systémech, při šifrování, přenosu a skladování dat a umožňuje zvyšovat bezpečnost produktů, bankovek a bankovních karet. Slibným trendem je v holografii také holografický 3D tisk. Rychle se rozvíjí digitální holografie použitelná ve vědeckém a aplikovaném výzkumu, zejména digitální holografická mikroskopie (DHM) a interferometrická mikroskopie.

2 ZÁKLADNÍ PRINCIP HOLOGRAFIE

2.1 Vlastnosti světla

Světlo je elektromagnetické záření, které si můžeme představit jako energii se specifickou vlnovou délkou. Významnými parametry záření jsou vlnová délka λ , amplituda U a fáze φ . Mezi další parametry patří polarizace, koherence aj.



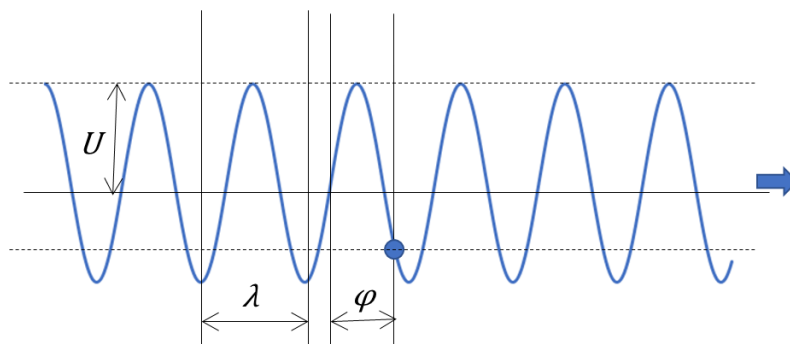
Obrázek 9: Elektromagnetické spektrum. (Obrázek z UC Davis ChemWiki, CC-BY-NC-SA 3.0)

2.1.1 Vlnová délka

Vlnová délka je definována jako vzdálenost, kterou urazí vlnění během jedné doby kmitu. Pro vztah mezi vlnovou délkou λ , rychlostí světla c a frekvencí f platí $\lambda = c/f$. Velikost vlnových délek závisí na množství energie, kterou vlna obsahuje. Čím kratší je vlnová délka, tím víc energie vlna obsahuje, a naopak čím delší je vlnová délka, tím má nižší energii a schopnosti např. proniknout do lidské tkáně. Vlnové délky světla se většinou uvádí v nanometrech (nm). Celé spektrum záření, které se nazývá elektromagnetické spektrum, zahrnuje četné vlnové délky s různými frekvencemi a barvami, jako je například červené světlo (v rozsahu okolo 650nm) nebo modré světlo (v rozsahu 380–500nm). Spektrum záření zahrnuje jak viditelné světlo, které je vidět pouhým lidským okem, jako např. již zmíněné červené a modré světlo. Tak zároveň i neviditelné světlo, jako např. infračervené světlo [14].

2.1.2 Amplituda

„Vzdálenost“ mezi vrcholem a středovou osou vlny se nazývá amplituda. Tato vlastnost je spojována s jasnem záření a množstvím přenášené energie [26].



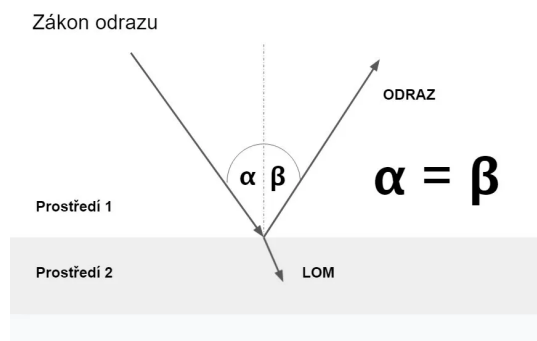
Obrázek 10: Vlastnosti světla, vlnová délka λ , amplituda U a fáze φ . (autor, 2023)

2.1.3 Fáze vlny

Fáze vlny je bezrozměrnou veličinou, která určuje vztah výchylky elektromagnetické světelné vlny k danému místu a času v závislosti na výchylce vlny v časovém a prostorovém počátku [26].

2.1.4 Odraz světla

Dalším důležitým pojmem je odraz světla. Odraz světla nastává na hladkém rozhraní mezi neprůhledným prostředím např. vzduch a vyleštěný kov. Zároveň odraz se také může částečně objevit na rozhraní mezi dvěma průhlednými prostředími např. vzduch a sklo [16].

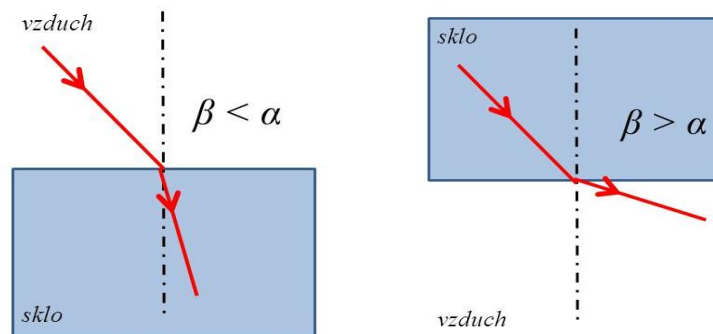


Obrázek 11:-Zákon odrazu světla (autor, 2023)

2.1.5 Lom světla

Víme, že světlo se šíří přímočaře. Avšak to platí pouze tehdy, pokud se záření šíří stále ve stejném optickém prostředí např. pouze ve vzduchu nebo vodě. Nastane-li však situace, kde světlo přechází z jednoho prostředí do druhého, dochází k jevu, který se nazývá lom světla. Záření se při přechodu z jednoho prostředí do druhého láme. Směr, kterým záření po zlomu získá je závislé na optických vlastnostech obou prostředí, kterými záření prochází.

Při vzniku lomu mohou nastat dvě různé situace. První situací je tzv. lom ke kolmici. Při tomto zlomu prochází paprsek vzduchem a následně kvůli změně prostředí dochází k zpomalení rychlosti paprsku. Tak že se paprsek světla přiblíží blíže ke kolmici [27].



Obrázek 12:-Lom světla (autor, 2023)

Opačný případ lomu nazýváme lom od kolmice. Kde se naopak světlo, které projde předmětem odchyluje od kolmice.

2.2 Interference

Interference záření neboli skládání záření je soubor jevů, při kterém dochází k vzájemnému ovlivňování, střetávání, prolínání, sčítání a skládáním světelných vln. V mechanickém vlnění se při skládání sčítají amplitudy okamžitých výchylek. Při elektromagnetickém vlnění se sčítají okamžité hodnoty elektrické intenzity a magnetické indukce. K interferenci může dojít při skládání dvou nebo více vln. K interferenci dochází, jsou-li současně splněny následující podmínky. Vlnění musí mít stejnou frekvenci a zároveň fázový rozdíl vlnění se s časem nemění. Takové vlnění, které je s časem konstantní, je nazýváno koherentním.

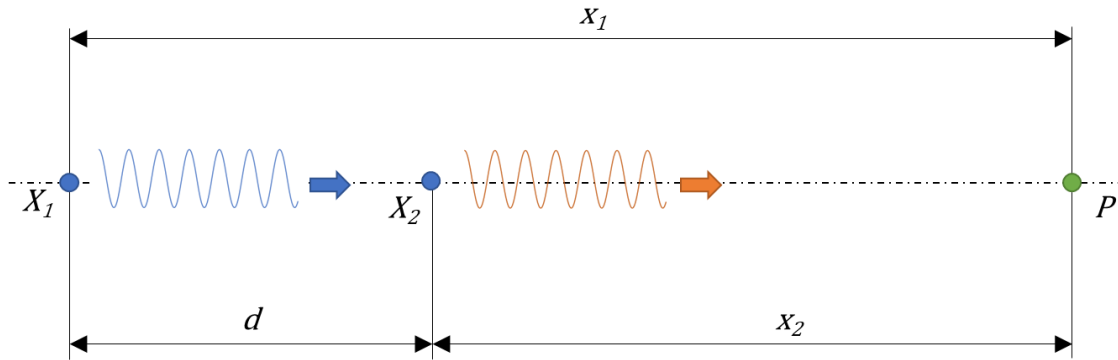
Interference prostorových světelných vln je pro přesný matematický popis poměrně náročným problémem. Základní princip interference a z toho vycházející holografie a holografické interferometrie je možné, s významným zjednodušením, popsat na případu interference jednorozměrných vln, které vychází z dvou různých zdrojů [17], [18], [19].

Vlnění můžeme popsat harmonickou funkcí ve tvaru:

$$u = U \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right),$$

kde U je amplituda a T perioda. Dalšími parametry, které charakterizují vlnění, jsou fázová rychlost c a vlnová délka $\lambda = cT$.

Představme si, že umístíme dva totožné zdroje harmonického vlnění do bodů X_1 a X_2 . Oba zdroje budeme pozorovat z místa P , které je od X_1 vzdálené o x_1 a od X_2 o x_2 . (viz obrázek).



Obrázek 13: Interference vlnění z dvou zdrojů (autor, 2023)

V bodě P jsou pozorované kmity z bodu X_1 jako:

$$u_1 = U \sin\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi x_1}{\lambda}\right),$$

kde $\frac{2\pi x_1}{\lambda}$ vyjadřuje fázové posunutí. Obdobně, pro kmity z bodu X_2 je v místě P pozorována vlna ve stavu:

$$u_2 = U \sin\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi x_2}{\lambda}\right).$$

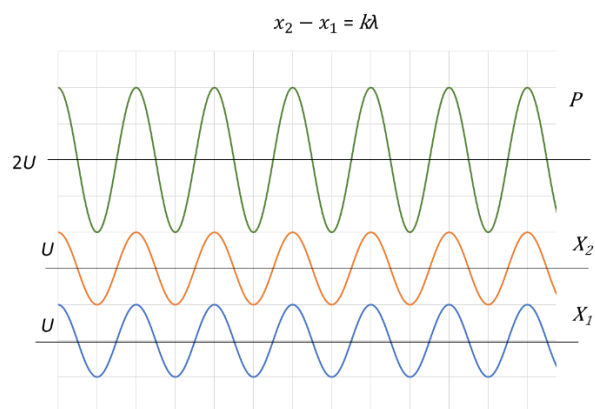
Výsledné pozorované vlnění vznikne součtem obou vln. Platí tedy:

$$\begin{aligned} u &= u_1 + u_2 = U \left[\sin\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi x_1}{\lambda}\right) + \sin\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi x_2}{\lambda}\right) \right] = \\ &= 2U \cos\left(\frac{\pi(x_2 - x_1)}{\lambda}\right) \sin\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{x_2 + x_1}{2\lambda}\right). \end{aligned}$$

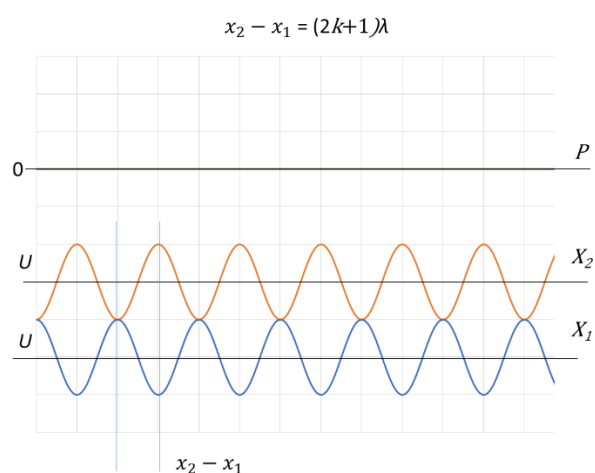
Ze vztahu je zřejmé, že amplituda výsledného vlnění závisí na vzdálenosti bodů X_1 a X_2 a nezávisí na čase.

