

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Zařízení pro měření vlastností fotopolymerních
záznamových struktur

The device for measurement of photopolymer
recording structures properties

Liberec 2010

Bc. Lukáš Marek

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Zařízení pro měření vlastností fotopolymerních záznamových struktur

Lukáš Marek

Studijní program: B2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 3906T001 - Mechatronika

Pracoviště: Ústav řízení systémů a spolehlivosti

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Technická Univerzita v Liberci

Studentská 2, 461 17, Liberec 1

Školitel: Ing. Vít Lédl, Ph.D.

Konzultant: Ing. Milan Květoň, Ph.D.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval těm, kteří svou pomocí přispěli ke vzniku této práce, především za vedení práce Ing. Vítu Lédlovi Ph.D. a za pomoc při měření Ing. Romanu Dolečkovi. Ing. Milanovi Květoňovi Ph.D. za cenné rady a poskytnutí fotocitlivých polymerů. Také bych chtěl poděkovat celé své rodině, především rodičům, za jejich podporu při studiu.

Abstrakt

Zařízení pro měření vlastností fotopolymerních záznamových struktur

Cílem diplomové práce je provést rešerši objemových fázových difrakčních mřížek a jejich způsoby záznamu. Prostudovat základní typy holografických záznamových struktur a materiály používané v holografii s důrazem na materiály fotopolymerního typu. Na základě těchto znalostí navrhnout měřicí zařízení pro měření vlastností fotopolymerních záznamových struktur. Zařízení je sestaveno tak, aby v materiálu vytvořilo pomocí dvou laserových svazků interferenční obrazec, tedy difrakční mřížku. Druhým laserovým paprskem, který neovlivní expozici materiálu, je měřen průběh expozice mřížky a to na základě ohybu světla na difrakční mřížce. Průběhu expozice mřížky je změřen osciloskopem a přenesen do programu Matlab, kde je posuzována dosažená difrakční účinnost a diferenciální index lomu. Cílem je na základě testovacích měření navrhnout možná vylepšení měřicího zařízení.

Klíčová slova: interference, difrakce, difrakční mřížky, fotopolymery

Abstract

The device for measurement of photopolymer recording structures properties

The aim of this work is research phase volume grating and methods of their record. The work also concerns standard types of holographic record structure and materials used in holography with primary look into photopolymer recording structures. According to this knowledge the work suggests measuring instrument for measuring property of photopolymer recording structures. The Instrument will be constructed to produce, by the help two laser rays, interference figure in recording material. Second laser ray is measure process of exposition grating. This ray is not being recorded to recording material. Measuring principle is a diffraction ray on a diffraction grating. The process of exposition be measured by oscilloscope and transferred to PC program Matlab, where reach diffractive and differential refractive index will be evaluated effectivity. The aim is on the grounds testing measuring some improvement measuring device.

Key words: interference, diffraction, diffraction grating photopolymers

Obsah

Obsah.....	7
<i>Seznam obrázků.....</i>	<i>9</i>
<i>Seznam tabulek.....</i>	<i>10</i>
Úvod	11
1. Odborná rešerše	13
<i>1.1 Základy fotoniky.....</i>	<i>13</i>
1.1.1 Index lomu	14
1.1.2 Interference světla	15
1.1.3 Difrakce světla	16
1.1.4 Huygens-Fresnelův difrakční vztah	18
<i>1.2 Difrakční mřížky.....</i>	<i>19</i>
1.2.1 Typy difrakčních mřížek	21
1.2.2 Difrakční účinnost mřížek	21
1.2.1 Objemové mřížky a Braggova difrakční podmínka.....	22
<i>1.3 Základy holografie.....</i>	<i>26</i>
1.3.1 Typy hologramů	26
<i>1.4 Materiály používané v optické holografii</i>	<i>27</i>
1.4.1 Stříbrohalidové emulze (SHE)	28
1.4.2 Dichromovaná želatina (DCG).....	28
1.4.3 Fotorezisty	29
1.4.4 Termoplastické materiály	29
1.4.5 Fotopolymery.....	30
1.4.6 Přehled materiálů pro optickou holografii	32
<i>1.5 Digitální holografie.....</i>	<i>32</i>
<i>1.6 Výhody expozice hologramu do fotopolymery.....</i>	<i>33</i>
2. Komponenty měřicího zařízení.....	34
2.1 <i>Mechanické komponenty</i>	<i>34</i>
2.2 <i>Laser.....</i>	<i>34</i>
2.3 <i>Detektory.....</i>	<i>36</i>
2.4 <i>Osciloskop</i>	<i>36</i>
2.4.1 Parametry osciloskopu DSO7034A:	36
2.5 <i>Komunikace mezi PC a osciloskopem.....</i>	<i>37</i>
2.5.1 Nastavení osciloskopu pro komunikaci	37
2.5.2 Nastavení počítače pro komunikaci.....	37
2.5.3 Program obsluhující osciloskop	37
2.6 <i>Principiální návrh měřicího zařízení</i>	<i>38</i>
2.7 <i>Praktické sestavení měřicího zařízení.....</i>	<i>40</i>

2.7.1	Měření vlastností fotopolymerních záznamových struktur	42
3.	Experimentální měření.....	43
3.1	<i>Reálné měřicí zařízení.....</i>	43
3.2	<i>Nastavení měření.....</i>	44
3.3	<i>Měření a záznam dat.....</i>	46
3.3.1	Popis obslužného programu osciloskopu	46
3.3.2	Příklad průběhu měření.....	48
	Shrnutí vlastností zařízení	53
	Závěr	55
	Citovaná literatura.....	56

Seznam obrázků

Obrázek 1: Interference dvou koherentních vln	16
Obrázek 2: Naznačení Huygensova principu.....	17
Obrázek 3: Princip Huygens-Fresnelova integrálu.....	18
Obrázek 4: Průchod paprsků mřížkou	19
Obrázek 5: Difrakční řády	20
Obrázek 6: Vybrané příklady difrakčních mřížek	21
Obrázek 7: Difrakce v objemové mřížce	23
Obrázek 8: Geometrie Braggovy podmínky.....	23
Obrázek 9: Příklad selektivní křivky objemové mřížky	24
Obrázek 10: Míra modulace mřížky	25
Obrázek 11: Princip polymerizace.....	31
Obrázek 12: Použitý laser Coherent Compass 315M - 100.....	35
Obrázek 13: Základní struktura programu.....	38
Obrázek 14: Umístění záznamového materiálu do interferenčního pole.....	39
Obrázek 15: Schéma uspořádání měřicího laseru.....	40
Obrázek 16: Schéma uspořádání pro měření vlastností záznamových materiálů.....	41
Obrázek 17: Sestavené měřicí zařízení	43
Obrázek 18: Měřicí část zařízení	45
Obrázek 19: Podoba poslaných dat z osciloskopu.....	48
Obrázek 20: Průběhy expozice polymeru PVA/AA.....	49
Obrázek 21: Porovnání nevyfiltrovaného a vyfiltrovaného průběhu.....	50
Obrázek 22: Vyfiltrované průběhy expozice.....	50
Obrázek 23: Přexponovaný materiál PVA/AA.....	51
Obrázek 24: Ukázka vytvořené difrakční mřížky v materiálu PVA/AA.....	51
Obrázek 25: Průběhy expozice materiálu od Dr. Sergio Granados-Focil.....	52
Obrázek 26: Porovnání změřených účinností	52

Seznam tabulek

Tabulka 1: Záznamové materiály a jejich základní vlastnosti	32
Tabulka 2: Přehled obvyklých laserů pro účely holografie	35
Tabulka 3: Použité komponenty měřicího zařízení	44

Úvod

V holografické interferometrii se používá mnoho způsobů záznamu hologramu. Kvalita zaznamenaného hologramu nezávisí příliš na způsobu záznamu, ale spíše na kvalitě záznamového materiálu. Stále nejběžněji používaný materiál se používá stříbrohalidová emulze. Je to v principu ultrajemnozrná fotografická emulze. Tento princip se používá i přes značné nedostatky dodnes. Dalším materiálem je dichromovaná želatina. I když tento materiál je svými dobrými vlastnostmi vyhovující pro použití v holografické interferometrii, není příliš používán. Důvodem je obtížné zpracování hologramu po expozici materiálu.

V posledních letech graduje vývoj fotocitlivých polymerů. Polymery umožňují záznam a rekonstrukci hologramu bez nutnosti složitého vyvolávání v porovnání s ostatními materiály. Vývoje fotopolymerních materiálů provádí velké instituce, ale i jednotlivci či malé skupiny a tak není koncový uživatel závislý na jednom dodavateli. Fotopolymery existují jak v tekuté tak tuhé (filmy) podobě. Fotopolymerní filmy nemají tak dobré vlastnosti jako tekuté. Tekutý polymer je možné nanášet na skleněnou destičku nebo vytvořit sendvičovou strukturu vložením polymeru mezi dvě skleněné destičky. Vlastnosti takovýchto struktur je potřeba umět změřit.

Motivace

Fotopolymerní záznamové materiály umožňují široké možnosti aplikací v optice a holografické interferometrii. Například jejich použití umožňuje vytvořit tenké čočky s velkou mohutností, děliče svazků a mnoho dalších použití. U tekutých fotopolymerních záznamových materiálů lze aplikací speciálních sloučenin ovlivnit jejich výsledné vlastnosti, a proto je nutné při práci s těmito materiály umět sestavit a změřit charakteristické vlastnosti fotopolymerních záznamových materiálů.

Cílem práce je navrhnout zařízení pro měření vlastností fotopolymerního materiálu, které dokáže na principu interference a difrakce změřit difrakční účinnost a diferenciální index lomu fotopolymerní záznamové struktury. Pro určení diferenciálního indexu lomu je potřeba změřit průběh nárůstu difrakční účinnosti mřížky vytvářené v materiálu při expozici.

Cíle práce:

- Provést rešerši objemových difrakčních mřížek. Studovat materiály a jejich vlastnosti, používané v holografické interferometrii s důrazem na fotopolymery.
- Navrhnout experimentální zařízení pro měření vlastností fotopolymerech záznamových struktur.
- Sestavit podle návrhu měřicí zařízení a změřit vybrané vlastnosti zvolených fotopolymerních materiálů.

1. Odborná rešerše

1.1 Základy fotoniky

Viditelné světlo je elektromagnetické vlnění o vlnové délce 400-750nm. U světla lze pozorovat jevy, které vypovídají spíše o složení světla z částic tzv. fotonů, jako je fotoelektrický jev. Nebo naopak jevy jako kdy se světlo chová jako vlnění. Vlnovou povahu lze demonstrovat například na jevech interference a polarizace.

Viditelné světlo je příčná elektromagnetická vlna. Protože elektromagnetické vlny jsou popsány Maxwellovými rovnicemi, lze šíření světla popsat vlnovou rovnicí odvozenou z Maxwellových rovnic. Vlnová rovnice pro popis světla ve vakuu se zapíše takto:

$$\nabla^2 E - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad (1.1)$$

kde ∇^2 je Laplaceův operátor, E je velikost elektrického pole a c rychlost světla ve vakuu. Laplaceův operátor lze v tří-rozměrném prostoru zapsat takto:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (1.2)$$

Rychlost světla ve vakuu je konečná a její velikost je $c_0 = 299\,792\,458\,ms^{-1}$.

Mluvíme-li o příčné vlně, máme tím na mysli, že vlna kmitá kolmo na směr šíření. Tato orientace kmitání se nazývá polarizace. Kmitá-li vlna pouze v jedné rovině, jedná se o vlnu lineárně polarizovanou šířící se ve směru osy z . Poté lze zapsat skalární vlnovou rovnici:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad (1.3)$$

Při osvětlení jakéhokoliv detektoru jako je například oko, fotodioda, film či CCD čip kamery jsou tyto detektory schopné detekovat pouze intenzitu světla. Intenzita světla je definovaná jako energetický tok jednotkovou plochou. Vztah pro intenzitu lze vyjádřit z Maxwellových rovnic:

$$I = \varepsilon_0 c E^2 \quad (1.4)$$

Protože rychlost světla c a ϵ_0 permitivita vakua jsou konstanty lze uvažovat přímou závislost mezi intenzitou a energií:

$$I \approx E^2. \quad (1.5)$$

Jak je vidět z rovnice (1.5) intenzita světla je nelineárně závislá na velikosti elektrického pole. Detektory nejsou schopné sledovat změny intenzity s frekvencí světla, která je řádově 10^{14} Hz . Proto je měřená intenzita výsledkem časového působení světla po dobu větší, než je perioda kmitání světla. Okamžitou intenzitu světla tedy nelze měřit, vždy měříme střední intenzitu. Střední intenzitu lze vyjádřit:

$$I(r, t) = \langle |E(r, t)|^2 \rangle \quad (1.6)$$

tedy pro dobu měření T_m mnohem větší než $T = \frac{2\pi}{\omega}$ a vynechání konstant v komplexním tvaru definujeme:

$$I = E_0 E_0^* = |E_0|^2 \quad (1.7)$$

Kde $*$ značí komplexně sdruženou veličinu. Intenzita obecně stacionárního vlnového pole je

$$I(r) = \langle EE^* \rangle = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{T_m} \int_{-\frac{T_m}{2}}^{\frac{T_m}{2}} E(r, t') E^*(r, t') dt' \quad (1.8)$$

Tato intenzita je limitou „krátkodobé intenzity“,

$$I(r) = \langle EE^* \rangle = \frac{1}{T_m} \int_{-\frac{T_m}{2}}^{\frac{T_m}{2}} E(r, t') E^*(r, t') dt' \quad (1.9)$$

která je klouzavým průměrem času měření T_m . Čas je vždy mnohem delší než perioda kmitání světelné vlny, ale nemůže být kratší než je doba měřeného procesu.

1.1.1 Index lomu

Index lomu n je jedna ze základních veličin pro popis optických materiálů a udává poměr rychlostí světla ve vakuu c_0 a v daném materiálu c a je definován následujícím způsobem:

$$n = \frac{c_0}{c} \quad (1.10)$$

1.1.2 Interference světla

Interference světla svědčí o jedné z jeho vlnových vlastností. Interferenci lze pozorovat zejména u světla monochromatického. Interference spočívá ve sčítání a odčítání různých příspěvků dvou vln v určitém místě, kde lze pozorovat minima a maxima, tedy interferenční strukturu. Chceme-li pozorovat interferenční obrazec, musíme použít koherentní zdroj světla. Ideálním koherentním zdrojem je například laser, použitím nedostatečně koherentního zdroje světla přijdeme o možnost pozorovat interferenční obrazec. Obraz interference bude rozmazaný a budeme pozorovat pouze střední hodnotu intenzity záření. Interference je základním principem, který využívá holografické interferometrie. Při koherentní superpozici uvažujeme skládání dvou vln z jednoho zdroje lišící se vlnovými vektory $\vec{k}_1$, $\vec{k}_2$ a ve velikosti fázového posunu Φ_1 a Φ_2 . Použitím jednoho zdroje můžeme uvažovat, že obě vlny mají stejnou frekvenci ω a jsou polarizované ve stejném směru. Takové vlny lze skalárně zapsat:

$$\begin{aligned} E_{01}(\vec{r}, t) &= E_0 e^{i(\vec{k}_1 \vec{r} - \omega t + \Phi_1)} \\ E_{02}(\vec{r}, t) &= E_0 e^{i(\vec{k}_2 \vec{r} - \omega t + \Phi_2)} \end{aligned} \quad (1.11)$$

Lokální intenzita pak bude:

$$I(\vec{r}, t) = |E_{01}|^2 + |E_{02}|^2 + 2|E_{01}||E_{02}|\cos[(\vec{k}_1 - \vec{k}_2)\vec{r} + \psi] \quad (1.12)$$

kde ψ je konstantní fázový rozdíl $\Phi_1 - \Phi_2$. Rozdíl $\vec{k}_1 - \vec{k}_2 = \vec{K}$ je takzvaný lokální interferenční vektor interferenční struktury. Vyjádřeno pomocí intenzit dostaneme interferenční rovnici:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos[(\vec{k}_1 - \vec{k}_2)\vec{r} + \psi] \quad (1.13)$$

Rovnice (1.13) se také zapisuje:

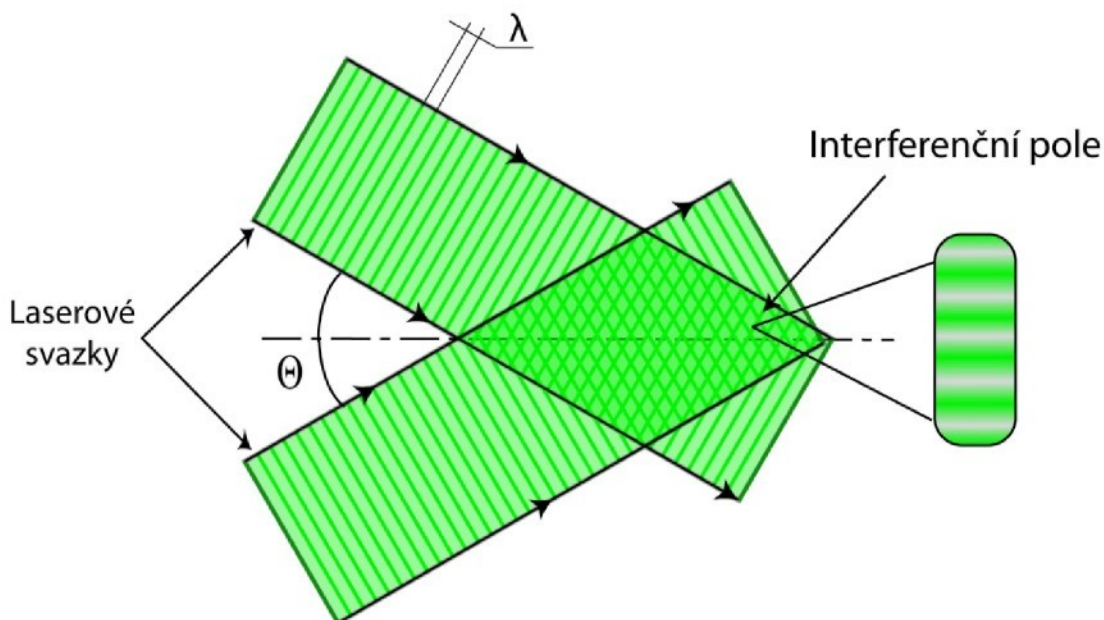
$$I = (I_1 + I_2)(1 + v[(\vec{k}_1 - \vec{k}_2)\vec{r} + \psi]) \quad (1.14)$$

Kde se v označuje jako vizibilita neboli kontrast interferenčních proužků.