Z výsledku vyplývá, že interferencí dvou světelných vlnění jsme schopni získat informaci nejen o intenzitě světla, ale také o fázovém posunutí mezi jednotlivými zdroji. Tento poznatek je klíčový pro holografii a holografickou interferometrii.

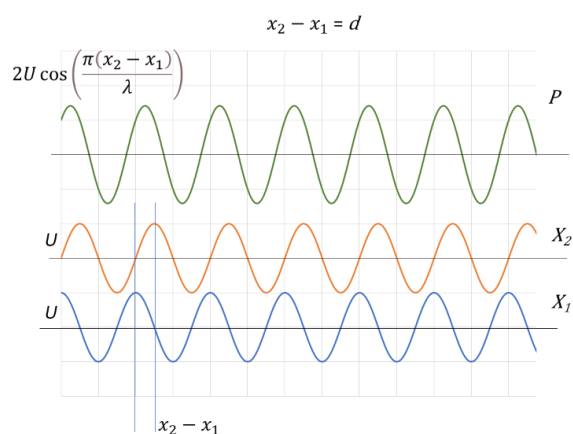
Obrázky níže ukazují výsledné vlnění pro významné fázové posunutí mezi zdrojem X_1 a X_2 .



Obrázek 14: Příklad interference dvou vlnění, kdy dochází k maximálnímu zesílení. Vlnění jsou ve fázi (autor, 2023)



Obrázek 15: Příklad interference dvou vlnění, kdy dochází k vyrušení vlnění. Vlnění jsou s opačnou fází (autor, 2023)



Obrázek 16: Příklad obecné interference dvou vln. Amplituda výsledné vlny je závislá na fázovém posunutí (autor, 2023).

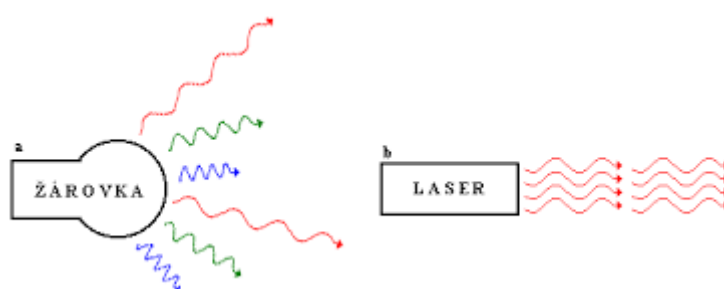
2.3 Laser

Laser (**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation – zesilování světla stimulovanou emisí záření) je zdroj světla. Tento zdroj vychází z vysoce koherentního elektromagnetického záření. Nejčastěji se vyskytuje ve viditelné, ultrafialové nebo infračervené

oblasti spektra. Toto záření vzniká díky stimulované emisi ¹záření aktivních částic, např. atomů, molekul, iontů a elektronů, buzených vnějším zdrojem energie. Vzniklá energie může být však soustředěna pouze v krátkém časovém intervalu. Laser je tedy zdroj koherentního, vysoce směřovaného světelného paprsku. Podle fyzikálního principu použitého při generování záření dělíme lasery na pevnolátkové, plynové, polovodičové, kapalinové a lasery s volnými elektrony. Podle režimu činnosti se lasery dělí na kontinuální a pulsní [20], [21], [22].

2.3.1 Koherentní záření

Koherence (z lat. Cohaerere – souvislý) je souvislost mezi světlem, které vzniká při skládání vln. Základním principem vzniku koherence je princip superpozice, tzv. sčítání, či integrace intenzit elektrického a magnetického pole v prostoru a času.



Obrázek 17: Světelné vlny vzniklé bílým světlem a laser (autor, 2023)

Lasery generují koherentní, monochromatické světlo v mnoha vlnových délkách, viditelné i neviditelné, v závislosti na typu laseru.

Vlastnost koherence dělá lasery velmi odlišné od typických světelných zdrojů, a velmi nebezpečné pro oči a kůži. Vlastnosti koherence činí lasery nebezpečnými i při velmi nízkých výkonech. Některé lasery, které pracují s výkonem pouhých několika miliwattů (mW) nebo méně, mohou při expozici způsobit okamžité poškození oka nebo kůže. Protože laserové světlo je monochromatické a koherentní, vzdálenosti, se kterými mohou být lasery nebezpečné, jsou poměrně dlouhé [30].

2.3.2 Historie laseru

Princip laseru vychází z tezí Alberta Einsteina z roku 1916, že za správných okolností by atomy mohly uvolňovat přebytečnou energii jako světlo – buď spontánně, nebo když jsou stimulovány světlem. Německý fyzik Rudolf Walther Ladenburg poprvé pozoroval stimulovanou emisi v roce 1928, i když se v té době zdálo, že nemá žádné praktické využití.

V roce 1951 Charles H. Townes, na Kolumbijské univerzitě v New Yorku, přemýšlel o způsobu generování stimulované emise na mikrovlnných frekvencích. Na konci roku 1953 předvedl funkční zařízení, které soustředilo energetické hladiny, stimulované emise a molekuly amoniaku do rezonanční mikrovlnné dutiny, kde vyzařovaly čistou mikrovlnnou frekvenci.

¹Stimulované emise – Kvantový jev, při kterém dopadající částice (fotony) stimuluje přechod excitovaného elektronu do základního stavu za současného vyzáření částice o stejných vlastnostech jako má částice stimulující.

Townes pojmenoval zařízení maser pro „mikrovlnné zesílení stimulovanou emisí záření“. Aleksandr Michajlovič Prochorov a Nikolaj Gennadijevič Basov z P.N. Lebeděvův fyzikální institut v Moskvě nezávisle popsal teorii provozu maseru. Za svou práci se všichni tři podělili o Nobelovu cenu za fyziku z roku 1964.

V polovině 50. let následoval intenzivní výzkumu maserů. Masery našly pouze omezený rozsah aplikací jako nízkošumové mikrovlnné zesilovače a atomové hodiny. V roce 1957 Townes navrhl Arthuru L. Schawlowovi (tehdy v Bellových laboratořích), aby se pokusili rozšířit působení maseru na mnohem kratší vlnové délky infračerveného nebo viditelného světla. Townes také diskutoval na Kolumbijské univerzitě s Gordonem Gouldem, který rychle vyvinul své vlastní laserové nápady. Townes a Schawlow publikovali své nápady na „optický maser“ v zásadním článku ve vydání Physical Review z 15. prosince 1958. Mezitím Gould vymyslel slovo laser a napsal patentovou přihlášku. Zda by měl být Townes nebo Gould považován za „vynálezce“ laseru, se tak stalo předmětem intenzivní debaty a vedlo k letitým soudním sporům. Nakonec Gould obdržel řadu čtyř patentů počínaje rokem 1977, které mu vynesly miliony dolarů na licenčních poplatcích.

Townes-Schawlowův návrh vedl několik skupin k pokusu sestrojít laser. Gouldův návrh se stal základem utajované vojenské zakázky. Úspěch dosáhl nejprve Theodore H. Maiman, který zvolil jiný přístup v Hughes Research Laboratories v Malibu v Kalifornii. Vypaloval jasné pulsy z fotografické bleskové lampy, aby vzbudil atomy chromu v krystalu syntetického rubínu, materiálu, který si vybral, protože pečlivě studoval, jak absorbuje a vyzářuje světlo, a vypočítal, že by měl fungovat jako laser. 16. května 1960 vytvořil červené pulsy z rubínové tyčinky o velikosti konečku prstu. V prosinci 1960 Ali Javan, William Bennett, Jr., a Donald Herriott v Bellových laboratořích postavili první plynový laser, který generoval kontinuální infračervený paprsek ze směsi helia a neonu. V roce 1962 Robert N. Hall a spolupracovníci z výzkumného a vývojového centra General Electric v Schenectady v New Yorku vyrobili první polovodičový laser.

Zatímco lasery rychle zaujaly představivost veřejnosti, možná pro svou podobnost s „tepelnými paprsky“ sci-fi, vývoj praktických aplikací trval roky. Mladá fyzička jménem Irnee D’Haenensová, když pracovala s Maimanem na rubínovém laseru, vtipkovala, že zařízení je „řešením hledajícím problém“ a linie přetrvává v laserové komunitě mnoho let. Townes a Schawlow očekávali, že laserové paprsky budou použity v základním výzkumu a budou vysílat signály vzduchem nebo vesmírem. Gould si představoval výkonnější paprsky schopné řezat a vrtat mnoho materiálů. Klíčový časný úspěch přišel koncem roku 1963, kdy dva výzkumníci z University of Michigan, Emmett Leith a Juris Upatnieks, použili lasery k vytvoření prvních trojrozměrných hologramů (viz holografie).

Helium-neonové lasery byly první lasery s širokým komerčním využitím. Protože mohly být upraveny tak, aby generovaly viditelný červený paprsek namísto infračerveného, našli okamžité použití promítání přímých čar pro vyrovnání, průzkum, konstrukci a zavlažování. Brzy oční chirurgové pomocí pulzů z rubínových laserů přivářili oddělené sítnice zpět na místo, aniž by se muselo řezat do oka. První rozsáhlou aplikací pro lasery byl laserový skener pro automatizované pokladny v supermarketech, který byl vyvinut v polovině 70. let a stal se

běžným o několik let později. Brzy následovaly přehrávače kompaktních disků a laserové tiskárny pro osobní počítače.

Lasery se staly standardními nástroji v různých aplikacích. Laserová ukazovátka zvýrazňují prezentační body v přednáškových sálech a laserové značkovače cílů navádějí chytré bomby k jejich cílům. Lasery svažují žiletky, píší vzory na předměty na výrobních linkách, aniž by se jich dotýkaly, odstraňují nežádoucí chloupky a odbarvují tetování. Laserové dálkoměry ve vesmírných sondách profilovaly povrchy Marsu a asteroidu Eros v nebývalých detailech. V laboratoři pomohly lasery fyzikům ochladit atomy na nepatrný zlomek stupně absolutní nuly [23].

2.3.3 Princip laseru

Laser je kvantový zdroj intenzivního svazku světelných paprsků v oblasti viditelného a neviditelného spektra elektromagnetického záření.

Důležitým prvkem při vzniku laseru je stimulovaná emise, která v laseru způsobuje interakci atomů s elektromagnetickým zářením (fotonem). Během stimulované emise je množství atomů vybudeno dodanou energií ze základního stavu do excitovaného stavu a následně do tzv. metastabilního stavu. Při následné vnější stimulaci přecházejí všechny atomy z metastabilního zpět do základního stavu. Toto je provázeno vyzářením množství energie ve formě fotonů o stejné vlnové délce a stejné fázi [20], [21], [22].

2.3.4 Využití laseru

Mimo to že laser našel své uplatnění v holografii tak za svých čtyřicet let od svého objevu našel uplatnění v mnoha oborech lidské činnosti. Jako v průmyslu, vědě, lékařství, kosmetice, ale i v umění a mnoha dalších odvětví. Například v průmyslu se laser uplatňuje k řezání a úpravě kovových materiálů. Také je možné pomocí laseru detekovat jednotlivé atomy a rozdělovat izotopy, tato schopnost se využívá při vytváření nových chemických reakcí v chemickém průmyslu. V lékařství se laser využívá pro složitější operace očí a mnoha dalším chirurgickým výkonům. A v elektrotechnice se laser používá pro výrobu termočlánků. Vznikli dokonce i nové obory, jako je laserová medicína a již už mnohokrát zmíněná holografie.

3 RŮZNÉ METODY ZÁZNAMU OBRAZU ZA VYUŽITÍ HOLOGRAFIE

V následujících kapitolách bude ukázán postup pro výrobu a rekonstrukci hologramů transmisí a reflexní metodou. Dále bude ukázán postu pro výrobu jednoduché difrakční (optické) mřížky, její testování a určení mřížkové konstanty. Poslední kapitola se bude věnovat popisu digitální holografické interferometrie, jako moderní experimentální metody pro měření deformace, ale i např. teplotních a koncentračních polí.

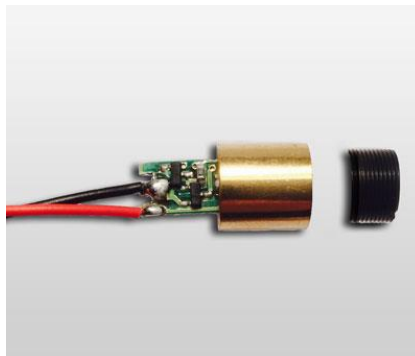
3.1 Metodika měření

Cílem práce je provést záznam hologramu pro jednoduchý objekt a jeho rekonstrukce. Záznam hologramu by měl probíhat v prostředí s omezeným vlivem vibrací, ideálně bez přítomnosti jiného záření. Pro realizaci takových experimentů by bylo nutné využít speciální laboratoř s dokonale izolovaným prostředím.

Pro účely našich experimentů jsme použili jednoduché, všeobecně dostupné vybavení. Dosažené výsledky tak ne vždy dosahují profesionální kvality, přesto ukazují možnosti a potenciál holografie.

3.2 Potřebné vybavení

3.2.1 Laserová dioda



Obrázek 18: Laserová dioda (autor, 2023)

Použitý diodový laser má vlnovou délku 650 nm o výkonu 3 až 4 mW. Napájený je dvojicí článků velikosti D. Laser se vyznačuje koherenční délkou kolem 1 m a stabilní frekvencí. Do těla laseru je rovněž integrovaný jednoduchý objektiv, který slouží k zaostření paprsku.

3.2.2 Desky s fotocitlivou vrstvou

Nejrozšířenějším médiem pro záznam klasické holografie je stříbrohalidová emulze (SHA), popřípadě dichromová želatina (DCG) nebo fotopolymery. V posledních letech se hlavně v průmyslových aplikacích uplatňuje záznam na digitální kameru.

Pro záznam hologramů jsme využili fotografický film citlivý na světlo o dané vlnové délce a fotografické desky opatřené fotocitlivou vrstvou. Pro zajištění stability při experimentech se jako vhodnější ukázalo použít fotografické desky.

Pro naše experimenty byly použity fotografické desky o velikosti 63mm × 63mm s maximální citlivostí 633 nm. Každá deska je vždy z jedné strany potažena emulzí. Právě na tuto stranu pokrytou emulzí je při zhotovení hologramu zaznamenáván samotný obrazec. Desky jsou velmi citlivé na světlo, proto je nutné je před ním také chránit. Při experimentech je možné používat tlumené zelené světlo.



Obrázek 19: Fotocitlivé desky (autor, 2023)

3.2.3 Chemikálie pro zpracování fotografických desek

Zpracování exponované desky probíhá standardním postupem. Jako vývojka je používána směs vodného roztoku močoviny, pyrokatecholu, kyseliny askorbové a siřičitanu sodného a vodného roztoku uhličitanu sodného. Jako bělidlo slouží vodný roztok dichromanu draselného a hydrogensíranu sodného. Pro oplach mezi jednotlivými lázněmi byla použita demineralizovaná voda o objemu 1 litr. Pro lepší oschnutí bylo použito smáčedlo. Poměry jednotlivých složek jsou uvedeny v tabulce níže.

Tabulka 1: Složení použitých směsí

Vývojka – část A	
<i>Chemikálie</i>	<i>Množství</i>
Močovina	75 g
Pyrokatechol (benzen-1,2-diol)	20 g
Kyselina askorbová	10 g
Siřičitan sodný	10 g
Demineralizovaná voda	1000 ml
Vývojka – část B	
<i>Chemikálie</i>	<i>Množství</i>

Uhličitan sodný	60 g
Demineralizovaná voda	1000 ml
Bělidlo	
<i>Chemikálie</i>	<i>Množství</i>
Hydrogensíran sodný	80 g
Dichroman draselný	5 g
Demineralizovaná voda	1000 ml



Obrázek 20: Pracoviště s chemikáliemi (autor, 2023)

3.2.4 Ostatní materiál

Jako další součásti experimentů byl použit držák laserové diody, kancelářské svorky jako držáky desek a objektů, různé podložky a podpůrné předměty.

Pro lepší orientaci při realizaci experimentů byla v laboratoři použita lampa přelepená několika vrstvami zelené fólie.

Důležitou součástí experimentu je clona, která umožní zaclonění laserového paprsku v době přípravy experimentu a zpracování fotografických desek tak, aby nedocházelo k následné nežádoucí expozici.

Zvolenými předměty pro tvorbu hologramu byly malé předměty denní potřeby. Zvolení vhodných objektů mělo v experimentu poměrně velkou roli. Bylo zapotřebí, aby předměty významně nepřesahovali rozměry holografické desky, neboť by pak nastala situace, že se nezaznamená většina objektu. Také při tvorbě prvního hologramu není vhodné volit objekty z měkkého či chlupatého materiálu. Nejvhodnější je zvolit předmět z pevného těžko deformovatelného materiálu.

Zaznamenávanými předměty tak byly:

- 4 různé mince, konkrétně 1,2,5 koruna a jedno euro. Vybrané mince byly za pomoci oboustranné lepící pásky umístěny na sklíčko, stejné velikosti jako holografická deska,
- 3 šachové figurky (černá, červená, dřevěná),
- kovový model autíčka.



Obrázek 21- použité předměty pro záznam hologramu

3.3 Uspořádání experimentů

Pro přípravu a realizaci experimentů byl použit izolovaný pracovní stůl z voštinové struktury s ocelovou pracovní deskou. Pro omezení světla, hluku a nežádoucích vibrací byly experimenty prováděny pozdě večer, mezi 21.00 a 3.00 hod. Okna byly zatemněny vnějšími roletami, zbývající světlo bylo odstíněno zástěnami na vnitřní straně. Pro pohodlný pohyb a manipulaci v tmavé místnosti byla použita obyčejná stolní lampička, na které byla připevněna zelená fólie. Díky tomu v místnosti nebyla úplná tma, ale zároveň světlo z lampičky nenarušovalo experiment. V běžných místnostech pro vyvolávání fotografií se používá červené světlo, avšak to v našem případě nebylo možné. Laser sám je červené světlo, a proto by bylo narušeno laserové světlo, které vytváří hologram.

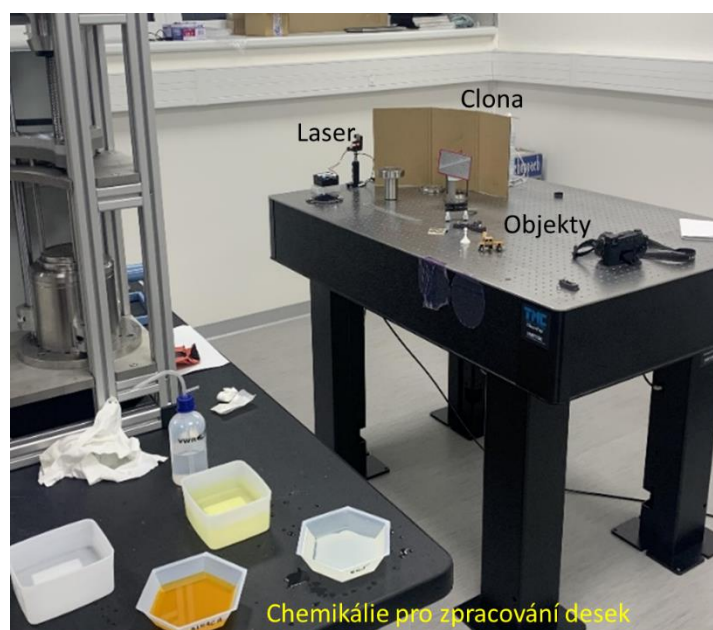
Potřebné chemikálie byly umístěny na vedlejší pracovní stůl. Byly využity tři misky obsahující chemické roztoky (vývojka, bělidlo, smáčedlo) a dvě misky naplněné demineralizovanou vodou. Misky s chemikáliemi byly označeny, a to zkratkami Dev (Developer), Bleach a Wet (Wetting Solution). Hladina se ve všech miskách vyskytovala v takové výšce, aby bylo možné zcela ponořit holografickou desku.

Vývojka v první misce zajišťovala potřebné chemické reakce k zviditelnění exponovaného obrazu. Tento roztok obsahoval smíchané chemikálie z části A a části B, a to v poměru 1:1.

Druhá miska, tzv. bělidlo, obsahovala 20 ml bělicího roztoku. Tento krok sloužil k zprůhlednění samotné holografické desky, aby na ní byl následně vidět vzniklý hologram.