Místo amplitudových veličin se počítá s veličinami intenzivními. Potom se perioda interferenčního pole vypočítá

$$\Lambda = \frac{\lambda_0}{2 n \sin(\theta/2)} \quad (1.15)$$

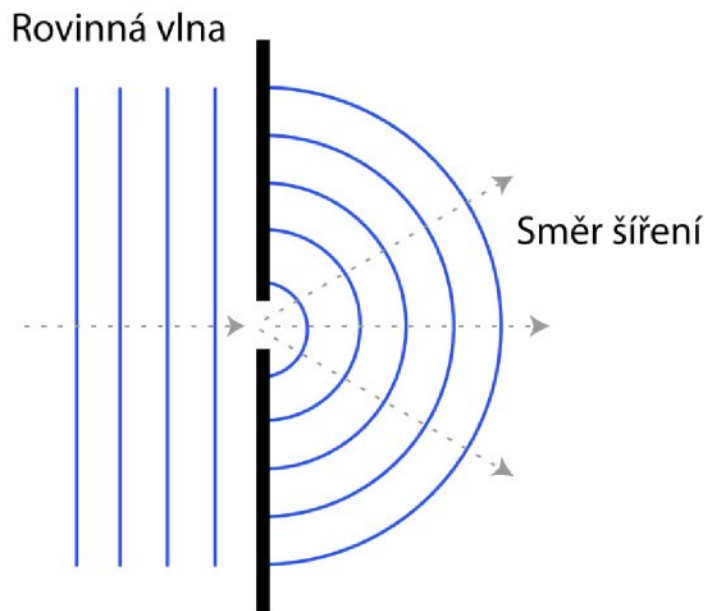
kde λ_0 je vlnová délka laserového světla a θ úhel mezi svazky, n index lomu prostředí.



Obrázek 1: Interference dvou koherentních vln

1.1.3 Difrakce světla

Pohlížíme-li na světlo jako na vlnění, můžeme předpokládat, že na překážkách, které jsou svou velikostí srovnatelné s vlnovou délkou světla, může docházet k ohybu světla. Je tedy možné pozorovat světlo i v prostoru za překážkou kam by se podle teorie paprskové optiky nemělo dostat, oblast takzvaného geometrického stínu. Na stínítku umístěném za překážkou nebudeme pozorovat ostrou hranici mezi světlem a stínem, ale vlivem ohybu pozorujeme difrakční obrazec.



Obrázek 2: Naznačení Huygensova principu

První představy o difrakci zformuloval v roce 1678 Huygensem, takzvaný Huygensův princip: *Každý bod vlnoplochy se stává zdrojem kulové vlny a výsledná vlnoplocha je obálkou těchto sekundárních vln.* [1]

Dokonalejší popis difrakce na otvoru libovolného tvaru provedl Fresnel. Ten spojil proces difrakce s interferencí a tak dal názornému Huygensovu principu o obálce vlnoploch matematické vymezení. Výsledkem byla formulace Huygens-Fresnelova integrálu. Integrál umožnil analytický výpočet řady difrakčních obrazců.

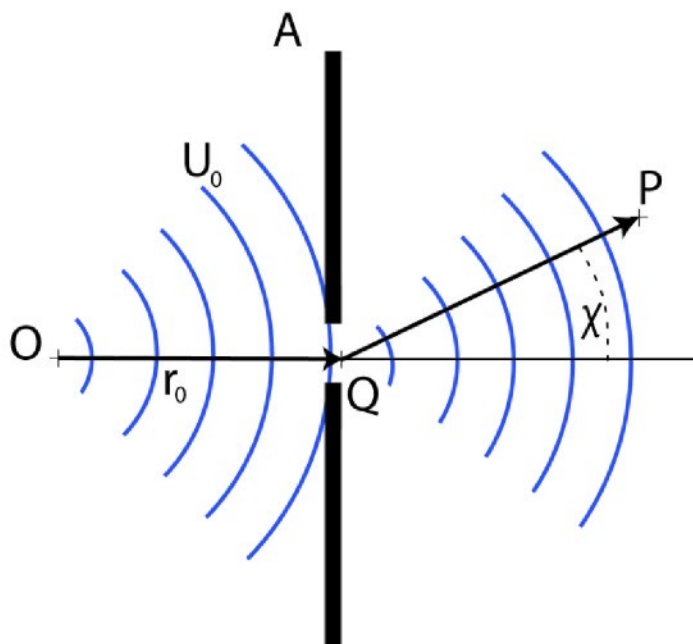
Následné zdokonalení provedl Kirchhoff, za použití Greenových funkcí a vlnové Helmholtzovy rovnice, matematicky zpřesnil úlohu difrakce. Tím, že úlohu zpřesnil, prohloubil pohled na ztvárnění okrajových podmínek. Následným zpřesněním těchto podmínek se zabývali Poincaré a Sommerfeld.

Zajímavým přístupem řešením difrakční úlohy je metoda fourierovské optiky. Ta nahlíží na difrakci jako na přenosový systém. Považuje difrakci za lineární systém, kde platí princip superpozice. Poté sleduje skalární informaci před a za takovýmto systémem.

Účelem této práce není probírat všechny přístupy nahlížení na difrakci, pro podrobnější vysvětlení bych odkázal na literaturu [2] [1].

1.1.4 Huygens-Fresnelův difrakční vztah

Z Huygensova principu je možné vyjádřit difrakční integrál.



Obrázek 3: Princip Huygens-Fresnelova integrálu

Kulová vlna se šíří z bodu O a amplitudě U_0 dopadá do bodu Q ve vzdálenosti r_0 o ploše dA v apertuře A . Generuje do druhé poloviny prostoru za aperturou sekundární vlnu, která do bodu P přispěje diferenciální amplitudou:

$$dU(P, r_0) = \left(U_0 \frac{e^{-ikr_0}}{r_0} K(\chi) dA \right) \frac{e^{-ikr}}{r} \quad (1.16)$$

kde $K(\chi)$ je takzvaný inklikační faktor (činitel zkosu), který vyjadřuje úhlovou závislost mezi normálou dopadající vlny a normálou druhé vlny směřující do bodu P . Integrací přes celou aperturu A získáme stav celého pole – **Huygens-Fresnelův difrakční integrál**:

$$U(P) = U_0 \iint_A \frac{e^{-ik(r_0+r)}}{r_0 r} K(\chi) dA = U_0 \frac{e^{-ikr_0}}{r_0} \iint_A \frac{e^{-ikr}}{r} K(\chi) dA \quad (1.17)$$

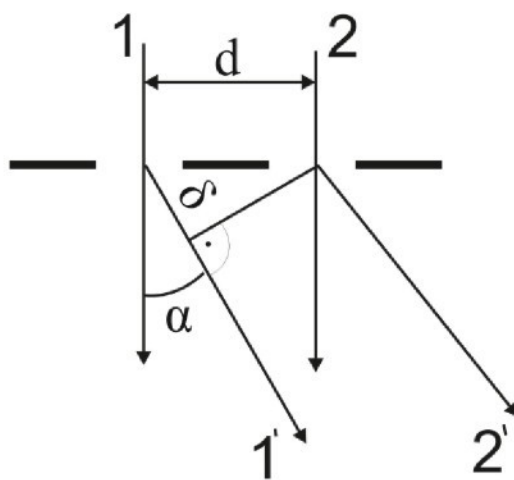
Druhý vztah XX platí, je-li integrační oblast A tvořena částí vlnoplochy dopadající vlny. Podle Fresnela je úhlová závislost taková, aby pro úhel $\chi = 0$ byl příspěvek maximální a pro $\chi = \frac{\pi}{2}$ nulový. Příspěvky od dopadající vlny se rozdělí do tzv. Fresnelových zón – úseky s rozdílnými optickými drahami $\lambda/2$ viz Obrázek 3. Označíme-li příspěvek j-té zóny K_j a tím že vedlejší příspěvky přispívají střední hodnotou a opačnou fází lze tvrdit $\left(\frac{K_{j-1}}{2} - K_j + \frac{K_{j+1}}{2}\right) = 0$. Příspěvky mimo poloviční a část poslední zóny se vyruší. Integrací přes celou vlnoplochu lze získat amplitudy prvního příspěvku i/λ , která určuje inklikační faktor:

$$K(\chi) = \frac{i}{\lambda} \cos \chi \quad (1.18)$$

Další řešení inklikačního faktoru řešili Kirchhoff a Sommerfeld [1].

1.2 Difrakční mřížky

Difrakční mřížka je prostředí s periodickou modulací vlastností materiálu například absorpce, index lomu nebo výšky reliéfu. V nejjednodušším případě to může být velké množství pravidelně rozmístěných štěrbin. Vzdálenost štěrbin je konstantní a určuje periodu mřížky Λ . Dopadá-li na mřížku rovinná vlna, za mřížkou se šíří světlo podle Huygensova principu. Štěrby se stávají zdroji světla, od nichž se světlo šíří všemi směry.



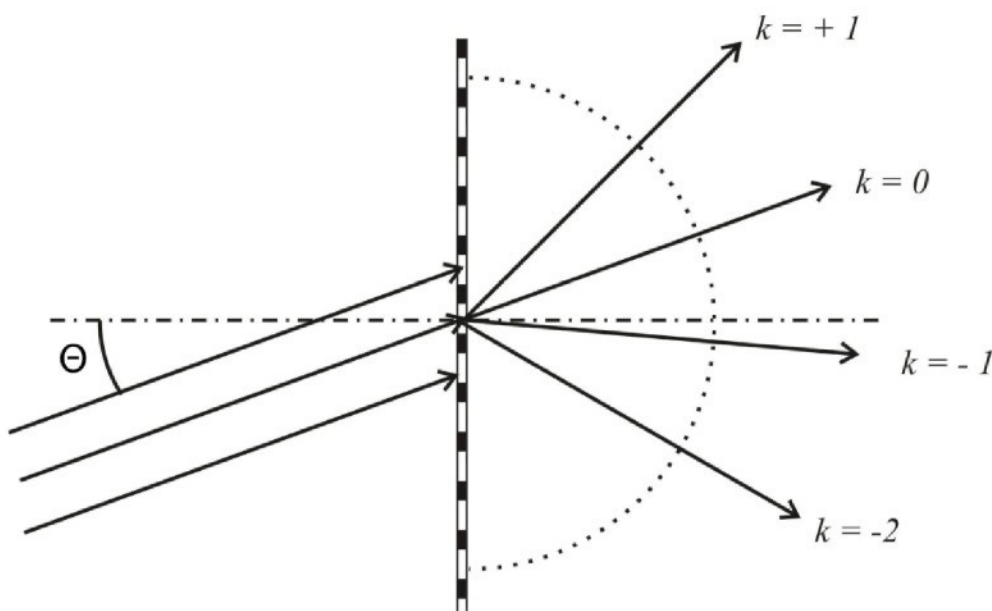
Obrázek 4: Průchod paprsků mřížkou

Princip difrakce na mřížce lze názorně vysvětlit pomocí obrázku 4. Paprsky 1 a 2 prochází středy dvou sousedních štěrbin. Paprsek 1 se vychýlí o úhel α na paprsek 1' a 2'. Jejich dráhový rozdíl je roven $\delta = d \sin \alpha$. Paprsky budou maximálně interferovat, pokud se jejich dráhový rozdíl bude rovnat celému násobku vlnové délky dopadajícího světla.

$$k\lambda = d \sin \alpha_k \quad (k = 0, 1, 2, 3) \quad (1.19)$$

Číslo k , je řádem maxima a pro $k = 0$ musí být $\alpha = 0^\circ$ pro všechny vlnové délky. Jedná se tedy o nultý řád. Symetricky po obou stranách lze pak pozorovat další řády, pod úhly α_k , které splňují podmínku (1.19). Na obrázku 5 je znázorněn obecnější případ, kdy rovinná vlna nedopadá kolmo na mřížku, ale pod úhlem Θ . Potom směry (řády) konstruktivní interference splňují podmínku, která se nazývá mřížková rovnice:

$$\sin \alpha_k - \sin \Theta = \frac{k\lambda}{\Lambda} \quad (1.20)$$



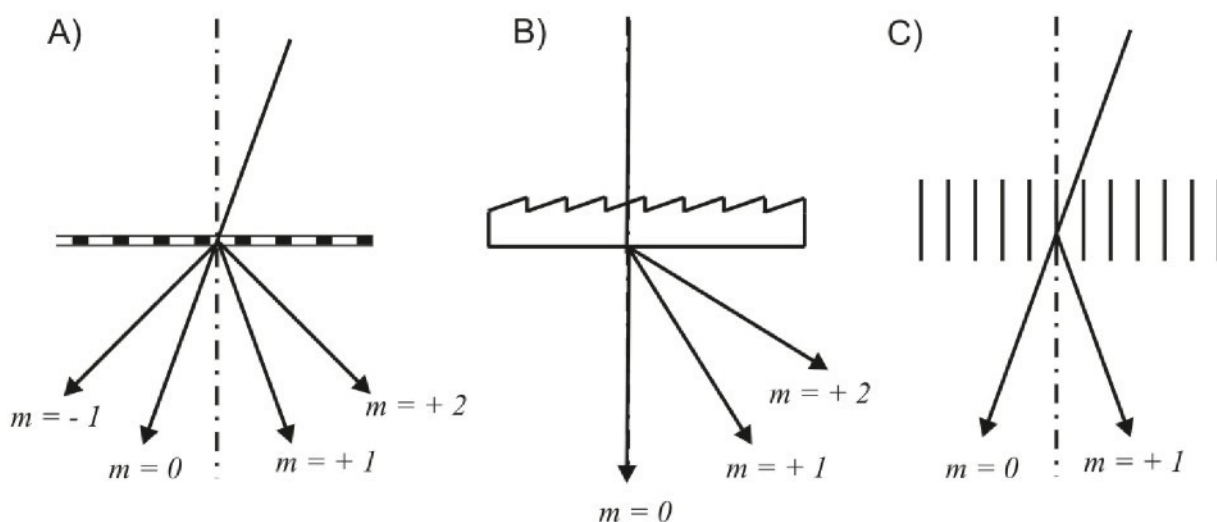
Obrázek 5: Difrakční řády

1.2.1 Typy difrakčních mřížek

Použitím různých materiálů a způsobů výroby, můžeme vytvořit různé druhy difrakčních mřížek. Mřížky dělíme podle několika hledisek. Například transmisní/reflexní, tenké/objemové a amplitudové/fázové. Nás zajímají především mřížky objemové. Nezanedbatelná tloušťka difrakčního prostředí ovlivňuje difrakci odrazy v objemu mřížky. Objemovost mřížky je posuzována takzvaným faktorem objemovosti $[I]$:

$$Q = 2\pi \frac{\lambda d}{n_0 \Lambda} \quad (1.21)$$

kde d je tloušťka mřížky, n_0 je střední index lomu mřížky, λ vlnová délka světla ve vakuu a Λ perioda difrakční mřížky. Hodnota $Q \ll 1$ určuje tenkou mřížku a hodnota $Q > 10$ mřížku objemovou.