V třetí misce byl tzv. Wetting Solution neboli smáčedlo. Tento roztok obsahoval v poměru 1:30 destilovanou vodu se smáčedlem. Tento krok byl poslední, ale neméně důležitý, neboť sloužil k tomu, aby se na holografické desce vytvořil jednotlivý vodní film a díky tomu se při usychání na hologramu netvořili kapky.

Ačkoliv nejsou použité chemikálie v používaných poměrech toxické, je potřeba použít ochranné pomůcky jako gumové rukavice, aby nedošlo ke kontaktu s kůží při manipulaci s chemikáliemi. Uspořádání experimentálního pracoviště ukazuje Obrázek 22.



Obrázek 22: Experimentální pracoviště (autor, 2023)

3.4 Uspořádání pro záznam hologramů

Jak už bylo zmíněno, holografie je metoda pro záznam 3D obrazu. Princip získání hologramu spočívá v zaznamenání amplitudy a fáze záření.

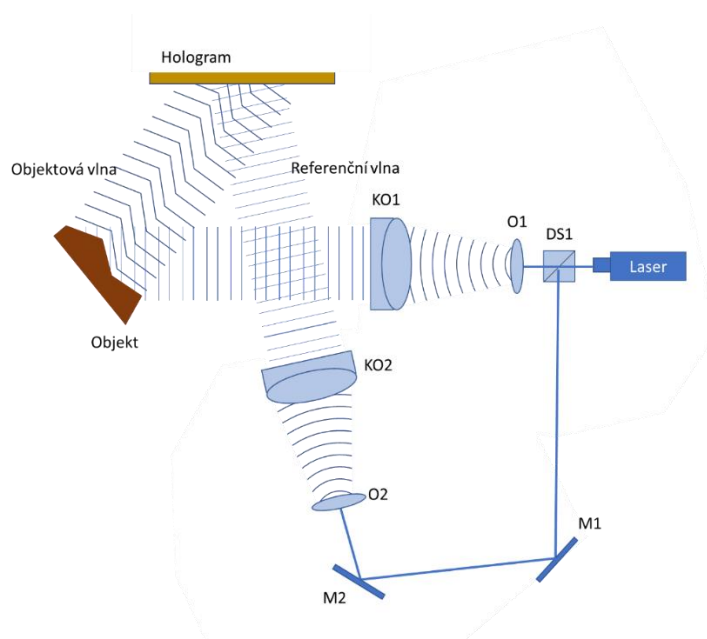
Pokud se světlo odrazí od určitého předmětu dojde k fázovému posunutí, které se projeví jako deformace vlny. Toto posunutí je možné zaznamenat jako změnu intenzity záření při interferenci původní a odražené vlny. Informace, které jednotlivé vlny obsahují, jsou následně zaznamenány na holografickou desku. Záznam se provede tehdy, když předmětový svazek, tedy svazek, který nese informace o zobrazovaném předmětu, interferuje s druhým, tzv. referenčním svazkem světelných paprsků. V tento okamžik dochází k zaznamenávání interference do emulze. Nejvíce osvětlená místa na holografické desce nazýváme interferenční maxima, naopak v místech, kde je osvětlení nejmenší, nazýváme interferenční minima. Tyto minima a maxima vznikají v místech, kde se světelné vlny setkávají s opačnou fází. Na holografické desce nám tak vznikají interferenční obrazce tzv. hologramy. Tento vzniklý hologram se skládá z nepravidelně rozmístěných interferenčních minim a maxim.

Je však nutné si uvědomit, že při přímém pohledu na hologram nevidíme žádnou souvislost se zaznamenaným objektem, proto je potřeba druhá část, ve které je nutno hologram vyvolat. Tato

fáze se nazývá tzv. rekonstrukce hologramu. Neboť teprve až obraz rekonstruujeme, jsme teprve schopni spatřit virtuální obraz.

3.4.1 Transmisní hologram

Klasickou sestavu pro záznam hologramu objektu ukazuje Obrázek 23. Laserový paprsek je v děliči svazku DS rozdělen na paprsek tvořící objektovou vlnu a na paprsek tvořící referenční vlnu. Každý z paprsků je upraven při průchodu rozšiřovačem svazku (O1 a O2) a kolimátorem² (KO1 a KO2).

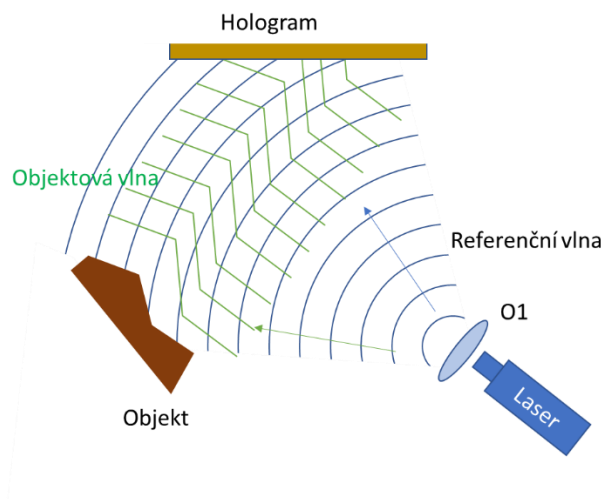


Obrázek 23: Schéma možného uspořádání pro záznam transmisního hologramu (autor, 2023)

Objektová vlna dopadá na objekt, od kterého se odráží směrem k záznamovému médiu (hologram). Na záznamovém médiu následně dochází k interferenci objektové a referenční vlny a ke vzniku a záznamu interferenčního obrazce, hologramu.

V našich experimentech jsme vzhledem k nedostatku kvalitních optických prvků zvolili zjednodušené uspořádání, které zobrazuje Obrázek 24. Oproti klasickému uspořádání zde nedochází k dělení paprsku na referenční a objektovou vlnu v děliči svazku, ale až přímo odrazem od zaznamenávaného objektu. Laserový paprsek tak musí být dostatečně široký, aby obsáhl celou scénu.

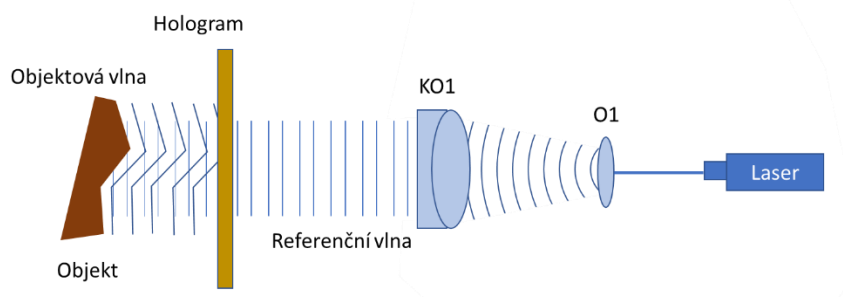
² V tomto případě je kolimátor využit pro vytvoření paralelních paprsků



Obrázek 24: Zjednodušené uspořádání pro transmisní holografii (autor, 2023)

3.4.2 Reflexní hologram

V případě reflexního hologramu prochází referenční vlna záznamovým médiem (deskou), následně se odráží od sledovaného objektu a jako objektová vlna se vrací zpět k desce. Na zadní straně desky, tj. blíže k objektu, dochází k interferenci referenční a objektové vlny. Schéma uspořádání je znázorněno na Obrázku 25.

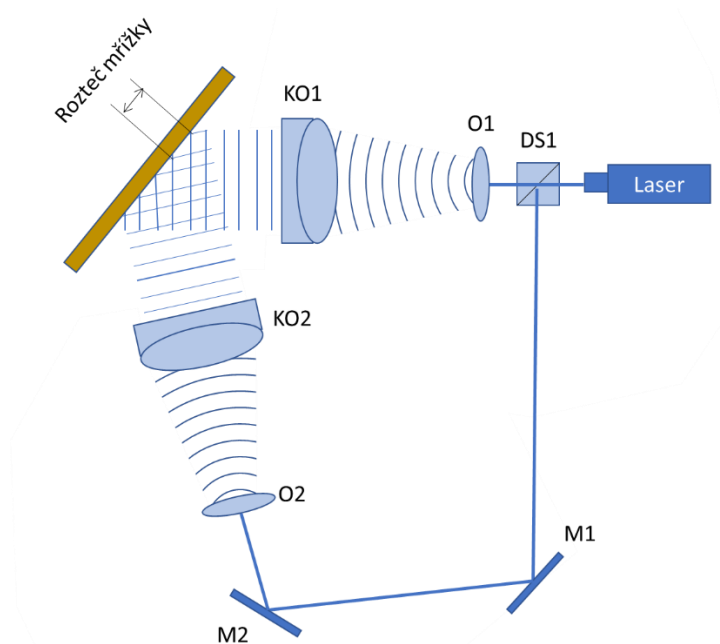


Obrázek 25: Schéma uspořádání pro záznam reflexního hologramu (autor, 2023)

3.4.3 Difrakční mřížka

Pro přípravu difrakční mřížky je důležité pečlivé uspořádání experimentů a kvalitní optické prvky, v našem případě zrcátka. I drobné, na první pohled nerozpoznatelné, nedostatky v kvalitě odrazivé plochy vedou k významným chybám v generované mřížce. Mřížková konstanta, tj. množství čar na milimetr mřížky, je dána vlnovou délkou použitého světla a geometrickým uspořádáním optických členů. Uspořádání pro generování optického prvku s holografickou difrakční mřížkou je znázorněn na Obrázek 26.

Uspořádání je podobné pro záznam transmisního hologramu s tím rozdílem, že v cestě žádného z paprsků není objekt. Dochází tak k záznamu dokonalé interference. Důležité je rovněž, aby energie obou paprsků byla shodná.



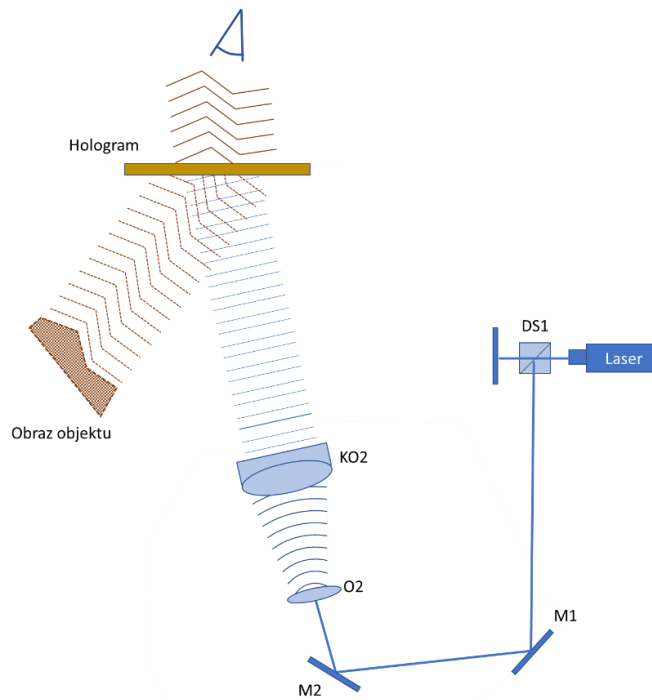
Obrázek 26: Schéma uspořádání pro tvorbu difrakční mřížky (autor, 2023)

3.5 Uspořádání pro rekonstrukci hologramu

3.5.1 Transmisní hologram

Při rekonstrukci hologramu dojde k zobrazení obrazu původního objektu. Při rekonstrukci je využívána pouze referenční vlna, která dopadá na hologram. Průchodem referenční vlny hologramem dojde k její interakci s vytvořenou interferenční strukturou. Výsledkem je pak virtuální obraz objektu, který se jeví na stejném místě a ve stejné pozici, ve které byl původní objekt. Objekt je pozorován v prostoru za objektem a k zobrazení slouží vlna, která prochází přes hologram. Proto označení „transmisní“.

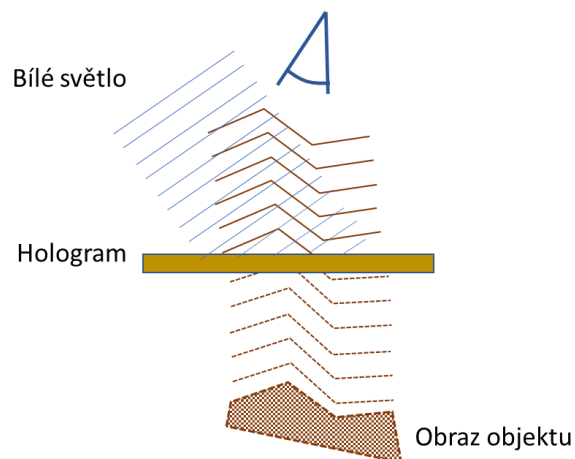
V případě transmisního hologramu je nezbytné, aby byla vlnová délka světla, které je použité pro rekonstrukci stejná, jako vlnová délka původního referenčního paprsku. Není tak možné využít jiné vlnové délky, popřípadě bílého světla.



Obrázek 27: Schéma uspořádání pro rekonstrukci transmisního hologramu (autor, 2023)

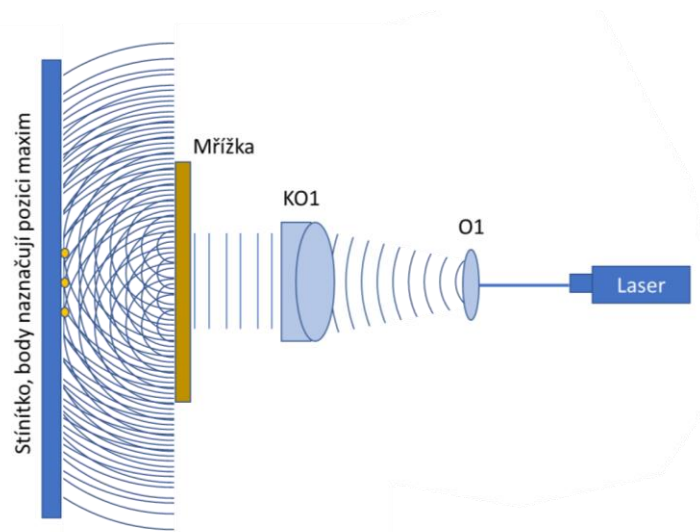
3.5.2 Reflexní hologram

Uspořádání pro zobrazení reflexního hologramu, jak ukazuje Obrázek 28. V případě reflexního hologramu je objekt znázorněn ve světle, které je odražené od hologramu. Proto označení „reflexní“. Tento přístup umožňuje použití bílého světla a hologram je tak možné pozorovat za denního světla nebo s většinou klasických zdrojů světla.



Obrázek 28: Schéma uspořádání pro rekonstrukci reflexního hologramu (autor, 2023)

3.5.3 Holografické difrakční mřížky



Obrázek 29: Aplikace difrakční mřížky (autor, 2023)

Průchodem laserového svazku difrakční mřížkou se každá mezera v mřížce stává zářičem. V procházejícím záření za mřížkou (vzhledem k pozici laseru), ale i v odraženém záření před mřížkou tak dochází k interferenci množství paprsků a k vytvoření standardní interferenční struktury. K ozáření se dá použít světlo jakékoliv vlnové délky, popřípadě bílé světlo. Při použití bílého světla dojde při rozptylu na mřížce k rozkladu na jednotlivé barvy.

Z pozice interferenčních maxim a ze znalosti vlnové délky a vzdálenosti stínítka od mřížky je možné určit tzv. mřížkovou konstantu, tj počet čar na mm mřížky.

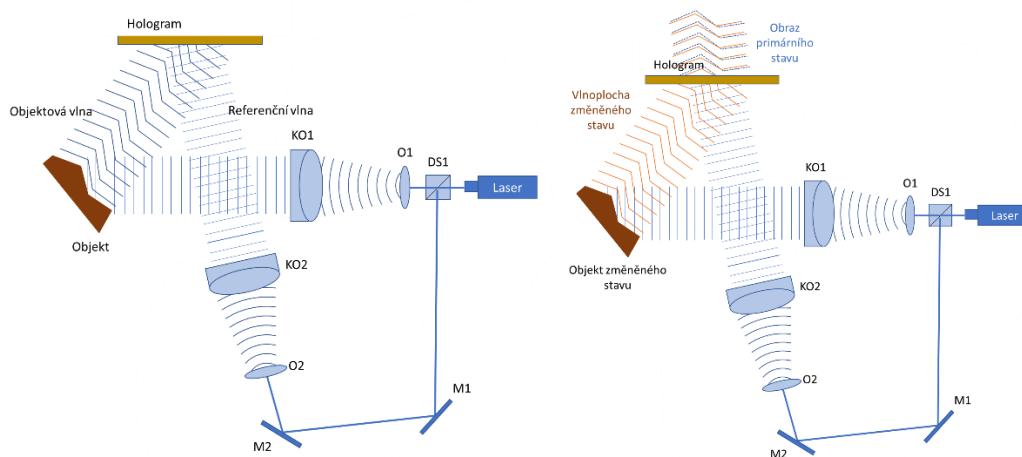
3.6 Holografická interferometrie

O holografické interferometrii mluvíme tehdy, kdy dochází k interferenci obrazu původního a modifikovaného objektu. Modifikovaný může být buď tvar objektu nebo, v případě transparentních objektů, jeho optické vlastnosti.

Holografickou interferometrii je tak možné využít jak pro přesné měření malých deformací, tak pro měření teploty, tlaku, napětí atp. Jedná se o relativní měřicí metodu, kdy je výsledkem měření rozdíl dvou stavů, tj. deformace tělesa, změna teploty atp.

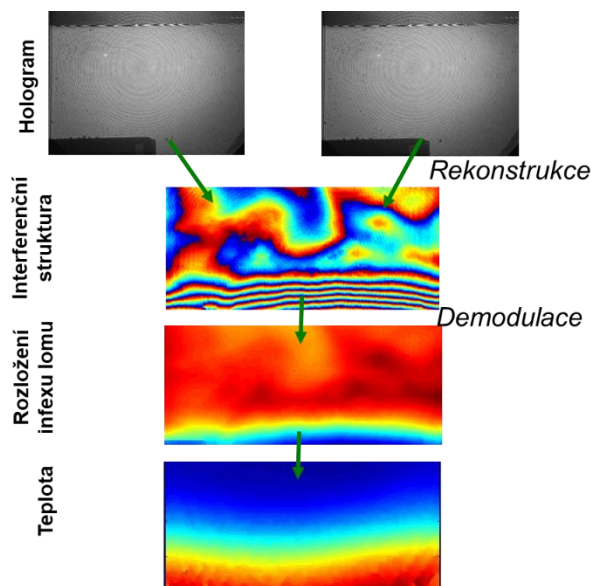
Základní uspořádání pro holografickou interferometrii je znázorněno na Obrázku 30.

V první fázi experimentu dochází k záznamu počátečního stavu. Zde opět dochází k interferenci referenční a objektové vlny a k vytvoření hologramu počátečního stavu scény.



Obrázek 30: Uspořádání pro záznam obrazu při holografické interferometrii (autor, 2023)

V následujícím kroku je celý postup zopakován pro změněný stav objektu. V případě, že scénu pozorujeme přes původní hologram, získáme virtuální obraz, který odpovídá změně stavu objektu.



Obrázek 31: Postup zpracování dat z digitální holografické interferometrie

V současné době jsou rozšířené postupy digitální holografické interferometrie, kdy je hologram původního a změněného stavu zaznamenáván zvlášť a vyhodnocení je následně provedeno analyticky. Vývoj algoritmů pro zpracování dat pro digitální holografickou interferometrii přesahuje rozsah této práce. Proto budou popsány jen základní kroky a možnosti metody.

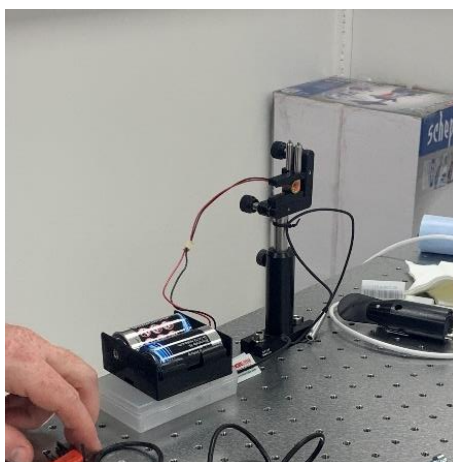
Příklad postupu vyhodnocení je na Obrázku 31. V prvním kroku dojde k záznamu hologramu původního a změněného stavu. Změněný stav může představovat deformaci o desítky nm nebo změnu teploty vzduchu o desetiny K. Uspořádání experimentu je obdobné jako v případě záznamu transmisního hologramu na Obrázek 23.

Následně jsou oba snímky zpracovány a navzájem porovnány. Z porovnání snímků vznikne interferenční struktura, která zaznamenává změnu fáze v jednotlivých místech scény. Následuje krok tzv. demodulace, kdy jsou fázové posuvy sečteny tak, aby obsahovaly více vln. Posledním krokem je přiřazení náležité fyzikální informace, jako je posunutí nebo změna indexu lomu, získaným datům. Výsledkem je tak např. rozložení teploty v okolí daného předmětu.