Obrázek 6: Vybrané příklady difrakčních mřížek A) tenká amplitudová mřížka
B) Reliéfní mřížka C) Objemová mřížka

1.2.2 Difrakční účinnost mřížek

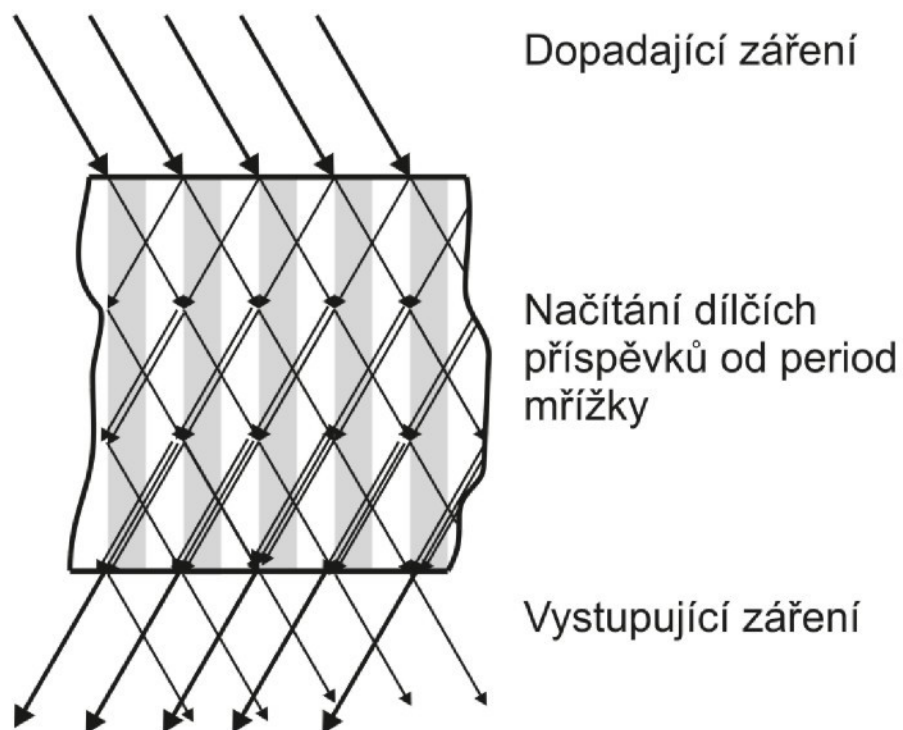
U difrakčních mřížek je určujícím parametrem vlastnost, jaké množství světla dokáže transformovat do prvního řádu difrakce. Tuto vlastnost vyjadřujeme difrakční účinností. Difrakční účinnost do prvního difrakčního řádu je definovaná jako poměr dopadajícího světla na mřížku a světla difraktovaného za mřížkou. Difrakční mřížky můžeme rozdělit do několika základních typů, tenké amplitudové a fázové, objemové

mřížky. Amplitudová mřížka působí při průchodu světla na jeho amplitudu. Nejčastěji bývá modulovaná harmonickou funkcí kosinus nebo binární funkcí. Mřížka nemusí být promodulována maximální modulací, tzn. maximem nemusí být zcela nepropustná oblast a minimem zcela propustná oblast. Tato hloubka modulace je popsána činitelem modulace $0 \leq M \leq 1$. Amplitudová mřížka absorbuje většinu světelné energie, proto mají tyto mřížky malou difrakční účinnost. U harmonické amplitudové mřížky je účinnost 6,25% a u mřížky s binární modulací mřížky 10%. Amplitudové mřížky se kvůli malé difrakční účinnosti nepoužívají. Fázové mřížky dosahují lepší účinnosti u, kterých je difrakce dosažena, změnou indexu lomu materiálu nebo změnou vrstvy materiálu. U harmonických fázových mřížek lze dosáhnout účinnosti až 34% a u binárních fázových mřížek až 40%.

U objemových fázových mřížek lze dosáhnout až 100% účinnosti, a dopadající vlna je difraktovaná do jednoho difrakčního řádu. Tenké fázové mřížky nedosahují tak vysoké účinnosti a difraktují do více difrakčních řádů. Účinnost objemových difrakčních mřížek ještě závisí na Braggově podmínce, která bude vysvětlena dále v práci.

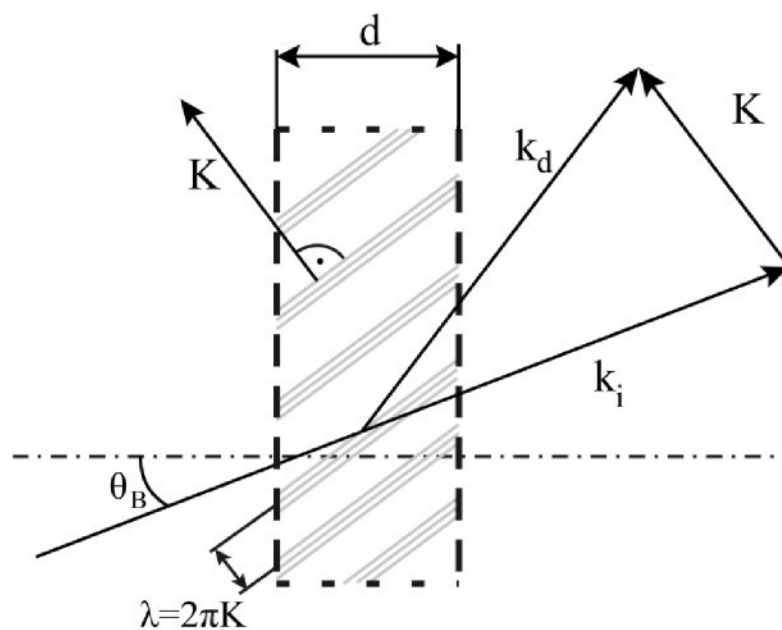
1.2.1 Objemové mřížky a Braggova difrakční podmínka

Dále se budeme zabývat jen objemovými fázovými transmisními mřížkami. Za objemové mřížky považujeme takové, které mají faktor objemovosti $Q > 10$. U takových mřížek pozorujeme objemové efekty. Dopadající vlna prochází několika periodami mřížky a tak dochází k interferenci vln vybuzených difrakcí a dopadajících vln. Aby účinnost byla co nejvyšší, musí být charakter interferenčního pole podpořen periodou difrakční mřížky tak, aby vznikající příspěvky byly načítány ve fázi takzvaný objemový fázový synchronizmus difrakce viz Obrázek 7.



Obrázek 7: Difrakce v objemové mřížce

Budeme li uvažovat interferenční pole vzniklé dopadající a difraktovanou vlnou pak interferenční vektor $\vec{K} = \vec{k}_d - \vec{k}_i$ je kolmý na interferenční plochy. Kde $\vec{k}_d$ je vektor vlny difraktované a $\vec{k}_i$ vektor vlny dopadající. Jestliže se tyto dvě vlny mají skládat, je nutné, aby mřížkový vektor byl identický s vektorem interferenčním.



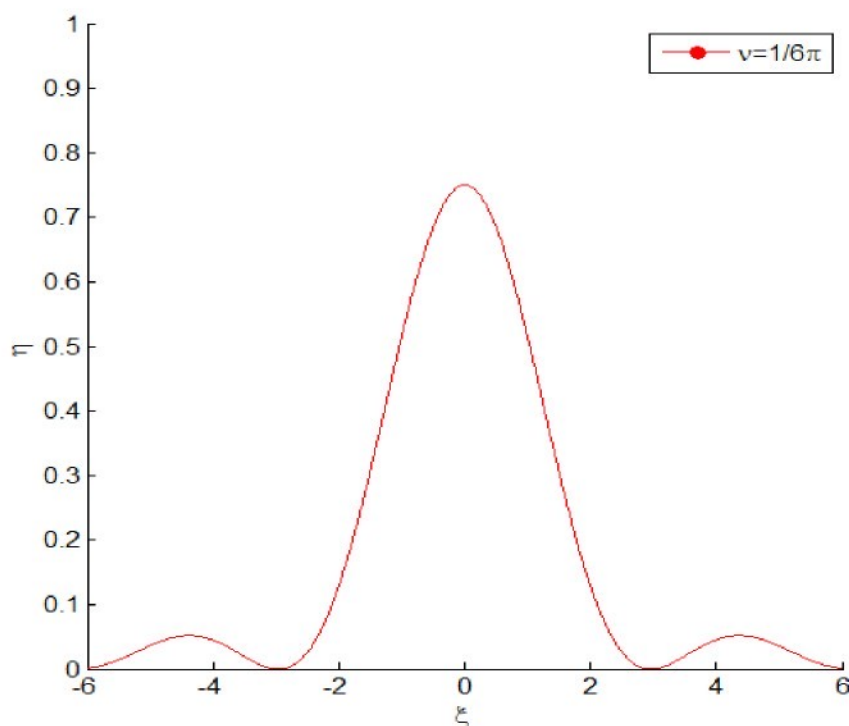
Obrázek 8: Geometrie Braggovy podmínky

Matematicky vyjádřené toto tvrzení se nazývá Braggova difrakční podmínka v podobě:

$$\begin{aligned} \mathbf{k}_d &= \mathbf{k}_i + \mathbf{K} \\ |\mathbf{k}_d| &= |\mathbf{k}_i| \end{aligned} \quad (1.22)$$

kde vektor mřížkový $\mathbf{K}$ a vektor interference $\mathbf{K}$ jsou identické. Tato podmínka vyjadřuje vlastnost, že se na difrakčních plochách odráží dopadající vlna na vlnu difraktovanou. Braggova podmínka nám neposkytuje další informaci o směru difrakce, lze ji počítat pomocí tenké mřížky. Zato udává za jakých podmínek je difrakce na objemové difrakční mřížce nejúčinnější, to znamená dosažení optima fázového synchronizmu. Optimum nastává, jsou-li difrakční plochy zároveň zrcadly vln.

Budeme-li vychylovat dopadající vlnu o úhel ϑ od úhlu, kdy je splněna Braggova podmínka. Je potom úhel ϑ odchylka od Braggovy podmínky. Závislost difrakční účinnosti na úhlu ϑ nazýváme selektivní křivkou objemové difrakce. Pro $\vartheta = 0$ je tedy účinnost maximální.



Obrázek 9: Příklad selektivní křivky objemové mřížky

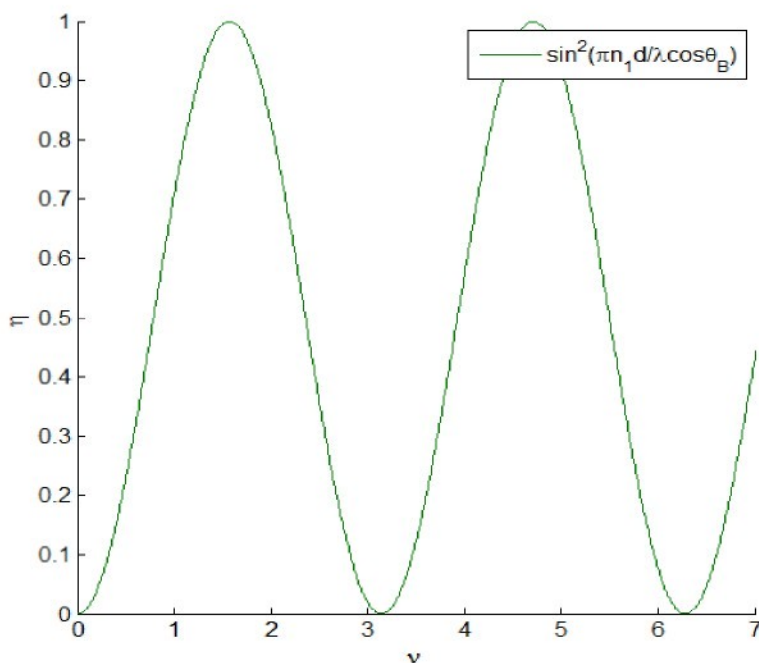
Na obrázku 9 je znázorněna selektivní křivka objemové fázové transmisní mřížky, kde účinnost je vypočtena ze vztahu:

$$\mu = \frac{\sin^2 \sqrt{\nu^2 + \xi^2}}{1 + \frac{\xi^2}{\nu^2}} \quad (1.23)$$

$$\text{kde } \nu = \frac{\pi n_1 d}{\lambda \cos \theta_B} \quad \text{a} \quad \xi = \frac{d}{2 \cos \theta} \vartheta$$

ξ se označuje jako odchylka od ideálního Braggova úhlu nebo změna vlnové délky. Při splnění Braggovy podmínky poté platí pro difrakční účinnost vztah:

$$\mu = \sin^2 \frac{\pi n_1 d}{\lambda \cos \theta_B} \quad (1.24)$$



Obrázek 10: Míra modulace mřížky

Obrázek 10 znázorňuje závislost difrakční účinnosti na míře modulace mřížky při daném Braggovo úhlu, která je ovlivněna tloušťkou materiálu a mírou expozice. Při dosažení 100% difragovaného svazku začne se difragovaný přelévat zpátky do nedifragovaného.

1.3 Základy holografie

Každá vlna je určena amplitudou a fází. Při jejím klasickém záznamu různými detektory jako například fotografický film nebo CCD čip kamery, zaznamenáváme pouze intenzitu. Informace o fázi je ztracena. Ze studia interference v kapitole 1.1.2 plyne, že při interferenci vln se stejnou frekvencí, dochází k vzniku rozdělení intenzity závislé na fázovém rozdílu $\Delta\Phi$. Tento princip se využívá v holografii, kde je informace o fázovém rozdílu zaznamenána v interferenčním obrazci. Fázové rozdíly jsou zaznamenány v podobě intenzity. Podmínkou tohoto záznamu je použití koherentního vlnění alespoň po dobu expozice fázového rozdílu $\Delta\Phi$ do záznamového materiálu.

Hologram v podstatě tvoří soustava různých difrakčních mřížek. Z toho lze usoudit, že záznamem interferenčního pole vytvoříme difrakční mřížku v záznamovém materiálu. Jiným způsobem vytvoření hologramu je laserovou litografií. Tato metoda záznamu vytváří obraz bod po bodu. V této práci se zabývám záznamem interferenčního pole.

1.3.1 Typy hologramů

Hologram je obraz zaznamenaný na dvourozměrné záznamové medium produkující trojrozměrný obraz. Obraz je zaznamenaný ve vrstvě emulze. Jednoduše řečeno je hologram úplný záznam světelné vlny, který v sobě obsahuje jak fázovou tak amplitudovou informaci. Ne všechny 3D obrazy lze označit za hologramy a každý hologram nemusí být trojrozměrný. Fotografický obraz je zobrazený objektivem fotografického přístroje a zaznamenaný na fotografický film nebo čip. Hologram je obraz vytvořený interferencí (mikrostrukturou), který zrekonstruujeme pomocí difrakce.

Podle způsobu zaznamenání a rekonstrukce hologramu lze hologramy rozdělit do několika typů:

Reflexní hologram – hlavní výhodou reflexního hologramu je viditelnost v bílém světle. Klade vysoké nároky na rozlišovací schopnost materiálu.

Transmisní hologram - je jeden z nejpoužívanějších hologramů, na jeho záznam stačí jednoduché zařízení. Hologram je vytvořen průchodem rekonstrukční vlny za záznamem. V denním světle působí rozmazaně, pouze při osvětlení laserem působí

obraz ostře. Nemá tak vysoké nároky na rozlišovací schopnost materiálu jako reflexní hologram.

Reliéfní hologramy – vyrábí se například tak, že se rytím vytvoří mikroskopická struktura podobná interferenčnímu poli holografického obrazce. To umožňuje vytvořit matrici a hologramy tisknout ve velikých sériích což snižuje cenu výroby a umožňuje jejich velké rozšíření. Používají se hlavně jako optické ochranné prvky. Výsledné hologramy jsou trvanlivé a flexibilní.