3.7 Průběh experimentů

Všechny prováděné experimenty probíhaly v následujících krocích:

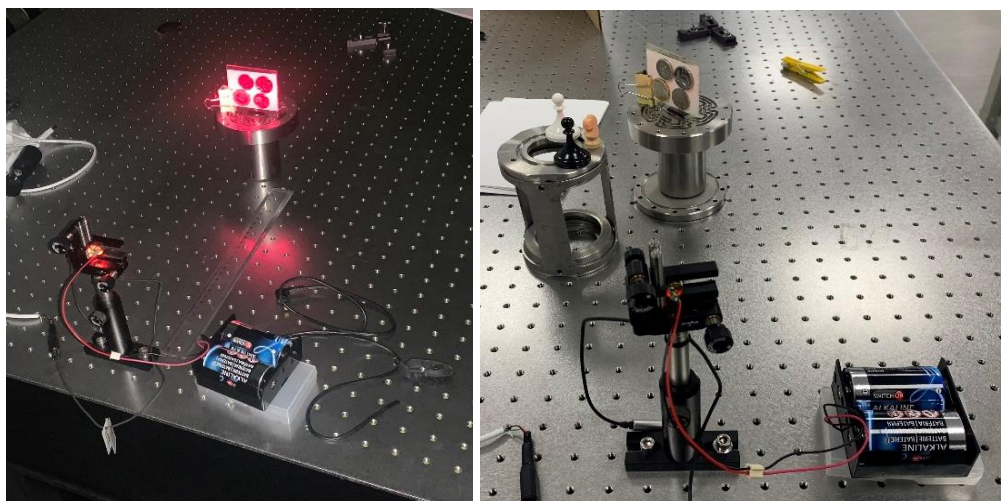
1. Příprava chemikálií. Byly připraveny roztoky pro zpracování exponovaných desek.



Obrázek 32: Laser napojený na zdroj (autor, 2023)

2. Příprava experimentálního uspořádání. Podle typu experimentu byla sestavena scéna pro záznam transmisního nebo reflexního hologramu, popř. pro přípravu difrakční mřížky. Jednotlivé komponenty byly umístěny tak, aby byly ve stejné výšce a aby vzdálenost mezi laserem a deskou byla přibližně 300 mm.
3. Zapnutí laseru. Byla zapnuta laserová dioda v dostatečném předstihu před vlastním experimentem tak, aby došlo ke stabilizaci laseru. Do provedení experimentu byl paprsek zakrytý clonou. Laserový paprsek byl po zapnutí upraven tak, aby předmětová oblast byla plně osvětlena. Při této úpravě se v místnosti muselo ztlumit světlo, aby bylo zřetelně viditelné, do jakých míst laserový paprsek dopadá plnou silou.
4. Příprava desek. Před expozicí byla vyndaná fotocitlivá deska a umístěna do náležité polohy. Bylo nutné dbát na polohu fotocitlivé vrstvy. Při manipulaci s holografickými deskami byla nutná opatrnost a přesnost. Holografické desky jsou velice citlivé na bílé světlo. Při kontaktu s ním je deska zničena a už není možné na ni zaznamenat žádný hologram. Proto vždy krabíčka s deskou byla otevírána na jednom místě, ale samotné otevření a manipulace s ní byla nutná až ve tmě. A proto tato část byla poměrně komplikovaná. Bylo zapotřebí v úplně tmě otevřít krabíčku s deskami. V krabíčce se

nacházeli tři balíčky po dvou holografických deskách. Po získání jedné desky a následném ujištění se že zbývající neexponované desky jsou bezpečně umístěny zpět v krabici, nastala důležitá část. Bylo nutno identifikovat, za tmy, na jaké straně desky se nachází holografická emulze. Strana s emulzí je rozpoznatelná podle hmatu, neboť při dotčení s navlhčenými prsty je lehce lepivá a hrubá.



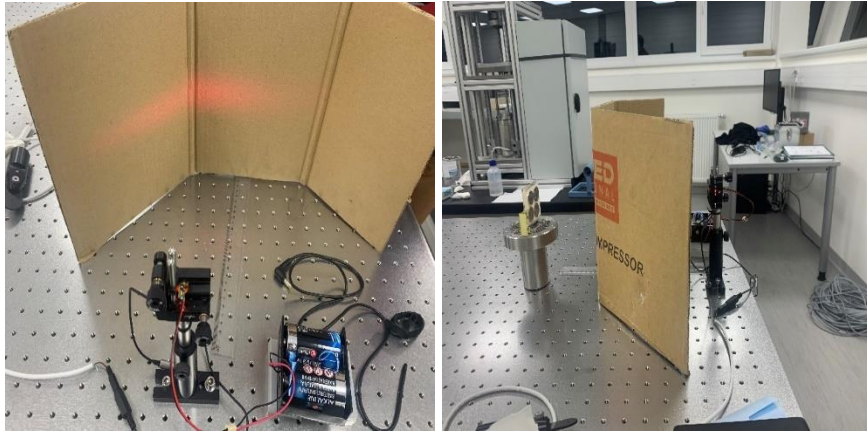
Obrázek 33: Scéna experimentu (autor, 2023)

5. Expozice. Expozice probíhala v úplné tmě nebo s tlumeným zeleným světlem. V momentu, kdy byli všechny předměty (laser, holografický objekt, holografická deska) umístěné na svém místě mohla začít samotná část záznamu hologramu. Vlastní experiment začínal vždy po prodlevě cca 30 sekund, aby se utlumily vibrace v místnosti.

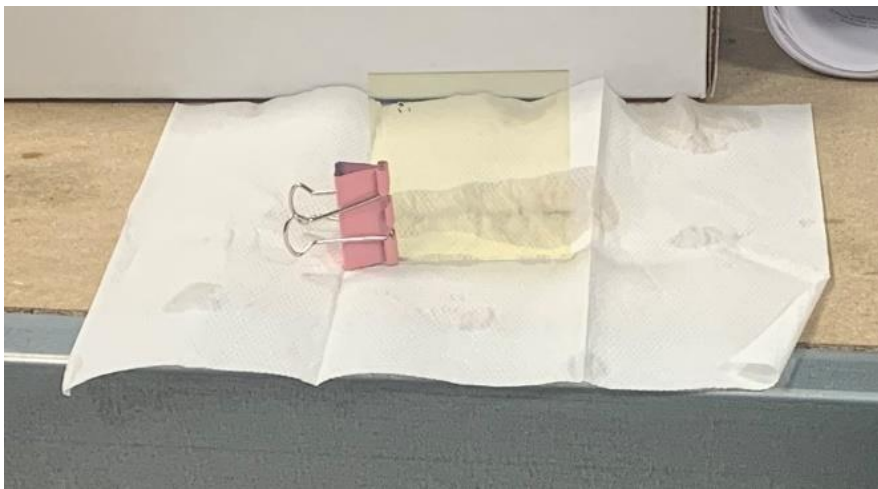
Nejprve byla na 10 sekund lehce nadzvednuta clona, tak aby světlo laseru stále nedopadalo na holografickou desku. Tento krok sloužil k usazení nepatrných pohybů a vibrací u laserové diody a holografické desky. Zároveň v místnosti muselo být absolutní ticho a vyskytovat se co nejmenší množství pohybu.

Samotná expoziční probíhala pro dobu 10–15 sekund s plně odkrytou clonou. Ukončení expoziční bylo provedeno vložením clony do laserového paprsku.

6. Po expoziční byla deska zpracována postupně ve vývojce 180 s, oplachové demi vodě 120 s, bělidle 180 s, oplachové demi vodě 120 s a v roztoku se smáčedlem 120 s.
7. Po chemickém zpracování byl hologram umístěn na oschnutí do vertikální polohy. Dokonalé oschnutí trvalo 1 až 2 hodiny.
8. Následovalo zobrazení hologramu podle postupů v kapitole 3.4. a jejich fotografování.



Obrázek 34: Scéna experimentu (autor, 2023)



Obrázek 35:-Proces sušení experimentu (autor, 2023)

3.8 Výsledky

3.8.1 Transmisní hologram

Obrázek 36 ukazuje laserem nasvícené scény při záznamu. Výsledný hologram předmětu „auto“ a předmětu „šachové figurky“ ukazují Obrázek 37 a Obrázek 38. Při pozorování v různých úhlech bylo patrné, že je zaznamenán celý prostor laboratoře, který byl v dosahu laserového světla, nejenom vlastní scéna.

Při rozporu scény „šachové figurky“ je evidentní vliv odrazivosti povrchu na výsledky.

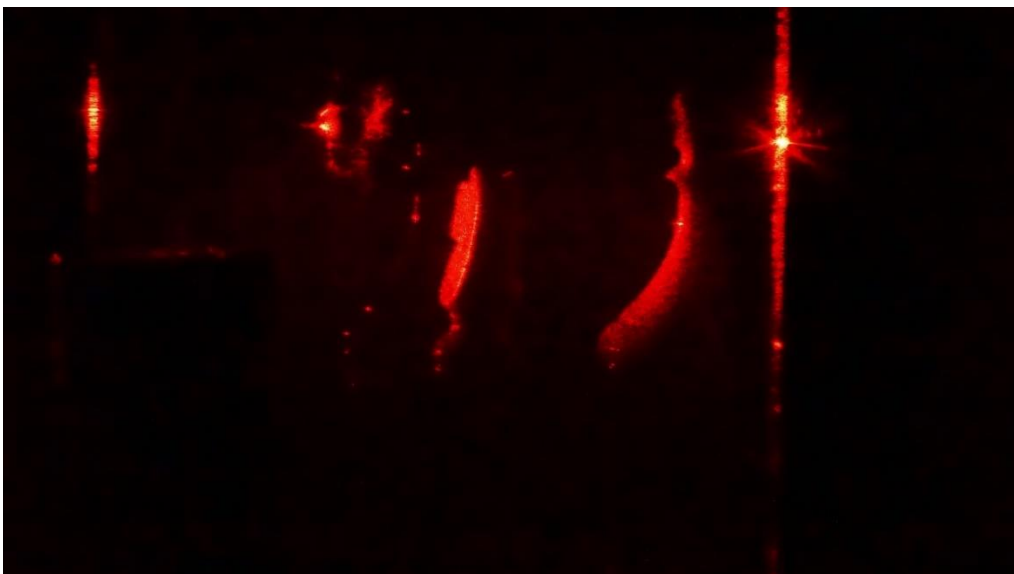
Prezentované výsledky jsou ovlivněny kvalitou fotografie. Obraz při přímém pozorování hologramu je jasný a ostrý.