Další typy a aplikace lze najít v literatuře [3].

1.4 Materiály používané v optické holografii

Záznamové materiály používané v optické holografii jsou materiály reagující na osvětlení změnou svých optických vlastností. Některé materiály mění optické vlastnosti v průběhu expozice, jiné musí být ještě vyvolány a běleny pro dosažení požadovaných vlastností. U materiálu lze měnit amplitudovou propustnost, index lomu a tloušťku materiálu.

Ideální materiál pro optickou holografii má následující vlastnosti:

- Materiál by měl být dostatečně citlivý, aby nemusel být exponován dlouhou dobu. Dlouhou dobou expozice může být záznam hologramu ovlivněn rozhýbáním interferenčního pole v průběhu expozice vzniklým chvěním celého záznamového zařízení.
- Vysoké rozlišení a dostatečně plochou frekvenční odezvu.
- Materiál by měl mít lineární vztah mezi dobou a intenzitou expozice a změnou požadované vlastnosti. To zajistí věrnou rekonstrukci obrazu.
- Změna indexu lomu nebo absorpce by měla být velká, aby bylo dosaženo co nejvyšší účinnosti hologramu.
- Vlastní šum materiálu by měl být co nejmenší.
- Hotový záznam by měl být časově stálý a odolat působení prostředí.
- Materiál by měl být levný a použitelný i pro jiné aplikace.

Takovýto materiál bohužel neexistuje, některé materiály se svými vlastnostmi přibližují.

1.4.1 Stříbrohalidové emulze (SHE)

Holografické SHE jsou speciální fotografické emulze s velmi vysokým rozlišením umožňující vytvořit amplitudový nebo fázový záznam. Základem emulze jsou krystaly halogenidu stříbrného AgX umístěné v nosiči, nejčastěji v želatině. Rozdíl mezi holografickou emulzí a fotografickou emulzí je ve velikosti krystalů halogenidu stříbrného, která je o řád až dva menší ve prospěch emulzí holografických.

Při expozici zrn AgX dochází ke vzniku zárodků kovového stříbra Ag. Z těchto zárodků se smáčením ve vývojce, která je určena pro daný materiál, vyvolá stříbro Ag a vznikne amplitudový záznam. Amplitudový záznam je v holografii téměř nepoužitelný, kvůli velké absorpci a nízké difrakční účinnosti. Po vyvolání záznamu nastává proces bělení, při kterém se stříbro zpětně rehalogenizuje. Výsledkem je fázový záznam.

Výhody SHE:

- Vysoká citlivost materiálu
- Možnost senzibilace na různé vlnové délky pomocí barviv
- Rozlišovací schopnost přesahující 5000 čar/mm (fotografické 150čar/mm)

Nevýhody:

- Vysoký šum
- Mokrá proces zpracování – možnost deformace mřížky

1.4.2 Dichromovaná želatina (DCG)

Dichloromovaná želatina je objemovým fázovým záznamovým materiálem. Ve vodě rozpustné chromany a dvojchromany vytvářejí s želatinou soustavy, které jsou po vysušení citlivé na světlo. Při expozici dochází k zesíťování makromolekulární matrice materiálu. Materiál pro DCG se připravuje buď smáčením želatinových desek v několikaprocentním roztoku dvojchromanu, nebo se zamíchá do roztoku želatiny před lití. Při expozici dochází k redukci Cr^{6+} na Cr^{3+} , který síťuje želatinu. Fázová modulace je po expozici velmi nízká, proto se želatina hydratuje a sesíťovaná místa v závislosti na zasíťování zvýrazní. Po následné dehydrataci v alkoholové lázni se zasíťování projeví prostorovou modulací indexu lomu.

Výhody DCG:

- Vysoký diferenciální index lomu až 0,25
- Účinnost 100% i pro tloušťku 10 μ m

Nevýhody:

- Nízká citlivost DCG mJ/cm² u SHE μ J/cm²
- Citlivost je rozložena na modrém konci spektra
- Citlivost hotového hologramu na vlhkost

1.4.3 Fotorezisty

Fotorezist je materiál hojně využívaný například v mikroelektronice. Osvícením materiálu dochází ke změnám v makromolekulárních vazbách, což způsobuje změnu rozpustnosti materiálu nejčastěji v zásaditých roztocích. Tímto principem se vytvoří reliéfní záznam. U negativního materiálu je rozpouštěná neexponovaná část, u pozitivních se rozpustí exponovaná. Pro holografii, s ohledem na šum a rozlišovací schopnosti, více vyhovuje materiál pozitivní. Pro záznam reliéfních hologramů je fotorezist nejvyužívanější materiál. Obecně lze dosáhnout rozlišení až 5000 čar na milimetr. Za specifických podmínek jako je tvar a sklon reliéfu, jako je trojúhelníkový profil se sklonem odpovídající úhlu odrazu nebo lomu pro daný difrakční řád lze dosáhnout difrakční účinnosti blízké 100%.

1.4.4 Termoplastické materiály

Nosičem materiálu je polymerní film nebo sklo. Na něm je napařením nanесena průhledná vrstva vodiče. Na vodiči je nanесena cca 2,5 μ m silná vrstva fotopolovodiče s citlivostí pro dané spektrum světla. Nad fotonásobičem je cca 1 μ m termoplastická vrstva. Princip je takový, že před expozicí se pomocí koronárního výboje nabije horní termoplastická vrstva statickým kladným nábojem proti uzemněné vrstvě vodiče. Působením světla se dle míry expozice stane fotonásobič vodivým a záporný náboj se lokálně odčerpá na druhou stranu termoplastu, blíže ke kladnému náboji. Po expozici se dalším výbojem svrchní vrstva nabije nerovnoměrně a tento nábojový reliéf se stává zdrojem elektrostatických sil. Vlivem těchto sil se materiál zahřeje a změkne (60°C – 100°C). Tím dochází k přetvoření materiálu na mechanický reliéf. Po vychladnutí je tento reliéf zachován. Expozici je možné opakovat až do limitní plasticity materiálu.

Výhody:

- Vysoká citlivost $10\text{--}100\mu\text{J}/\text{cm}^2$
- Reverzibilita materiálu

Nevýhody:

- Nízké prostorové rozlišení 500–1000 čar na milimetr
- Omezené rozměry záznamového materiálu
- Složitost procesu

1.4.5 Fotopolymery

Fotopolymery jsou obecně systémy monomer – polymer, které působením světla polymerují a změni své vlastnosti. Změna vlastností materiálu probíhá již během a těsně po skončení expozice (tzv. samovyvolávací schopnost).

Fotopolymery se jako záznamové materiály používají již od konce 60. let minulého století. Z počátku tyto materiály vykazovaly nízkou citlivost, nízkou rozlišovací schopnost nebo krátkou trvanlivost. Postupně se složení materiálů optimalizovalo a v současné době se fotopolymery s výhodou používají v různých holografických aplikacích. Materiály vyvíjí a vyrábí několik firem např. DuPont, Polygrama, InPhase, Bayer. Jsou však obtížně dostupné a jejich chemické složení není známo. Existují však i laboratorně připravované materiály (např. fotopolymer na bázi akrylamidu), u něhož známe chemické složení a je možné jej i přizpůsobovat tak, aby byl co nejjednodušší pro danou holografickou aplikaci.

Typický fotopolymerní materiál, ve kterém probíhá při expozici proces světlem iniciované polymerace, se skládá z molekul monomeru případně komonomeru a iniciačního systému. Iniciační systém dále obsahuje iniciátor a barvivo, jehož vhodnou volbou lze nastavit citlivost na požadovanou spektrální oblast. Velmi často fotopolymer obsahuje ještě nosič – polymerní nebo oligomerní látku, ve které jsou ostatní komponenty rozptýleny a který vytváří pevnou kompaktní vrstvu.

Chemické složení použitého fotopolymeru

Chemické složení fotopolymeru na bázi akrylamidu s polyvinylalkoholovým nosičem je založeno na receptuře publikované v článku [4], jednotlivé komponenty jsou komerčně dostupné a používají se bez dalšího chemického čištění.

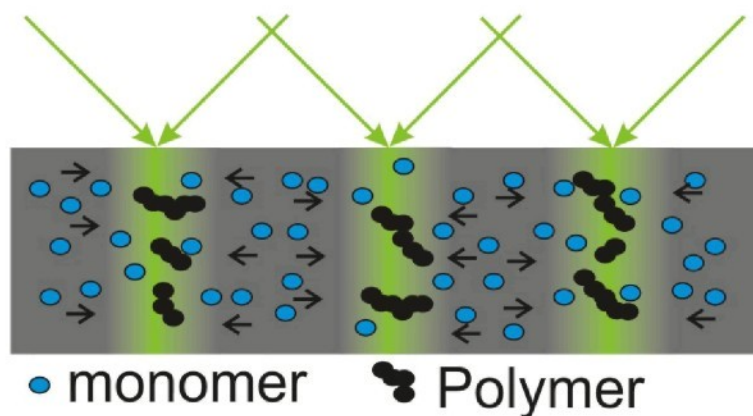
- polyvinyl alkohol (PVA) - nosič
- akrylamid (AA) - monomer
- N,N'-methylenbisakrylamid (BAA) - dvojfunkční monomer, síťovadlo
- trietanolamin (TEA) - iniciátor
- erytrosin B (EB) - senzibilizační barvivo

Polymerizace a vlastnosti fotopolymerů

V této kapitole se vysvětlím princip záznamu a mechanismy probíhající v záznamovém materiálu. Objemová fázová mřížka se vytvoří během expozice, kdy je světlem lokálně ovlivněný index lomu.

Fotopolymer je látka, ve které dochází působením světla k polymerizaci. Proces vytvoření mřížky v polymeru se skládá z procesů absorpce světla, polymerizace a difúze. Fotopolymery se nejčastěji vyrábí citlivé na určité spektrum vlnových délek světla. Výrobci produkují fotopolymery s citlivostí nastavenou na nejběžněji používané vlnové délky laserů, například na červený 633nm či zelený 532nm. Díky použitému senzibilizačnímu barvivu vykazuje materiál maximální absorpci na vlnové délce 538 nm.

Jestliže je materiál ozářen světlem o vlnové délce, na které je citlivý. Dojde k absorpci světla a následně k jeho polymerizaci monomeru. V místech s nejvyšší expozicí rychle stoupá počet polymerů řetězců, monomer proudí k místu polymerizace, kdežto polymer zůstává na svém místě. Tak se v záznamovém materiálu lokálně změní index lomu. Proces difúze polymeru je naznačen na následujícím obrázku.



Obrázek 11: Princip polymerizace

Typická citlivost polymeru se pohybuje okolo desítek mJ/cm^2 . Z principu polymerizace vyplývá, že při zvyšování expozice dochází k saturaci tohoto procesu, takže dalším exponováním materiálu už nedochází k zvyšování počtu řetězců polymerů. Z tohoto důvodu nedojde k tzv. přexponování materiálu. Po expozici materiálu je potřeba v některých případech ustálit materiál UV zářením, kdy jsou zbytky monomeru polymerizovány a v celém objemu stabilizovány.

1.4.6 Přehled materiálů pro optickou holografii

V následující tabulce jsou uvedeny nejčastěji používané záznamové materiály a jejich základní vlastnosti.

Tabulka 1: Záznamové materiály a jejich základní vlastnosti

Záznamový materiál	typ mřížky		Dosažitelná účinnost	rozlišení [l/mm]	proces vyvolání
Stříbro-halidová emulze	Ampl.	tenká	0,06	> 5000	mokrý
	Fáz.	objemová	0,8		
Dichlorovaná želatina	Fáz.	objemová	1	10000	mokrý
Fotopolymery	Fáz.	objemová	1	8000	suchý
fotorezist	Fáz.	tenká	0,33	až 5000	suchý
Termoplastické materiály	Fáz.	tenká	0,33	500-1000	teplem

1.5 Digitální holografie

Vývoj techniky v posledních letech umožnil použít místo záznamového materiálu použít digitální záznam. Oproti nepřímému a náročnému získávání dat a jejich zpracování v klasické holografii je digitalizace záznamu umožňuje efektivnější zpracování dat a jejich rychlé vyhodnocení. Proto jsou pomalu záznamová média nahrazována digitálním záznamem realizovaných CCD či CMOS čipy. Výhody digitální holografie nejsou pouze v rychlosti získávání dat, ale především v možnostech jejich následným zpracováním. Digitalizace obrazu má bohužel i svá úskalí, tou je o řád nižší rozlišovací schopnost než stříbrohalidové emulze a z Shannonova-Kotelníkův vzorkovacího kritéria vyplívají omezení na velikost snímaného objektu či jeho vzdálenosti od CCD čipu. Pro množství praktických aplikací je rozlišení moderních digitálních senzorů postačující. Nutnost pracnějšího sestavování holografické měřicí apertury je zcela vyvážena výhodami při následním zpracováním dat. Ale i přes všechny dobré vlastnosti a možnosti sestavení není možné dosáhnout tak vysoké rozlišovací

schopnosti jako u záznamových materiálů, proto digitální holografie zcela nenahradila záznamové materiály a nezastavila jejich vývoj. Pro podrobnější informace bych odkázal na literaturu zabývající se digitální holografií [5].

1.6 Výhody expozice hologramu do fotopolymery

Způsob práce a vyvolání hologramu zaznamenaného na stříbro-halidový materiál, degraduje jeho jinak dobré vlastnosti. Exponovaný hologram musí projít vyvolávacím a bělicím procesem. Chemické složení vyvolávacího a bělicího roztoku je dáno výrobcem dodávající záznamový materiál. Látky potřebné k jejich namíchání jsou běžně dostupné a často malé množství dodávané přímo se záznamovým materiálem. Kromě dodržení složení roztoků je nutné dodržet dobu smáčení v jednotlivých roztocích. Bohužel se jedná o různé chemické materiály a je nutné použít ochranné rukavice. Držením materiálu v kleštích by ovlivnilo zaznamenanou strukturu v místě uchycení. Po vyvolání a bělení je nutné zbytky roztoků dokonale opláchnout tekoucí vodou a vysušit. Osvědčené je vysoušení materiálu fénem. Pozor na zbylé kapky vody, které by mohli zdeformovat zaznamenaný hologram. Na začátku jsem nezmínil, že materiál je citlivý na světlo, a proto se materiál musí skladovat ve světlo nepropustném obalu. Po tmě musí probíhat jak umístění do držáku umístěného v přesné poloze pro měření, tak přesun do vyvolávacího roztoku. Až do bělení musí obsluha pracovat po tmě a po paměti což je velice diskomfortní. Vynecháním bělicího procesu získáme amplitudový záznam, který se ale vyznačuje nízkou difrakční účinností a proto se v holografické interferometrii nepoužívá. Fotopolymerní materiály se vyznačují samovyvolávací schopností a tím že jsou většinou barevně senzibilované lze u materiálů citlivých na zelenou použít červené osvětlení laboratoře. Tyto dvě vlastnosti velice usnadňující práci při záznamu hologramu a zlepšují tak jeho kvalitu.

2. Komponenty měřicího zařízení

Zařízení je sestaveno v laboratoři optických metod měření na Technické univerzitě v Liberci na fakultě Mechatroniky, informatiky a mezioborových studií. V laboratoři byli všechny komponenty potřebné k sestavení a vyzkoušení zařízení na měření záznamových fotopolymerních struktur. Není nezbytné zde popisovat všechny použité komponenty, jako jsou různé držáky atd., ale zmíním z mého hlediska důležité komponenty.

2.1 Mechanické komponenty

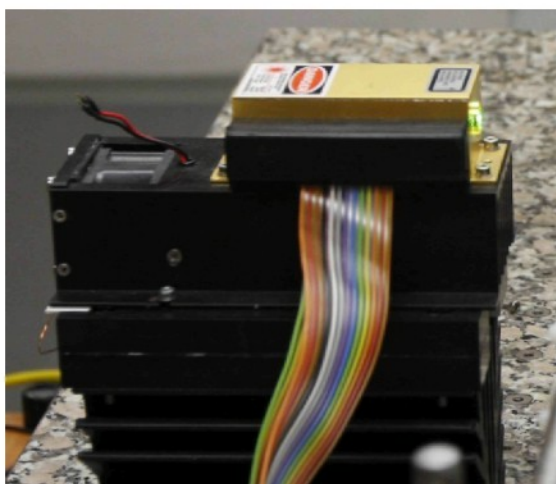
Základem měřicího zařízení i celé laboratoře je speciálně navržený holografický stůl. Tento stůl je mechanicky odizolován od podlahy místnosti, aby se nepřenášely vibrace z budovy. Stabilita stolu je také dosažena vysokou hmotností desky stolu, po kterém jsou rovnoměrně rozmístěné montážní otvory umožňující uchycení stojanů a držáků.