Obrázek 36: Záznam transmisního hologramu. Vlevo auto, vpravo skupina figurek. Deska s mincemi slouží k nastavení geometrie (autor, 2023)



Obrázek 37: Rekonstruovaný transmisní hologram scény s modelem auta (autor, 2023)



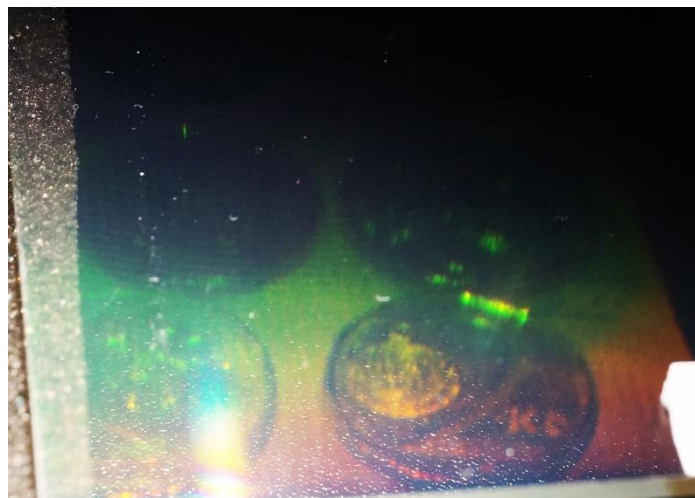
Obrázek 38: Rekonstruovaný transmisní hologram scény s šachovými figurkami (autor, 2023)

3.8.2 Reflexní hologram

Reflexní hologramy byly zaznamenány podle postupu z kapitoly 3.4.2. a zobrazeny pod lampou s LED zdrojem bílého světla o teplotě 6000 K. Výsledky experimentů jsou ukázány na Obrázek 39 a Obrázek 40. I při těchto experimentech byly pozorovány zřetelné hologramy. Následný záznam na fotoaparát je obtížný.



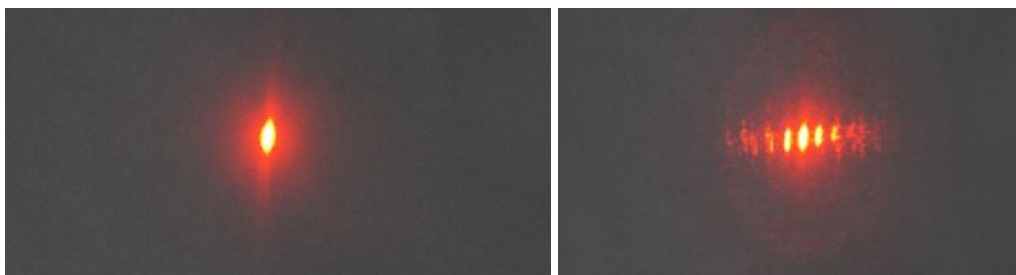
Obrázek 39: Rekonstruovaný reflexní hologram scény s modelem auta (autor, 2023)



Obrázek 40: Rekonstruovaný reflexní hologram scény s mincemi (autor, 2023)

3.8.3 Holografická difrakční mřížka

Výše uvedeným postupem byla rovněž zaznamenána difrakční mřížka. Výsledky na Obrázek 41 ukazují laserový paprsek bez difrakční mřížky a laserový paprsek po průchodu difrakční mřížkou.

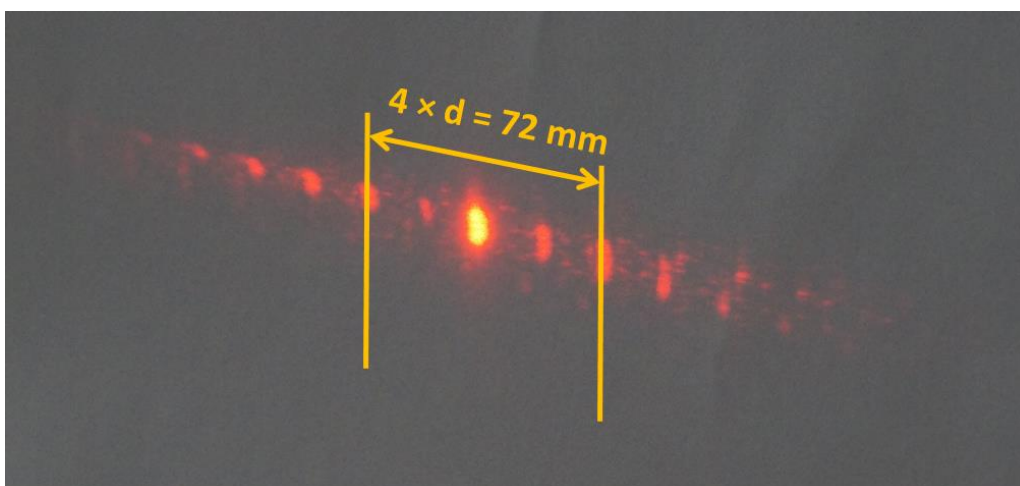


Obrázek 41: Rozptyl světla na difrakční mřížce. Vlevo paprsek bez mřížky, vpravo paprsek s vloženou mřížkou (autor, 2023)

Podle vztahu:

$$\sin \varphi_k = \frac{k\lambda}{a},$$

kde $\varphi_k = 0,018$ rad je úhel prvního interferenčního maxima, k je číslo interferenčního maxima a $\lambda = 650$ nm je vlnová délka použitého světla. Můžeme určit mřížkovou konstantu $a = 0,035$ a z toho počet hustotu vrypů námi generované mřížky $\frac{1}{a} = 28$.



Obrázek 42: Zaznamenaná holografická mřížka – stínítko ve vzdálenosti 1000 mm od mřížky (autor, 2023)

DISKUSE VÝSLEDKŮ

Praktickým výsledkem projektu jsou tři různé typy hologramů, které se liší jak principem záznamu a rekonstrukce, tak způsobem použití. Tímto se podařilo naplnit cíle projektu.

Zásadním výsledkem projektu nejsou získané hologramy, ale prezentace postupů, jakými je možné za použití všeobecně dostupných a finančně nenáročných prostředků realizovat experimenty, které názorně prezentují vlastnosti světla a jednu z metod pro využití vlastností světla v různých oborech.

I námi použitou zjednodušenou metodou se podařilo zaznamenat hologram v dostatečné kvalitě. Obraz je ostrý a má náležitou hloubku. Při zkoumání hologramu z různých směrů je vidět záznam celého, laserem osvětleného, prostoru laboratoře. Je možné předpokládat, že při použití děliče svazku a dostatečně kvalitních optických komponent, bude možné významně zvýšit i kvalitu hologramu. V tomto uspořádání je ale metoda zcela dostačující pro studijní účely. V dalším kroku je možné takový postup využít například pro měření malých deformací holografickou interferometrií.

Při přípravných experimentech byl sledován vliv vzdálenosti předmětu a desky od laseru a vliv doby expozice. Z výsledků bylo patrné, že prodloužení doby záznamu, podle očekávání, nemá významný vliv na kvalitu hologramu. Nepříznivě se ale projevují vibrace přenášené, patrně vzduchem, z okolí. Vzdálenost desky od hologramu má naopak významný vliv a nárůst vzdálenosti je nutné kompenzovat delší dobou expozice.

Při experimentech byl rovněž pozorován významný vliv vlastností povrchu sledovaných objektů na dosažené výsledky. Povrchu sledovaných předmětů je nutné přizpůsobit úhel, popřípadě intenzitu objektivé vlny.

Při provedených experimentech metodou reflexní holografie se podařilo zaznamenat několik kvalitních hologramů různých předmětů. Tyto předměty byly následně rekonstruovány bílým světlem. Tento typ hologramů je velmi dobře použitelný pro ochranné prvky, popřípadě jako atraktivní umělecká díla.

Transmisní hologramy naproti tomu slouží jako výchozí bod pro holografickou interferometrii, dnes spíše digitální holografickou interferometrii. Na této metodě jsou založeny technologie spojené s měřením tvaru, měřením polohy, měřením malých deformací a systémy pro přesnou montáž. Významným se může ukázat využití holografické interferometrie pro měření teplotních a koncentračních polí. Při využití tomografických metod může být takové měření trojrozměrné.

Tak jako v předchozím případě platí, že lepších výsledků by bylo možné dosáhnout použitím kvalitnějšího vybavení. V případě reflexní holografie je problematická zejména nerovnoměrná intenzita laserového paprsku po ploše objektů, která ve výsledku vede k nemožnosti zobrazení celého obrazu najednou.

Zdá se, že hologramy objektů, které nebyly fixovány k desce stolu, ale které byly umístěny na držácích z kancelářských sponek, nejsou dostatečně ostré. Dá se předpokládat, že toto bylo způsobeno drobnými vibracemi během experimentů. Vyšší kvality a větší ostroty obrazu by bylo možné dosáhnout při horizontálním uspořádání experimentů, kdy by byly objekty lépe fixovány.

V neposlední řadě se nám podařilo využít metod holografické interferometrie pro přípravu difrakční mřížky. Vzhledem k použitým komponentům, hlavně jednoduchému kosmetickému zrcátku, nebylo možné realizovat kvalitní mřížku s nižší mřížkovou konstantou.

Předpokládáme, že při použití lépe vyleštěného zrcátka bude možné tímto postupem vyrobit kvalitní mřížku o daleko vyšších parametrech.

Při všech provedených experimentech se podařilo dosáhnout uspokojivých výsledků. Lze předpokládat, že s využitím kvalitnějších optických komponent bude možné dosáhnout významně kvalitnějších výsledků. Velkým nedostatkem použité metody je nutnost zpracovávat hologramy tzv. mokrou cestou za použití řady chemikálií. Řešením je použití fotocitlivých polymerů, popřípadě záznamu na digitální médium.

Použití fotocitlivých polymerů, kde je interferenční obraz zaznamenávaný do trojrozměrné vrstvy materiálu, který je zároveň světlem stabilizován, je omezeno dostupností těchto materiálů na evropském trhu. Dovoz těchto materiálů je samozřejmě možný. Bohužel se jedná o bílý prášek, který bývá většinou znehodnocen při přepravních kontrolách.

Použití digitálního záznamu je v současné době jedinou perspektivní metodou. K aplikaci metody je ale nutné získat dostatečné znalosti spojené se zpracováním digitálního obrazu.

ZÁVĚR

Předložená práce se věnuje problematice holografie, hlavně záznamu a rekonstrukci hologramů objektů. V úvodu byly stanoveny následující cíle:

- provést rešerši možností současného využití holografické interferometrie,
- popsat základní fyzikální princip metody,
- navrhnout a provést experimenty využívající holografickou interferometrii k vytvoření trojrozměrného obrazu,
- navrhnout a provést experiment k vytvoření holografické mřížky.

Všech stanovených cílů se podařilo v práci dosáhnout. V úvodu práce byla představena základní charakteristika holografie a hologramů. Bylo popsáno a doloženo využití hologramů v různých oborech.

V další kapitole byly popsány základní fyzikální principy, které jsou využívány při tvorbě a rekonstrukci hologramů. Byl popsán princip laseru, vysvětleny parametry vlnového charakteru světla a popsán základní princip interferometrie.

Podstatou práce je příprava, záznam a rekonstrukce hologramů různými metodami. V práci je popsáno základní uspořádání pro záznam transmisního a reflexního hologramu. V práci je rovněž popsán proces pro zpracování exponovaného fotocitlivého materiálu mokrou cestou.