2.2 Laser

Optická holografie a holografická interferometrie začala být realizována teprve až s vynálezem dostatečně výkonného a koherentního světelného zdroje, tj. laseru. Laser jako zdroj koherentního záření je naprosto stěžejní komponentou pro holografii. První používané lasery byly většinou kontinuální plynové nebo pulzní rubínové. Dnes dominují pevnolátkové lasery pracující na nejrozličnějších vlnových délkách od ultrafialového záření přes viditelnou část spektra až po infračervené záření. Přehled základních typů laserů a jejich výkony jsou uvedeny v následující tabulce z [6]:

Tabulka 2: Přehled obvyklých laserů pro účely holografie

Laser	vlnová délka [nm]	Pulsní/kontinuální	Výkon/energie
Rubínový	694	Pulsní	10J/puls
He-Ne	633	Kontinuální	2 mW - 50 mW
Ar+	488	Kontinuální	200 mW
Ar+	514	Kontinuální	1000 mW
Kr+	647	Kontinuální	2000 mW
Kr+	325	Kontinuální	500 mW
He-Cd	442	Kontinuální	25 mW
Nd:YAG	1060	Kontinuální/pulsní	25 mW
Nd ³⁺ : YAG	532	Kontinuální/pulsní	400 mW
Dye	217 - 960	Kontinuální/pulsní	100 mW
Laserová dioda	635	Kontinuální/pulsní	5 mW - 1000 mW



Obrázek 12: Použitý laser Coherent Compass 315M - 100

V laboratoři optických metod měření, dále jen LOMM, používáme laser od firmy Coherent typ Compass 315M – 100. Jedná se o pevnolátkový laser Nd³⁺:Yag. Aktivním materiálem je izotropní krystal Yttrium Aluminium Granátu (Y3Al5O12) dopovaný ionty neodymu (Nd3+). Tento laser emituje záření o vlnové délce 1064,1nm při níž je dosaženo nejvyšší účinnosti. V našem případě emituje laser zelené světlo. Zelené světlo 532nm vzniká konverzí 1064nm pomocí nelineárního krystalu KDP na

druhou harmonickou 532nm. Náš laser produkuje tenký kolimovaný zelený svazek s vlnovou délkou 532nm s maximálním výkonem až 150mW.

2.3 Detektory

Pro měření průběhu expozice difrakční mřížky jsou použity detektory DET100A/M firmy Thorlabs, umožňující měřit vlnové délky od 400nm do 1100nm. Při měření lze detektor vybavit filtrem. Mezi hlavní výhody použití těchto detektorů jsou malé kompaktní rozměry, rychlost náběhu a doběhu 43ns a napájení z baterie. Další vlastnosti a parametry detektorů jsou přístupné na internetových stránkách výrobce [7]

2.4 Osciloskop

Průběh expozice difrakční mřížky bude zaznamenán na osciloskop od firmy Agilent Technologies typ DSO7034A. Jedná se o 4-kanálový všestranně výkonný osciloskop s 12,1“ XGA displejem. Má vynikající možnosti aktualizace měřených průběhů a nadprůměrně vysokou rychlostí obnovy zobrazovaného signálu. Osciloskop nabízí možnosti připojení přes kanály USB 2.0, Ethernet a LAN rozhraní.

2.4.1 Parametry osciloskopu DSO7034A:

- 350MHZ šířka pásma
- 4 analogové kanály
- 2GSa/s vzorkovací frekvence
- rozsáhlá paměť MegaZoom III standardně 8M bodů
- 12,1 palcový displej s rozlišením 1024 x 768 bodů a s 256 úrovněmi intenzity
- každé barvy RGB umožňující i ty nejmenší podrobnosti tj. 256^3 barev
- vysoká rychlost obnovy zobrazovaného signálu až 100.000krát za sekundu
- umožňuje zobrazit i náhodné události
- rozšíření - testování masek/limitů průběhu s rychlostí až 100000 průběhů/s
- statistika měření - střední hodnota, min, max, standardní odchylku a počet provedených měření
- režim tracking (přichycených) kurzorů

2.5 Komunikace mezi PC a osciloskopem

Součástí navrhovaného zařízení by mělo být i zpracování změřených průběhů. Jelikož osciloskop umožňuje komunikovat s počítačem, nabízí se možnost připojit osciloskop k počítači a vhodným programem data z osciloskopu stáhnout a poté vyhodnotit. Pro komunikaci a nastavení osciloskopu jsem zvolil program Matlab. Program umožňuje nastavit osciloskop pro komunikaci přes USB a spustit měření a data uložit na disk.

2.5.1 Nastavení osciloskopu pro komunikaci

Jak bylo uvedeno výše, osciloskop umožňuje připojení k PC. Nabízí tři způsoby připojení k PC. Pomocí LAN, USB a USB typ A-B. Po volbě typu připojení je nutné nastavit adekvátně osciloskop. Zvolil jsem připojení typu USB A-B. Osciloskop nastavíme v menu – *Utility* volba *I/O* a zvolíme možnost *Control*. Otevře nabídka připojení, kde zvolíme možnost *USB*.

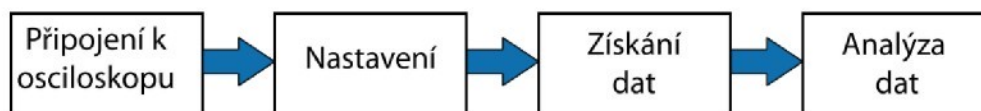
2.5.2 Nastavení počítače pro komunikaci

Pro komunikaci počítače a osciloskopu je potřeba do počítače nainstalovat software Agilent Connection Expert, který je součástí balíku knihoven Agilent IO 15.0. Po jeho naistalování se spustí program *Agilent IO Control* jehož součástí je *Agilent Connection Expert*. Ten po připojení osciloskopu k počítači zařízení rozpozná.

Další součástí knihoven Agilent IO 15.0 jsou VISA knihovny nutné pro komunikaci mezi osciloskopem a rozhraním Matlabu v počítači. U vyšších verzí Matlabu než je verze 7.6, jsem se setkal s problémy s kompatibilitou, a proto doporučuji nainstalovat balík knihoven Agilent 15.5 nebo vyšší.

2.5.3 Program obsluhující osciloskop

Prvním krokem v obslužném programu by mělo být nalezení adresy osciloskopu v počítači a jeho následné připojení se k osciloskopu. Protože je pravděpodobné, že osciloskop byl dříve nastaven do nám neznámého stavu, je vhodné (spíše nutné) ho resetovat a tím dostat osciloskop do továrního nastavení. Poté můžeme osciloskop dále nastavovat podle našeho záměru. Sestavou vhodně zvolených příkazů lze nastavovat všechny funkce osciloskopu.



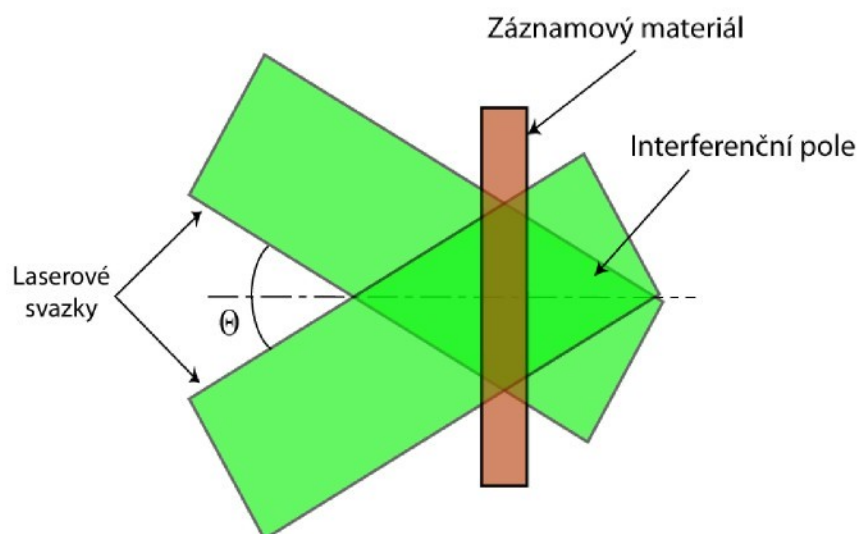
Obrázek 13: Základní struktura programu

Pro podrobnější informace o nastavení osciloskopu a počítače bych zájemce odkázal na moji předchozí práci zabývající se komunikací s osciloskopem [8], kde je připojení a nastavení osciloskopu k počítači podrobně probráno. Jsou zde vysvětleny základní příkazy a možnosti nastavení osciloskopu. Také bych odkázal na manuál k osciloskopu [9].

Původní program, vytvořený v rámci projektu [8] musel být pro využití při měření vlastností záznamového media upraven. Úprava programu spočívala především v potřebě pracovat s dvěma kanály osciloskopu. Proto je nastavení zdvojené pro každý kanál zvlášť, kdyby se změřené průběhy od sebe lišily. Osciloskop neumožňuje přesunout všechna data v jednom okamžiku. Stahování dat z osciloskopu probíhá tedy podle jednoduchého algoritmu. Data se změří současně, poté se zobrazí pouze první kanál. Průběh změřený prvním kanálem se stáhne do počítače a dojde k jeho dekodování a uložení do proměnné. Následně se musí tento kanál vypnout a zobrazit druhý kanál. Ten je také stažen a dekodován jako první. Data jsou poté zobrazena s příslušnou časovou základnou a uložena k dalšímu zpracování. Přepínání kanálů proběhne v programu automaticky.

2.6 Principiální návrh měřícího zařízení

K změření difrakční účinnosti a diferenciálního indexu lomu je třeba vytvořit v polymerním záznamovém mediu difrakční mřížku. Difrakční mřížku s dostatečně malou periodou mřížky vytvoříme záznamem interferenčního pole do polymeru. Interferenční pole vytvoříme překrytím dvou rovinných vln z koherentního zdroje světla, v našem případě laseru pracujícího na vlnové délce 532nm. Toto měřící schéma se používá už řadu let první zmínky lze nalézt v [10].



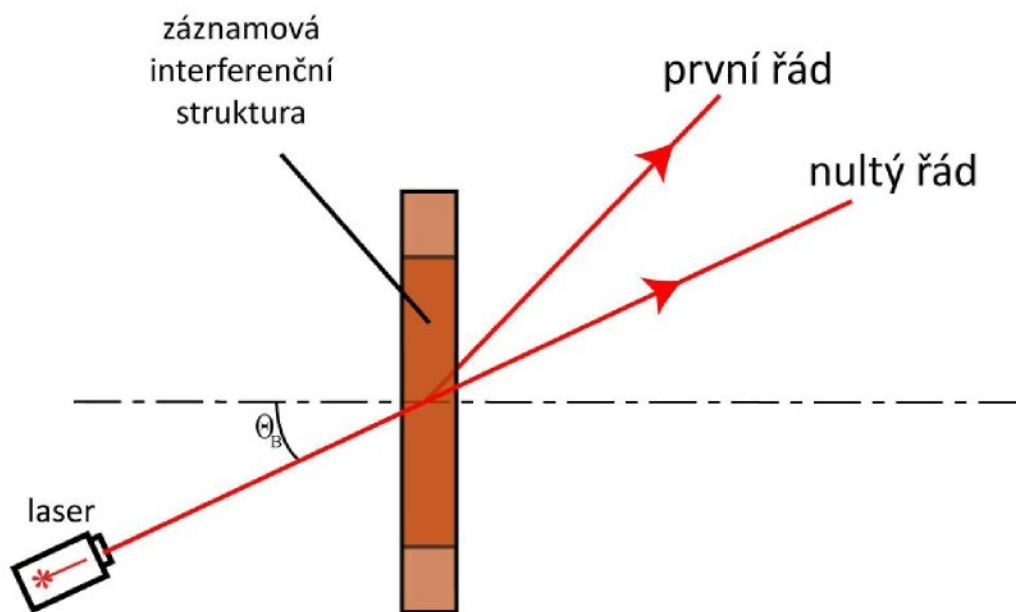
Obrázek 14: Umístění záznamového materiálu do interferenčního pole

Tím získáme interferenční pole s periodou mřížky Λ , kterou určíme z vlnové délky laseru λ a úhlu mezi svazky dopadající na záznamové medium θ . Výsledný vztah pro určení periody mřížky je:

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2\sin(\theta/2)} \quad (2.1)$$

Λ lze označit tedy za vzdálenost dvou interferenčních maxim tedy proužku. Jak je ze vzorce (2.1) vidět tuto vzdálenost můžeme ovlivnit změnou vlnové délky laseru λ nebo změnou úhlu θ . Změna vlnové délky a u použitého laseru není možné. Lépe dosažitelné ovlivnění vzdálenosti interferenčních maxim je změnit úhel dopadajících vln. Perioda závisí nejen na úhlu mezi svazky, ale i na úhlu záznamového materiálu a interferenčního pole.

Sestavené zařízení bude měřit průběh vytváření difrakční struktury v záznamovém mediu. Protože vytvoříme objemovou difrakční mřížku, musí měřící svazek dopadat na mřížku pod daným úhlem. Tento úhel je dán Braggovou podmínkou a označuje se Θ_B . Ta určuje, pod jakým úhlem vstupuje do mřížky měřící svazek tak, aby byl difraktován do prvního řádu s co největší účinností. Fotopolymerní záznamová media jsou citlivé pouze na určité rozmezí vlnových délek. Z tohoto důvodu je nutné použít jako měřící laser takový, který svou vlnovou délkou neexponuje materiál. Nesplněním tohoto požadavku bychom znehodnotili měření exponováním interferenčního pole v bodě měření.



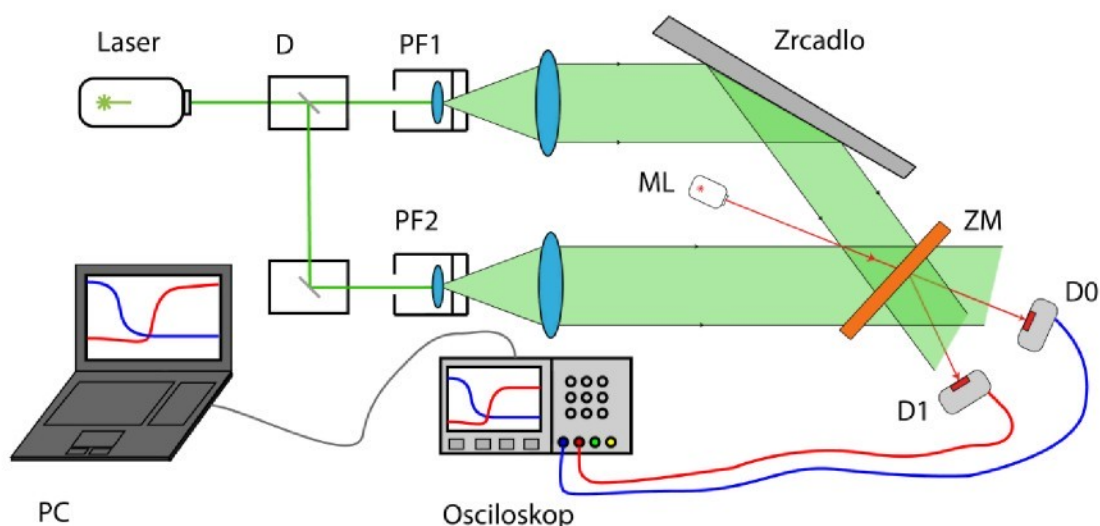
Obrázek 15: Schéma uspořádání měřícího laseru

V místech nultého a hlavně prvního difrakčního řádu jsou umístěny detektory na měření průběhu expozice mřížky. Je nezbytné zajisti k nastavení měřícího laseru tak, aby svazek procházel zaznamenanou mřížkou pod Braggovým úhlem. Může se stát, že by se expoziční svazky nepřekrývaly a vzniklo by tak exponované místo bez mřížky. Tato exponovaná oblast by měřící svazek nedifraktovala.

2.7 Praktické sestavení měřícího zařízení

Zařízení je sestaveno v laboratoři optických metod měření na laboratorním stole speciálně určeném k těmto účelům. Sestavené zařízení lze rozdělit na dvě části. První část je určena na vytvoření interferenčního se zaznamená do polymeru. Na vytvoření interferenčního pole je potřeba svazek laseru rozdělit na dva svazky se stejnou intenzitou. Svazky je potřeba vyfiltrovat prostorovým filtrem a rozšířit tak, aby interferenční pole mělo dostatečnou plochu k zaznamenání na polymer. Prostorový filtr odstraní ze svazku vady zanesené prachem a povrchovými vadami na optických elementech. Prostorový filtr funguje na principu zaostření svazku mikroskopovým objektivem do apertury o velmi malém průměru desítky μm . Tím se odfiltrují vysoké frekvence způsobené rozptylem a difrakcí na nečistotách. Po vyfiltrování je potřeba svazek zkolimovat na požadovaný průměr. Oba svazky jsou rovnoběžné a je potřeba jeden svazek je tedy potřeba zrcadlem vychýlit a tím svazky protnout. Při protínání svazků nás zajímá úhel, pod kterým se svazky protnou. Tímto úhlem určíme frekvenci interferenčního pole. Do tohoto pole se umístí záznamový materiál. A tak v něm

vytvoříme objemovou difrakční mřížku. Druhá část zařízení slouží k průběžnému měření difrakční účinnosti vytvářené mřížky. Měření proběhne druhým laserem, který jak bylo řečeno, svou vlnovou délkou neovlivní expozici materiálu. Měřicí svazek je nastaven, aby vstupoval pod Braggovým úhlem do mřížky, aby bylo dosaženo maximální difrakční účinnosti. Na začátku měření, kdy ještě není exponovaná mřížka, prochází svazek bez změny a nedetekován detektorem D0. Jak bude probíhat vytváření difrakční mřížky, začne se část světla difraktovat do prvního difrakčního řádu, kde bude detekován detektorem D1. Současně začne klesat intenzita na detektoru D0. Průběh změny intenzit světla je zaznamenán na osciloskop.



Obrázek 16: Schéma uspořádání pro měření vlastností fotopolymerních záznamových materiálů

Na obrázku 16 je D – dělič, PF1 – prostorový filtr prvního svazku, PF2 - prostorový filtr druhého svazku, ML – měřicí červený laser, ZM – záznamový materiál, D0 – měřicí dioda (přímý svazek), D1 – měřicí dioda (difraktovaný svazek).

Oba svazky budou detekovány detektory DET100A/M. Difrakční účinnost η je pak určena jako poměr výkonu difraktovaného svazku P_D (detektor D1) a výkonu procházejícího svazku P_P (detektor D0):

$$\eta = \frac{P_D}{P_P} = \sin^2 \frac{\pi n_1 d}{\lambda \cos \Theta_B} \quad (2.2)$$

kde d je tloušťka materiálu, λ vlnová délka měřicího laseru, Θ_B je Braggův úhel.

2.7.1 Měření vlastností fotopolymerních záznamových struktur

Cílem navrhovaného zařízení je měřit průběhy výkonů difrakčních řádů v závislosti na expozici difrakční mřížky v materiálu. Samovyvolávací schopnost fotopolymerů umožňuje tuto závislost měřit v reálném čase. Zařízení umožňuje nastavovat expoziční parametry:

- dobu expozice
- celková intenzita světla ($I_D + I_P$)
- prostorová perioda interferenčního pole Λ
- poměr jednotlivých svazků, ovlivňuje kontrast interferenčních proužků

3. Experimentální měření

3.1 Reálné měřicí zařízení

Na obrázku 17 je fotografie sestaveného měřicího zařízení v laboratoři LOMM. Při exponování záznamového materiálu se využívá diodou čerpaný pevnolátkový laser Nd^{3+} :YAG laser (L) pracující na vlnové délce 532nm. Za laserem je umístěná elektromechanická závěrka laseru (EZ). Dělič (D) rozděluje laserový svazek na dva k sobě kolmé svazky. Dělič umožňuje také nastavovat intenzitu každém svazku, my máme nastavenou přibližně 1:1. Po rozdělení svazku jsou oba svazky filtrovány a rozšířeny prostorovým filtrem (PF1, PF2) a následně zkolimovány kolimačními objektivy (KC1, KC2). Zrcadlem (Z) je jeden svazek odražen a nasměrován tak, aby se s druhým svazkem protnul v místě, kde je umístěno záznamové médium. V místě protnutí svazků se vytvoří harmonické interferenční pole s periodou mřížky danou rovnicí (2.1). Do tohoto interferenčního pole se umístí záznamový materiál (ZM) tak, aby povrch materiálu byl kolmo k interferenční struktuře pole. Zařízení umožňuje tento úhel měnit. Tato část zařízení zaznamená objemovou fázovou difrakční mřížku. Velikost interferenčního pole lze zmenšit zcloněním obou svazků na požadovaný průměr. V případě měření prezentovaného v této práci je průměr svazku jeden až dva centimetry, aby bylo možné na jeden vorek záznamového materiálu zaznamenat více měření.



Obrázek 17: Sestavené měřicí zařízení: L – laser, EZ – elektronická závěrka, D – dělič, PF – prostorové filtry, KC – kolimační čočky, Z – zrcadla, O – osciloskop, PC – počítač, D0, D1 - detektory

Měřicí část zařízení (Obrázek 18) zaznamená průběh expozice sestaveného experimentálního zařízení sestávajícího se z laserové měřicí diody (ML) a fotodetektorů (D0, D1). Laserová dioda vyzařuje úzký kolimovaný svazek světla o vlnové délce 650nm s maximálním výkonem 5mW. Laserový svazek, který bude za záznamovým materiálem měřen detektory DET100A/M, detektor v přímém směru D0 měří výkon svazku v nultém difrakčním řádu mřížky, detektor D1 měří výkon prvního difrakčního řádu. Oba detektory jsou připojeny na osciloskop (O) na, kterém je zobrazený průběh změny intenzit změřených detektory D0 a D1. Výkon ovlivňuje vytvářející se mřížka v polymeru. Jak se exponuje mřížka v polymeru, zvyšuje se difrakční účinnost a stoupá tak výkon změřený detektorem D1. Po změření průběhů jsou data stažena do programu v počítači (PC) a následně zpracována nebo uložena k dalšímu zpracování.

Tabulka 3: Použité komponenty měřicího zařízení

Komponenta	Základní parametry
Laser	Coherent Compass 315M $\lambda = 532\text{nm}$
Laserová dioda	Max výkon 5mW, $\lambda = 650\text{nm}$
Sada držáků, tyček a pravých úhlů	Thorlabs průměr ½" metrický závit
Mechanická závěrka laseru	Thorlabs SH05
Dělič	Thorlabs
Prostorové filtry	PF1 objektiv 40x apertura $\phi=20\mu\text{m}$ PF2 objektiv 40x apertura $\phi=30\mu\text{m}$
Kolimační čočky	D1=400mm D2=250mm
Detektory	Thorlabs DET100A/M
Osciloskop	Agilent Technologies DSO7034A
I/O knihovny	Verze 15.5.12824.0
Matlab	Verze 7.9.0.529

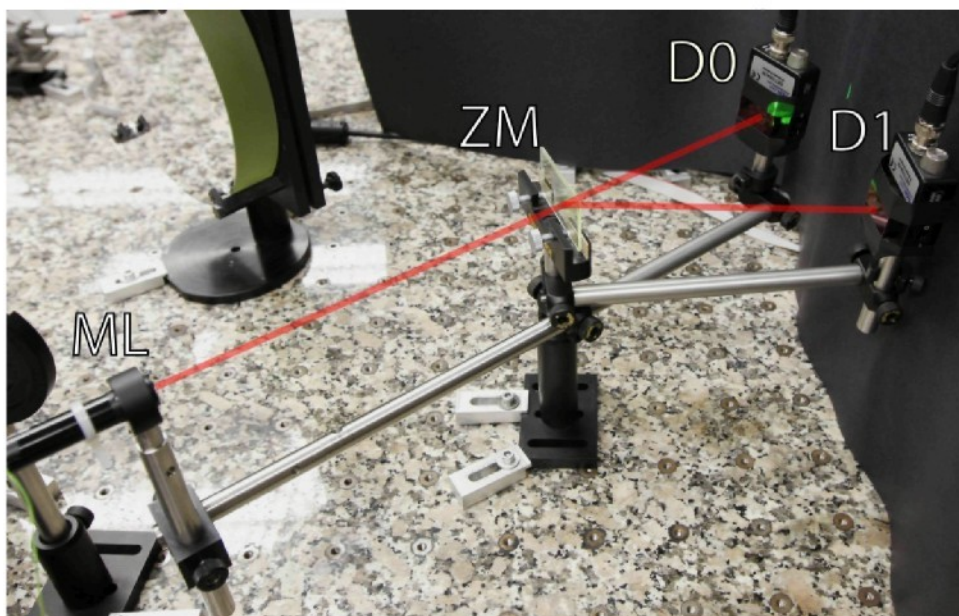
3.2 Nastavení měření

Před samotným měřením parametrů materiálu je nezbytné zařízení správně nastavit. Než přistoupíme k vytvoření mřížky je potřeba zajistit úhel protínajících se svazků vytvářející interferenční pole, abychom mohli spočítat z rovnice (2.1) periodu mřížky. Pro dosažení vysokého kontrastu interferenčního pole je nutné zajistit stejnou polarizaci svazků se stejnou intenzitou. Intenzitu jednotlivých svazků ovlivníme na

výstupu děliče (D). Dobu pro vytvoření mřížky je nutné nastavit na ovládání elektromechanické uzávěrky laseru a i v obslužném programu osciloskopu. Dobu určíme z citlivosti materiálu, a pokud tuto hodnotu neznáme, určíme ji odhadem z testovacího měření.

Difrakční účinnost objemových difrakčních mřížek závisí na úhlu pod, kterým vstupuje měřicího svazku. Měřicí laserová dioda (ML) musí vyzařovat záření pod Braggovým úhlem do mřížky. Braggův úhel Θ_B udává, při jakém úhlu bude difrakční účinnost prvního řádu nejvyšší. Tento úhel lze teoreticky vypočítat z rovnice (2.1), kde λ_{ML} je vlnová délka měřicího laseru a Λ je perioda vytvořené mřížky:

$$\Theta_B = \arcsin \frac{\lambda_{ML}}{2\Lambda} \quad (3.1)$$



Obrázek 18: Měřicí část zařízení: ML – měřicí laser, ZM – záznamový materiál, D0, D1 - detektory

Konkrétní příklad nastavení zařízení jsem nastavil úhel protínajících svazku na $\theta = 30^\circ$ při použité vlnové délce laserových svazků 532nm. Po dosazení do vzorce (2.1) vyjde perioda vytvořené difrakční mřížky $\Lambda_{MR} = 1.0277\mu m$. Když známe periodu mřížky, můžeme určit Braggův úhel pro měřicí laserový svazek. Vlnová délka laserové diody je daná s přesností na 10nm ($\lambda_{ML} = 650 \pm 10nm$) je přesnější vypočítat z rovnice (3.1) rozmezí Braggova úhlu, $\Theta_B = \langle 18,1^\circ, 18,7^\circ \rangle$. Při sestavování zařízení je

vhodné brát tento úhel jako orientační tak, abychom znali polohu laserové diody. Přesné nastavení Braggova úhlu doporučuji provést následujícím způsobem:

1. Umístit záznamový materiál kolmo k interferenčnímu poli.
2. V materiálu vytvořit objemovou difrakční mřížku.
3. Spustit červenou diodu (ML) pod nastaveným úhlem a umístit za záznamový materiál stínítko.
4. Pokud jsme nastavili vše správně, laserový svazek se difraktuje a na stínítku pozorujeme nultý a první řád difrakce.
5. Mírným vychýlením Braggova úhlu pozorujeme změnu intenzity prvního difrakčního řádu. Difraktovaný svazek mění svou intenzitu podle tak zvané selektivní křivky.
6. Úhel nastavíme tak abychom na stínítku pozorovali nejvyšší intenzitu svazku. Tím jsme dosáhli ideálního fázového synchronizmu a difrakční nejvyšší účinnosti.
7. Do tohoto místa umístíme druhý detektor D1
8. Po tomto nastavení, lze ještě optimalizovat polohu připojením osciloskopu a nalezením maximálního výkonu.

3.3 Měření a záznam dat

Když je zařízení připraveno k měření, je potřeba fotopolymerní záznamové medium umístit do připraveného držáku. Polymer je citlivý především na zelenou složku světla. Z důvodu expozice materiálu je doporučeno pracovat při červeném osvětlení laboratoře. Když je zařízení nastaveno, je navíc vhodné překontrolovat nastavení programu v Matlabu pro komunikaci s osciloskopem. Je-li komunikace mezi osciloskopem a počítačem v pořádku, poté stačí nastavit dobu měření a napětový rozsah obou kanálů, na kterých budeme měřit.

3.3.1 Popis obslužného programu osciloskopu

Nastavení osciloskopu a počítače bylo probráno v kapitole 2.5. Zde bude popsán základní princip programu získávajícího data z osciloskopu. Na obrázku 13 je blokové schéma programu pro stažení dat z osciloskopu.

Jako první krok je nutné nastavit adresu zařízení získanou z Agilent Connection Expertu. Pokud nemáme k počítači pomocí tohoto programu připojených více zařízení,

nachází se naše zařízení na prvním místě seznamu VISA knihoven. Příklad nalezení osciloskopu:

```
dso=visa('agilent','USB0::0x0957::0x1735::MY48150015::0::INSTR')
find=INSTRFIND;
osc=find(1)
```

Zadávání příkazu a čtení dat z osciloskopu probíhá příkazy `fprintf` a `fscanf`. První po připojení komunikace je vhodné provést reset osciloskopu. Reset vymaže uložená data a přepne osciloskop do základního nastavení.

Syntaxe příkazu: `fprintf(osc, '*RST');`

Dále je možné na osciloskopu nastavit časovou základnu, napěťový rozsah kanálu offset.

Nastavení časové základny: `fprintf(osc, ':TIMEbase:RANGe 30')`

Nastavení napěťový rozsah kanálu: `fprintf(osc, ':CHANnel1:RANGe 20')`

Nastavení offsetu daného kanálu: `fprintf(osc, ':CHANnel1:OFFSet 0')`

Pro práci s jiným kanálem stačí v příkazu změnit číslo kanálu na požadovaný kanál: `fprintf(osc, ':CHANnel2: RANGe 20')`

Při komunikaci lze nastavit formát, ve kterém bude osciloskop změřená data posílat. Na výběr je z `BYTE`, `WORD` a `ASCII`. V případě komunikace s Matlabem se osvědčilo použít `ASCII`, protože v Matlabu se velice dobře pracuje s textovými řetězci.

Syntaxe příkazu: `fprintf(osc, ':WAVEform:FORMat ASCII');`

Pro spuštění měření používám příkaz: `SINGLE`, tím se spustí jedno měření po dobu nastavenou příkazem: `TIMERange`. Po změření dat se data je potřeba data po jednotlivých průbězích stáhnout.

Syntaxe stažení dat:

```
fprintf(osc, ':WAVEFORM:SOURCE CHAN1')
fprintf(osc, ':WAVEform:DATA?');
data=fscanf(osc);
```

Počet nás.
číslic

Počet přenesených dat

Poslaná data

#800012999 -9.53125e+00, -9.53125e+00, -9.37500e+00, ,

Obrázek 19: Podoba poslaných dat z osciloskopu

Protože jsou data poslána jako textový řetězec, je potřeba je dekodovat a uložit jako vektor. Data dekodují překontrolováním celého řetězce dat cyklem od úvodní hlavičky až po jeho konec. Cyklus kontroluje řetězec znak po znaku a při nalezení čárky, ji smaže a číslo uloží. Výsledkem je vektor čísel. Stáhnout a dekodovat je potřeba oba změřené průběhy.