Výsledky experimentů jsou prezentovány ve formě fotografií zaznamenaných hologramů a ve formě laserového paprsku rozptýleného na difrakční mřížce. Jednoduchým experimentem je stanovena mřížková konstanta vyrobené mřížky.

Pro realizaci práce bylo nutné osvojit si celou řadu znalostí a dovedností, které jsou pro studenta druhého ročníku nové. Tyto znalosti a dovednosti následně umožnili realizaci náročných experimentů a přípravu hologramů, které jsou nejen zajímavé s ohledem na fyzikální principy, ale také poutavé na pohled.

Práce v oblasti holografie, a hlavně holografické interferometrie by měla dále pokračovat. Pro další činnosti bude nutné osvojení principů digitální holografické interferometrie a hlubší porozumění fyzikálním principům spojeným s prostorovým vlněním. Následně pak bude možné dosáhnout významných výsledků v oblastech spojených s měřením, bezpečnostními prvky nebo v oblasti umění.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. *The history of holography: multiple visions* [online]. 2006 [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/235222634_the_history_of_holography_multiple_visions
2. Holography vs hologram – what’s the difference? *Wikidiff* [online]. [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: <https://wikidiff.com/holography/hologram>
3. Co to je hologram? *Tarafuki* [online]. [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: <https://www.tarafuki.cz/co-to-je-hologram/>
4. *Holografie* [online]. [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/th/vwu83/holografie.pdf>
5. *Holocenter: center for the holographic arts* [online]. [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: <https://holocenter.org/what-is-holography/holographic-art>
6. Blanche, P.-A.; Bablumian, A.; Voorakaranam, R.; Christenson, C.; Lin, W.; Gu, T.; Flores, D.; Wang, P.; et al. (2010). "Holographic three-dimensional telepresence using large-area photorefractive polymer". *Nature*. **468** (7320): 80–83. Bibcode:2010Natur.468...80b. DOI:10.1038/nature09521. Pmid 21048763. S2cid 205222841.
7. "Mit unveils holographic tv system". Retrieved 14 september 2011.
8. Jindra, P. *Holografický interferometr mach – Zehnderova typu* [online]. [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/9w30tr/401549>. Bakalářská práce. Pedagogická fakulta – katedra fyziky. Vedoucí práce RNDr. Pavel Kříž, Ph.D.
9. Francúz, V. *Digitální holografická mikroskopie pro měření topografie reflexních vzorků* [online]. [cit. 2023-01-22]. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing. Ondřej Matoušek.
10. Vojáček, A. Zajímavost – holografický prach a výroba moderních hologramů. <https://automatizace.hw.cz/> [online]. 2007, 27. květen 2007 [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2007052701>
11. Optické měřicí metody a metrologie. *Toptec* [online]. [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: <http://www.toptec.eu/cs/specializace/opticke-merici-metody-a-metrologie/>
12. Hampl, P. Není hologram jako hologram. *Sciencemag.cz* [online]. 2017, 12. 2. 2017 [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: <https://sciencemag.cz/neni-hologram-jako-hologram/>
13. Oščiatka, P. *Záznam difraktivních struktur rekonstruovatelných v bílém světle* [online]. Liberec, 2012 [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/12081/bc_23232.pdf?sequence=1. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing. Pavel Psota.
14. *Khan Academy* [online]. [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: <https://cs.khanacademy.org/science/fyzika-vlneni-a-zvuk/x34b3f391df7f0014:mechanicke-vlneni/x34b3f391df7f0014:zakladni-pojmy-vlneni/a/wave-characteristics-review-ap-p>
15. Králová, M. *Holografie* [online]. Plzeň, 2007 [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/svetlo/holografie>
16. Králová, M. Odraz a lom světla. *Eduportál* [online]. 2007 [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/svetlo/odraz-lom-svetla>
17. Interference of waves. *The physics classroom* [online]. [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: <https://www.physicsclassroom.com/class/waves/lesson-3/interference-of-waves>

18. *Interference vlnění* [online]. [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1662>
19. *Interference světla, koherentní zářen* [online]. [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: <http://www.realisticky.cz/ucebnice/02%20fyzika%20s%c5%a0/05%20optika/03%20vlnov%c3%a9%20vlastnosti%20sv%c4%9btla/02%20interference%20sv%c4%9btla,%20koherentn%c3%ad%20z%c3%a1%c5%99en%c3%ad.pdf>
20. *Princip laseru: jak funguje laser* [online]. [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k22.htm>
21. Světlo, laserové záření. *Therapy systems* [online]. [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: <http://www.therapy.cz/laserove-zareni.php>
22. *Lasers* [online]. [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: <https://www.rp-photonics.com/lasers.html>
23. Early history. *Laserfest* [online]. [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: <https://laserfest.org/lasers/history/early.cfm>
24. *Integraf* [online]. [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: <https://www.integraf.com/shop/jd-hologram-developer-kit>
25. Baker, M. *Msds: material safety data sheet* [online]. Philipsburg, 2002, 2002, 45 [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: [ntegraf.com/resources/downloads/msds-jd-2.pdfs](https://www.integraf.com/resources/downloads/msds-jd-2.pdf)
26. [online]. Encyklopedie fyziky, 2006–2023 [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/>
27. Rendl, K. *Vizualizace principu hologramu*. Plzeň, 2012. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v plzni. Vedoucí práce Ing. Petr Lobaz.
28. Hologramy: aplikace laserů. *Cez.cz* [online]. [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k33.htm>
29. *Lasers and holography: an introduction to coherent optics* w. E. Kock, dover publications (1981), ISBN 978-0-486-24041-1
30. *Saxby, graham (2003). Practical holography, third edition. Taylor and Francis. ISBN 978-0-7503-0912-7.*
31. *Margaret Benyon hologram Artist* [online]. Global images hologram art collection, 2014 [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: <https://www.globalimages-hologramartcollection.com/margaret-benyon>
32. Upatniek, J; Leonard, C (1969). "diffraction efficiency of bleached photographically recorded interference patterns". *Applied Optics*. **8** (1): 85–89. Bibcode:1969apopt...8...85u. Doi:10.1364/ao.8.000085. Pmid 20072177.
33. Hunzik, P. *Dynamic holographi imaging of the beating human heart* [online]. 1999, Feb 1999 [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/comparison-between-conventional-holograms-of-static-3d-objects-and-dynamic-holograms-in_fig1_13337946
34. Nováková, P. *Digitální holografie a její aplikace v prostředí Matlab* [online]. 2011 [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: https://theses.cz/id/cgrr10/diplomov_prce_final1.pdf. Diplomová práce. Univerzita Palackého v Olomouci. Vedoucí práce Mgr. Dušan Mandát.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Camera obscura v Greenwich	10
Obrázek 2: Denis Gabor 1900–1979.....	11
Obrázek 3: 1964 jeden z prvních holografických obrazů Emmeretta Leithe.....	11
Obrázek 4: Tigirl by Margaret Benyon. Reflection hologram. 1985	13
Obrázek 5:-Umělecké znázornění možností dynamické holografie, Star Wars: Episode III – Revenge of the Sith (2005)	14
Obrázek 6: Obraz živých myších kortikálních neuronů, Digital holographic microscopy to identify cellular biomarkers of psychiatric disorders, 01 December 2016 Pierre Marquet, Pascal Jourdain and Pierre Magistretti	15
Obrázek 7: Holografická ochrana €100 bankovky	15
Obrázek 8:Projekce 3D žáby (autor, 2023).....	16
Obrázek 9: Elektromagnetické spektrum. (Obrázek z UC Davis ChemWiki, CC-BY-NC-SA 3.0)18	
Obrázek 10: Vlastnosti světla, vlnová délka λ , amplituda U a fáze φ . (autor, 2023).....	19
Obrázek 11:-Zzákon odrazu světla (autor, 2023).....	19
Obrázek 12:-Lom světla (autor, 2023).....	20
Obrázek 13: Interference vlnění z dvou zdrojů (autor, 2023).....	21
Obrázek 14: Příklad interference dvou vlnění, kdy dochází k maximálnímu zesílení. Vlnění jsou ve fázi (autor, 2023)	22
Obrázek 15: Příklad interference dvou vlnění, kdy dochází k vyrušení vlnění. Vlnění jsou s opačnou fází (autor, 2023)	22
Obrázek 16: Příklad obecné interference dvou vln. Amplituda výsledné vlny je závislá na fázovém posunutí (autor, 2023).	22
Obrázek 17: Světelné vlny vzniklé bílým světlem a laser (autor, 2023)	23
Obrázek 18: Laserová dioda (autor, 2023).....	26
Obrázek 19: Fotocitlivé desky (autor, 2023).....	27
Obrázek 20: Pracoviště s chemikáliemi (autor, 2023).....	28
Obrázek 21- použité předměty pro záznam hologramu	29
Obrázek 22: Experimentální pracoviště (autor, 2023).....	30
Obrázek 23: Schéma možného uspořádání pro záznam transmisního hologramu (autor, 2023)31	
Obrázek 24: Zjednodušené uspořádání pro transmisní holografii (autor, 2023).....	32
Obrázek 25: Schéma uspořádání pro záznam reflexního hologramu (autor, 2023)	32
Obrázek 26: Schéma uspořádání pro tvorbu difrakční mřížky (autor, 2023)	33
Obrázek 27: Schema uspořádání pro rekonstrukci transmisního hologramu (autor, 2023)	34
Obrázek 28: Schéma uspořádání pro rekonstrukci reflexního hologramu	34
Obrázek 29: Aplikace difrakční mřížky (autor, 2023)	35
Obrázek 30: Uspořádání pro záznam obrazu při holografické interferometrii.....	36
Obrázek 31: Postup zpracování dat z digitální holografické interferometrie	36
Obrázek 32: Laser napojený na zdroj (autor, 2023).....	37
Obrázek 33: Scéna experimentu (autor, 2023)	38
Obrázek 34: Scéna experimentu (autor, 2023)	39
Obrázek 35:-Proces sušení experimentu (autor, 2023)	39
Obrázek 36: Záznam transmisního hologramu. Vlevo auto, vpravo skupina figurek. Deska s mincemi slouží k nastavení geometrie (autor, 2023).....	40
Obrázek 37: Rekonstruovaný transmisní hologram scény s modelem auta.....	40
Obrázek 38: Rekonstruovaný transmisní hologram scény s šachovými figurkami	40
Obrázek 39: Rekonstruovaný reflexní hologram scény s modelem auta (autor, 2023).....	41
Obrázek 40: Rekonstruovaný reflexní hologram scény s mincemi (autor, 2023)	41

Obrázek 41: Rozptyl světla na difrakční mřížce. Vlevo paprsek bez mřížky, vpravo paprsek s vloženou mřížkou (autor, 2023)	42
Obrázek 42: Zaznamenaná holografická mřížka – stínítko ve vzdálenosti 1000 mm od mřížky (autor, 2023).....	42

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Složení použitých směsí.....	27
---	----