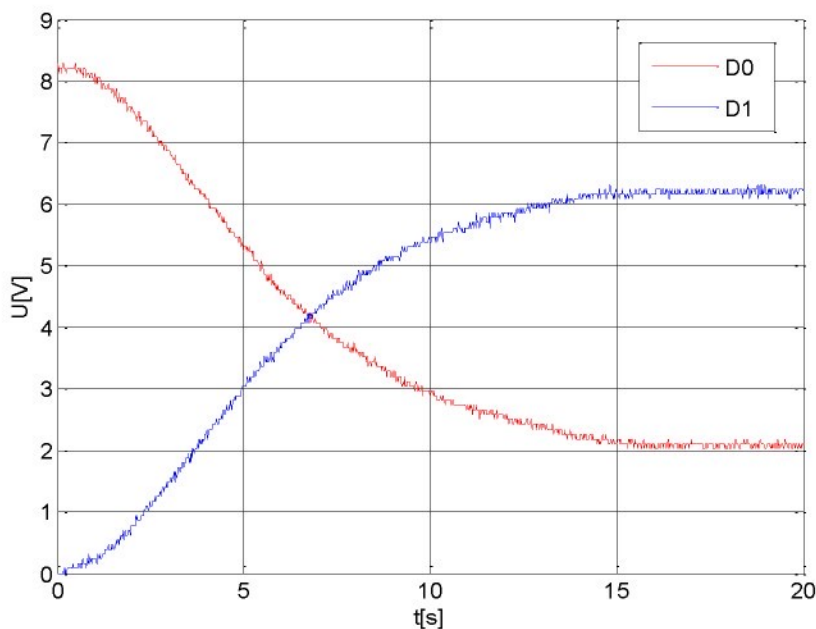
Pro podrobnější informace o příkazech VISA knihovny pro osciloskop bych odkázal na manuál k osciloskopu [9]. Příkazy a program potřebné pro naše účely jsou také podrobně probrány v moji předešlé práci [8].

3.3.2 Příklad průběhu měření

Po připravení materiálu, měřícího zařízení včetně počítače a nastavení času expozice elektromechanické závěrky laseru je možné provést první měření. Spuštěním programu v Matlabu se nastaví osciloskop do požadovaného stavu a ozve se akustický tón. Pět sekund po tomto tónu se ozve další tón, při kterém se spustí měření. Akustické tóny jsem volil z důvodu usnadnění obsluhy zařízení, protože se celé měření probíhá potmě a také z důvodu přesného spuštění měření. Pětisekundová pauza slouží k přesunu od počítače k ovládání elektromechanické závěrky laseru. Po uplynutí nastaveného času, v mém případě 30s, se data z osciloskopu automaticky stáhnou do počítače, uloží a zobrazí.

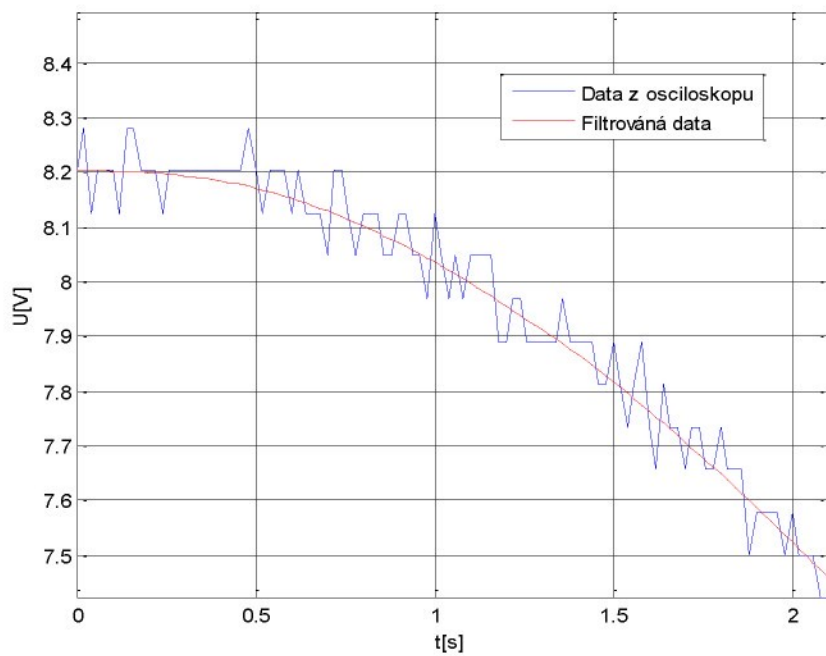
První měření slouží k vytvoření mřížky a zkontrolování nastavení úhlu měřícího svazku. Změnou Braggova úhlu dosáhneme nejvyšší difrakční účinnosti podle postupu popsáno v kapitole 3.2. Laser a detektory pevně zafixujeme a vyměníme záznamový materiál nebo posuneme do místa, kde nebyla exponovaná mřížka. Takto lze provést více měření na jenom materiálu. Při opakovaném měření jedné struktury dochází k osvětlení okolního materiálu. Této expozici lze zabránit částečným zakrytím materiálu.

Moje měření bylo nastaveno s následujícími parametry: úhel mezi svazky $\theta = 30^\circ$, vlnová délka laseru $\lambda = 532nm$, intenzita jednotlivých svazků $I_1 = 600 \mu W$ a $I_2 = 490 \mu W$. Měřicí laser $\lambda \sim 650nm$ s výkonem sníženým na $I = 150 \mu W$.

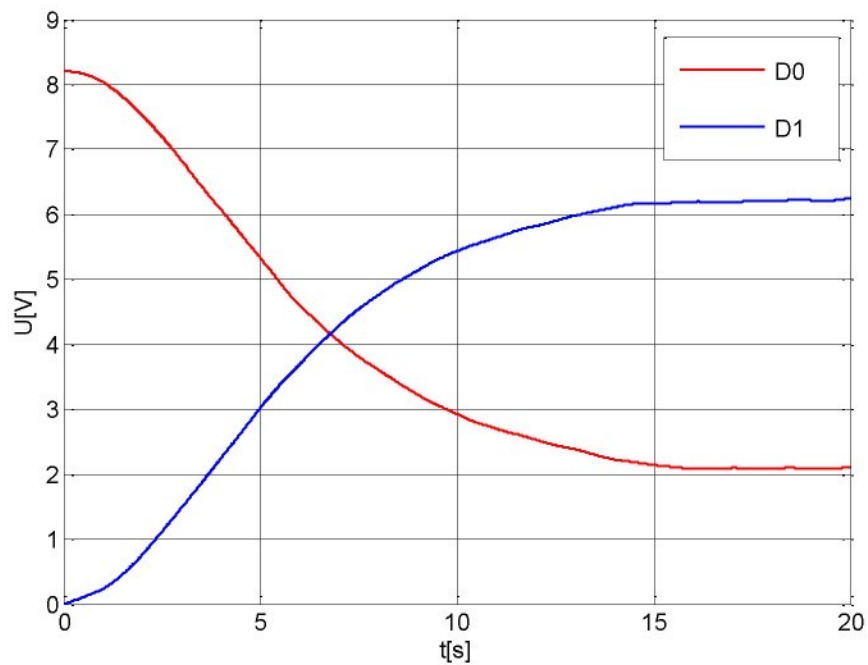


Obrázek 20: Průběhy expozice polymeru PVA/AA

Na obrázku 20 jsou zobrazeny průběhy expozice difrakční mřížky ve fotopolymeru PVA/AA. Červený průběh znázorňuje pokles intenzity na detektoru D0 měřící v přímém směru nultý difrakční řád a modrý průběh znázorňuje nárůst intenzity v prvním difrakčním řádu na detektoru D1. Signál je zašumněný vlivem převodu analogového signálu na digitální v místech, kde signál překonává rozhodovací úroveň převodníku. Pro možnost dalšího zpracování změřených průběhů je vhodné data z osciloskopu ještě vyfiltrovat a tak průběh vyhladit. Průběhy jsou vyfiltrovány v Matlabu filtrem `filtfilt(B,A,data)` tento konvoluční filtr má tu výhodu že data filtruje od začátku do konce a zpět a tím neprodlužuje datový vektor jako jiné filtry. Porovnání nevyfiltrovaného signálu a vyfiltrovaného je zobrazeno na obr. 21 a na obr. 22 jsou potom vyfiltrované signály.

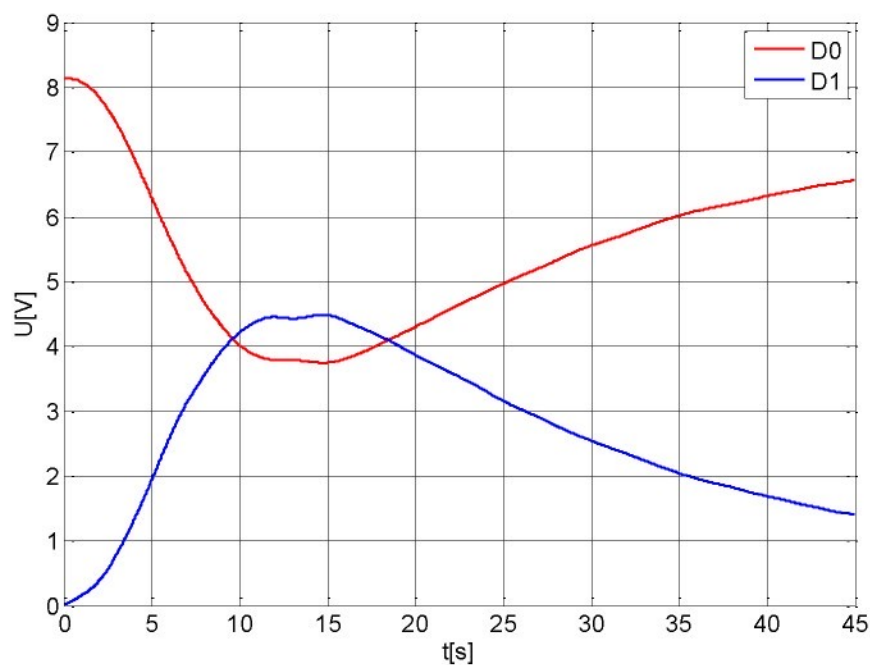


Obrázek 21: Porovnání nevyfiltrovaného a vyfiltrovaného průběhu



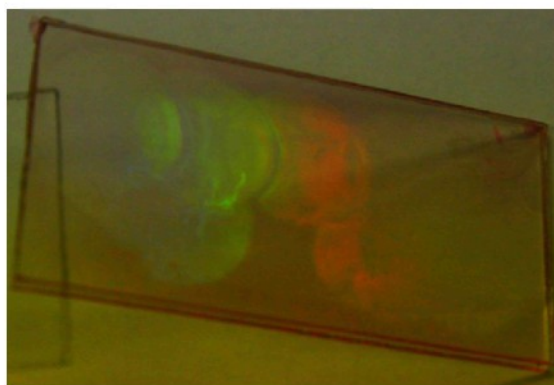
Obrázek 22: Vyfiltrované průběhy expozice

Po nastavení příliš dlouhé doby expozice dojde k přemodulování difrakční mřížky, a i když pokračuje modulace indexu lomu, klesá difrakční účinnost.



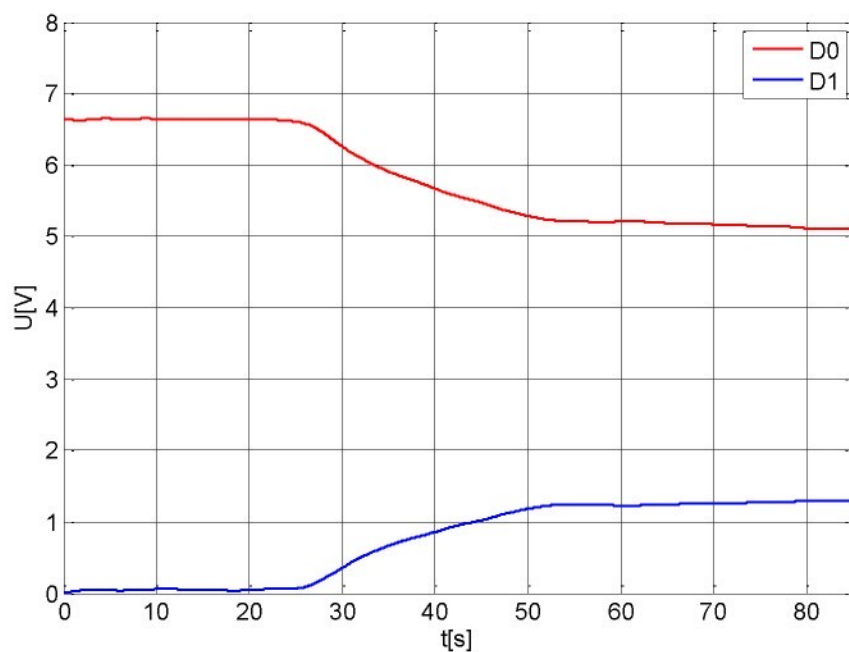
Obrázek 23: Přexponovaný materiál PVA/AA

Na obrázku 24 je vyfocen záznamový materiál s vytvořenou difrakční mřížkou. Je vidět jak difrakční mřížka rozkládá bílé světlo.



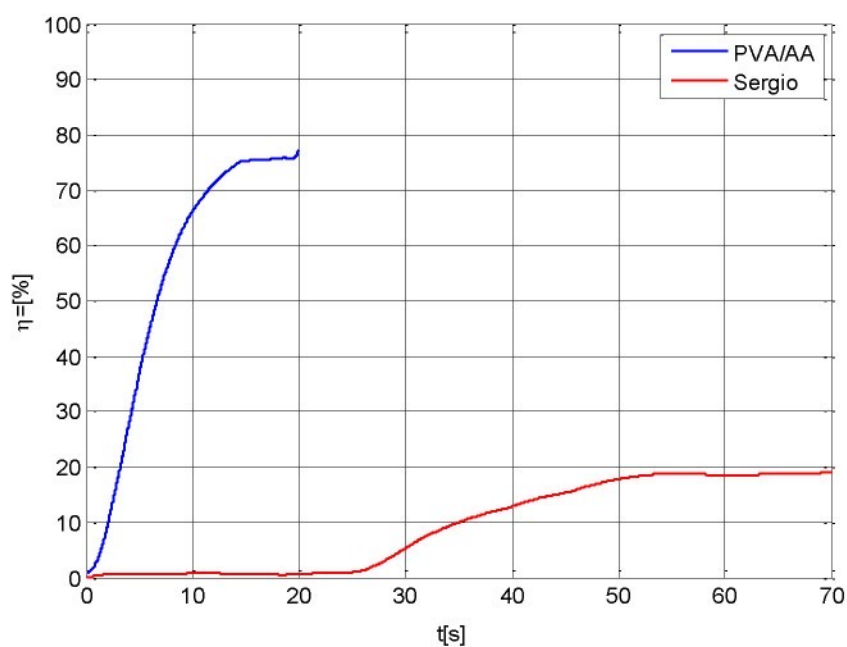
Obrázek 24: Ukázka vytvořené difrakční mřížky v materiálu PVA/AA

Další měřený materiál byl připraven Ing. Milanem Květoňem, Ph.D na katedře fyzikální elektroniky FJFI, ze základního materiálu od Dr. Sergio Oliviera. Jak je vidět z následujícího grafu (Obrázek 25) byl tento polymer mnohem méně citlivý než první měřený polymer. Proto při stejném nastavení měřicího zařízení byla prodloužena expoziční doba na 90s.



Obrázek 25: Průběhy expozice materiálu od Dr. Sergio Granados-Focil

Na následujícím grafu (Obrázek 26) jsou uvedené změřené difrakční účinnosti materiálu PVA/AA a materiálu Sergio. Oba materiály jsou měřeny na stejné nastaveném zařízení pouze s upravenou délkou expozice tak, aby bylo možné oba materiály názorně porovnat. Je vidět, že první materiál dosáhne přibližně difrakční účinnosti $\eta = 75\%$ po 20 sekundách.



Obrázek 26: Porovnání změřených účinností

Shrnutí vlastností zařízení

Sestavené měřicí zřízení lze rozdělit na dvě části, část expoziční a část detekční. Expoziční část vytváří záznamovým laserem s vlnovou délkou, na kterou je materiál citlivý, interferenční pole. Interferenční pole je zaznamenáno do polymeru a tak se vytvoří difrakční mřížka. V detekční části se laserem s vlnovou délkou, na kterou není polymer citlivý, a detektory měří průběh difrakční účinnosti vytvořené mřížky v reálném čase. Detektory měří intenzitu svazku v nultém a prvním difrakčním řádu. Jak se exponuje mřížka v materiálu, klesá intenzita nultého řádu a stoupá intenzita v prvním difrakčním řádu. Tyto průběhy jsou zaznamenány osciloskopem. Přepočtem se z nich získá růstová křivka difrakční účinnosti, která slouží k porovnávání materiálů a vlivů expozičních parametrů.

Při sestavování a prvních testech zařízení jsem narazil na několik problémů, které bylo potřeba vyřešit pro správný chod zařízení:

- Prvním problémem bylo, že po nastavení měřicího laseru a detektorů do jednoho detektoru mířil přímo jeden ze svazků vytvářející interferenční pole. Tento svazek byl detekován a informace o intenzitě červeného laseru zkeslena. Detekce zeleného laseru bylo zamezeno umístěním filtru před detektor. Jedná se o absorpční filtr s maximem absorpce na $\lambda = 538\text{nm}$ což postačuje pro odfiltrování záření s vlnovou délkou $\lambda = 532\text{nm}$. Z důvodu detekce okolního zeleného záření byl filtrem vybaven druhý detektor.
- Dalším problémem byla detekce červeného laseru. Po vytvoření difrakční mřížky se předpokládaná změna intenzity neprojevila. Důvodem byl příliš veliký výkon měřicího laseru, kdy detektor byl zasaturovan na maximální hodnotě a i po snížení intenzity vlivem difrakce, byla tato intenzita příliš velká a oba detektory byly zasaturovány. Výkon diody byl snížen připojením externího zdroje a změnou napájecího napětí bylo dosaženo snížení výkonu z 5mW na $100\mu\text{W}$. Tento světelný výkon postačil ke změření změny intenzity.
- Kvůli nízké citlivosti materiálu byla nastavena dlouhá doba expozice. Program pracující s osciloskopem byl testován na průběhy o délce

maximálně 10s. Při nastavení delšího času nastal problém s vypršením platnosti dotazu na stažení dat z osciloskopu. Proto jsem do programu vložil pauzu mezi spuštění měření a stažení dat. Metodou postupného testování, byla nastavena pauza dlouhá dvakrát delší, než je samotné měření.

Na zařízení bylo provedeno několik měření různých materiálů. Na základě zkušeností získaných z těchto měření bych navrhoval pro zlepšení funkce měřícího zařízení:

- Vybavit uchycení záznamového materiálu stínítkem, aby při dlouhých expozičních časech, nedocházelo k naexponování okolního materiálu.
- Propojit ovládací panel elektromechanické závěrky laseru s osciloskopem a pomocí nastavení triggru spouštět celý proces měření najednou. Nebo nejlepším řešením by bylo ovládání uzávěrky přímo z počítače, to bohužel náš použitý model závěrky neumožňoval.
- Vybavit zařízení vyhodnocovacím programem změřených průběhů. Úkolem práce byl návrh a realizace zařízení.

Závěr

Cílem této práce bylo vytvořit metodu pro měření vlastností záznamových struktur. Seznámit se s teorií objemových fázových difrakčních mřížek a s materiály používaných v holografické interferometrii především s důrazem na fotopolymerní materiály. Na základě těchto znalostí navrhnout a realizovat měřicí zařízení.

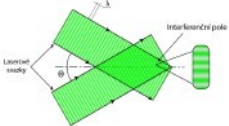
V práci byla teoreticky studována nezbytná teorie difrakčních mřížek a základní typy záznamových materiálů využívaných v holografické interferometrii. Fotopolymerní záznamové materiály byly probrány důkladněji a vysvětlen princip záznamu. Samovyvolávací schopnost umožnila měření růstové křivky difrakční účinnosti v reálném čase. Zařízení využívá fyzikální principy interference a difrakce. Zařízení bylo sestaveno podle návrhu v laboratoři optických metod měření na fakultě mechatroniky, informatiky a mezioborových studií. Zařízení měří průběhy intenzity nultého a prvního difrakčního řádu exponované difrakční mřížky ve fotopolymeru. Tyto průběhy jsou zobrazeny na osciloskopu. K osciloskopu je připojen počítač, pro který je speciálně vyvinutý program, v programovacím prostředí Matlab, pro ovládání osciloskopu. Mezi funkce programu patří navázání komunikace s osciloskopem, nastavení požadovaných parametrů osciloskopu a po dokončení měření data exportovat do počítače. Data jsou programem uložena, aby nedošlo k jejich ztrátě a bylo možné s nimi dále pracovat. Využití programu pracujícího s osciloskopem zlepšuje obsluhu zařízení a vede k snadnější opakovatelnosti měření. Mezi výhody sestaveného zařízení patří možnost měnit úhel svazků vytvářející interferenční pole. Další nespornou výhodou oproti jiným zařízením a také zařízením je, že umožňuje měnit nastavení mezi interferenčním polem a záznamovým materiálem.

Na zařízení bylo provedeno několik měření různých fotopolymerních záznamových materiálů s velice dobrými výsledky. Zařízení zobrazuje v reálném čase nárůst difrakční účinnosti a po dokončení měření jsou průběhy uloženy v počítači pro další zpracování. Práce byla napsána tak, aby čtenáři poskytla potřebné vědomosti o měření fotopolymerů a funkci měřicího zařízení. Věřím, že tato diplomová práce přispěje k dalšímu zkoumání a vývoji fotopolymerních záznamových struktur v laboratoři optických metod měření.

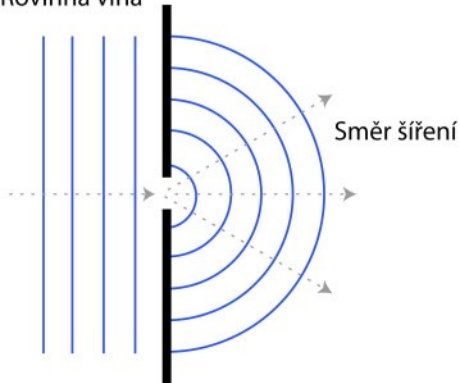
Citovaná literatura

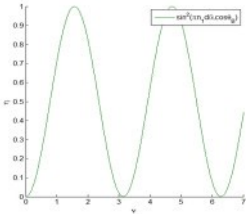
- [1] PAVEL FIALA, I., R. *Fyzikální optika*, 2nd ed. ČVUT, 2005. 208 s. ISBN 80-01-03183-7.
- [2] MILER, M. *Úvod do difrakční optiky*. ÚŘE AVČR, 2006. 93 s. ISBN 80-86269-14-0.
- [3] *www.hologramsuppliers.com: Holograms suppliers* [online]. [cit. 16-3-2010]. Dostupné z WWW: <<http://www.hologramsuppliers.com/types-of-hologram.html>>
- [4] S. MARTIN, C. A. FEELY and V. TOAL. Holographic recording characteristics of an acrylamide-based photopolymer, *Applied Optics*, 1997. 36:5757-5768.
- [5] W.JUEPTNER, U., S. *Digital holography*. Springer, 2005 . 165 s. ISBN 3-540-21934-X.
- [6] KREIS, T. *Handbook of Holographic Interferometric*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005. 547 s. ISBN 3-527-40546-1.
- [7] *Thorlabs: www.thorlabs.com* [online]. [cit. 14-4-2010]. Dostupné z WWW: <http://www.thorlabs.com/NewGroupPage9.cfm?ObjectGroup_ID=1295>
- [8] MAREK, L., *Komunikace a přenos dat mezi osciloskopem a PC v programovacím prostředí Matlab*, TUL Projekt, 2009.
- [9] 2008, Ed. *Agilent InfiniiVision 7000 Series Oscilloscopes: Programmer's Guide*. Agilent Technologies, 2008. 872 s. [online]. Dostupné z WWW: <www.agilent.com>
- [10] A. FIMIA, N. L. M. New photopolymer used as a holographic recording material, *Applied Optics*, s. 2, červen 1993.
- [11] M.MILER *Fyzika a holografické difrakční struktury*. Praha. 1988. 146 s. ISBN 57-566-88.

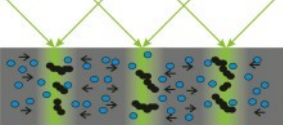
- [12] LÉDL, V., Fotopolymerní záznamová media pro využití v holografické interferometrii, TUL Dizertační práce, 2009.
- [13] KVĚTOŇ, M., Acrylamide-based photopolymer for optical holography, CVUT Dizertační práce, 2008.



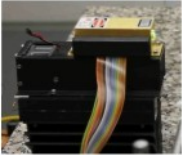
Rovinná vlna







● monomer Polymer



Připojení k
osciloskopu



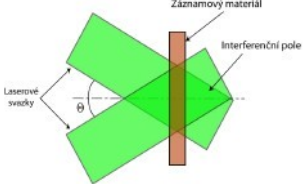
Nastavení

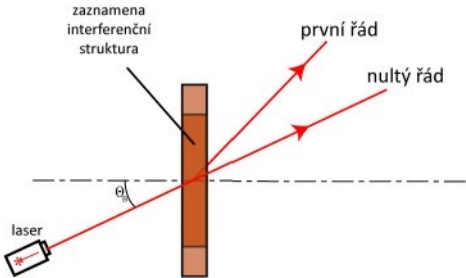


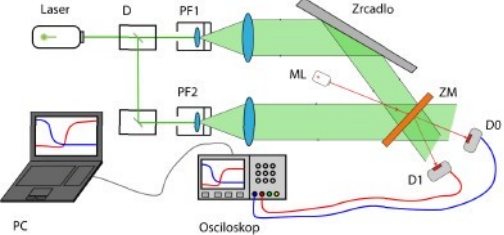
Získání
dat



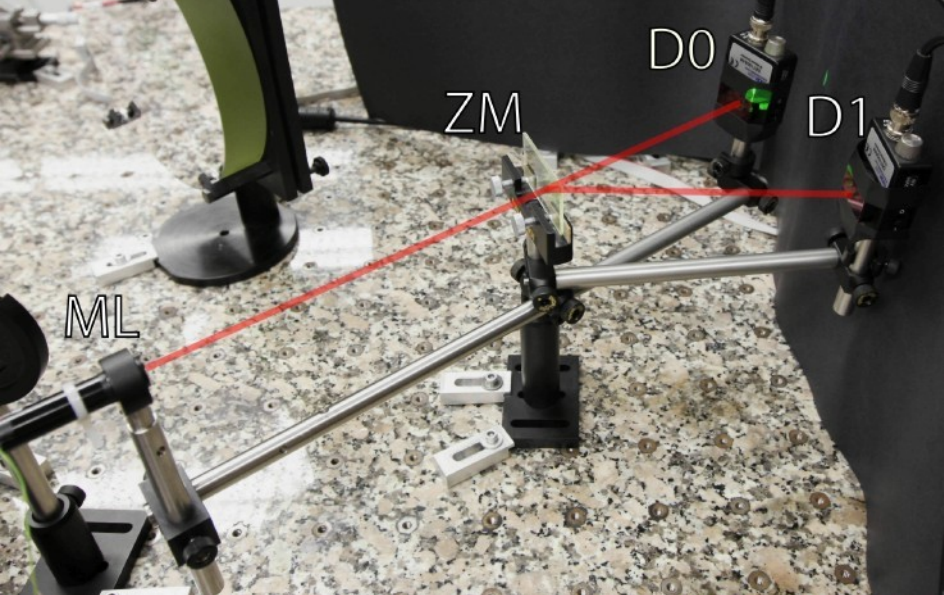
Analýza
dat



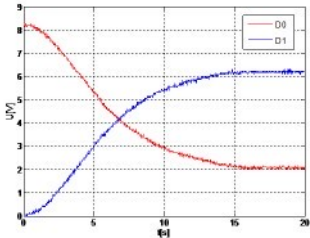


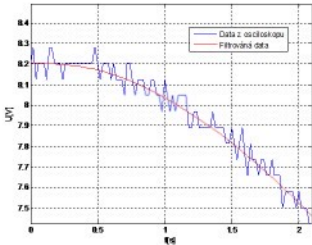


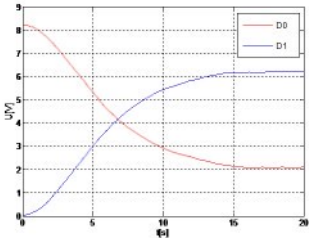


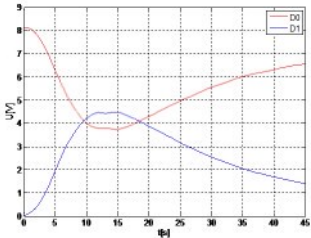


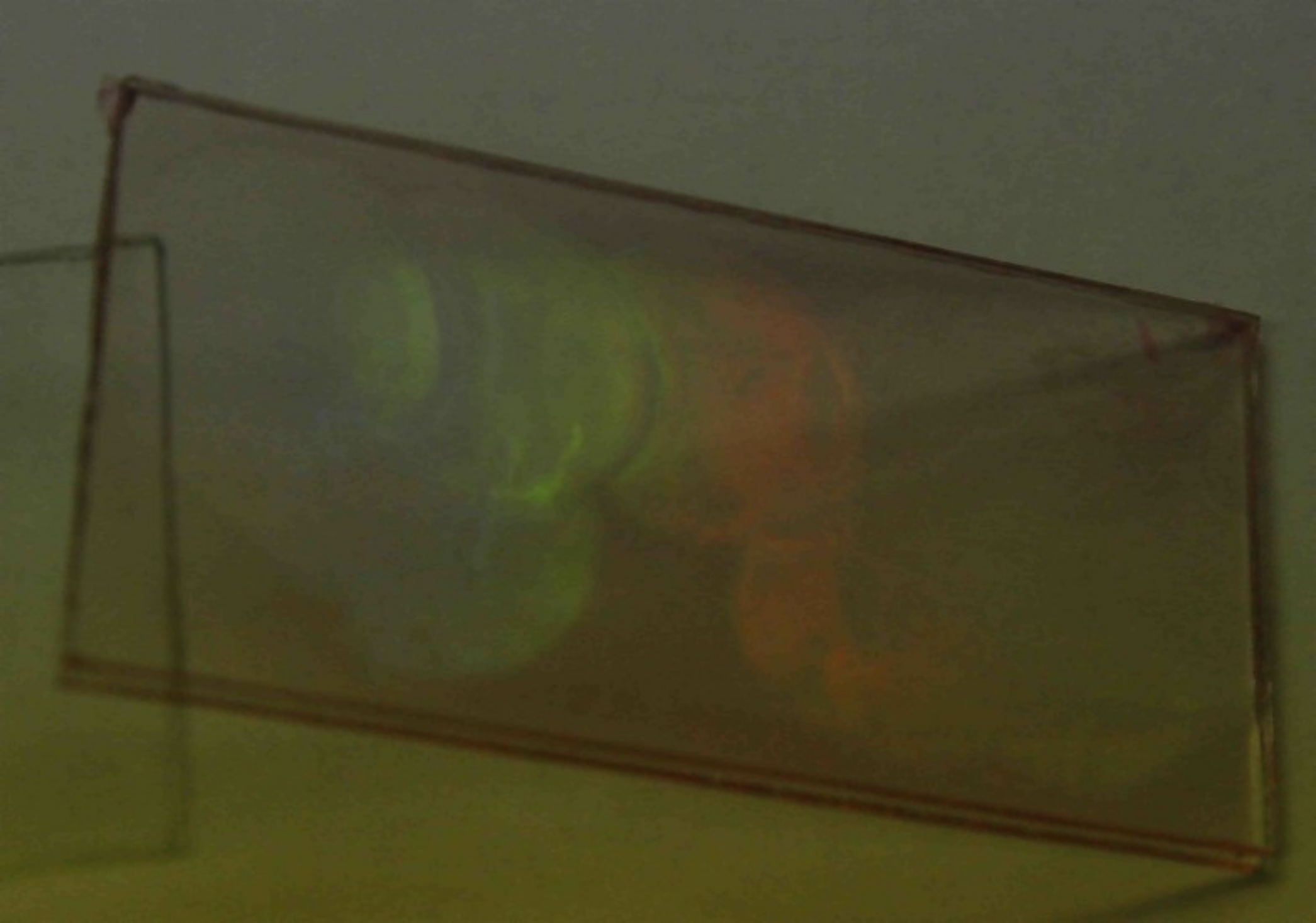
Project data	Project data
End no	
XXXXXXXXXXXX	-0.0000000000, -0.0000000000, -0.0000000000, , , , ,
Project photograph data	

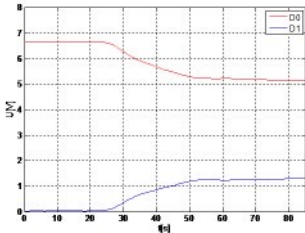


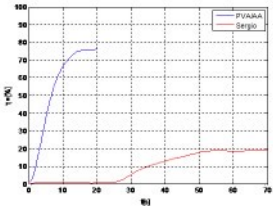


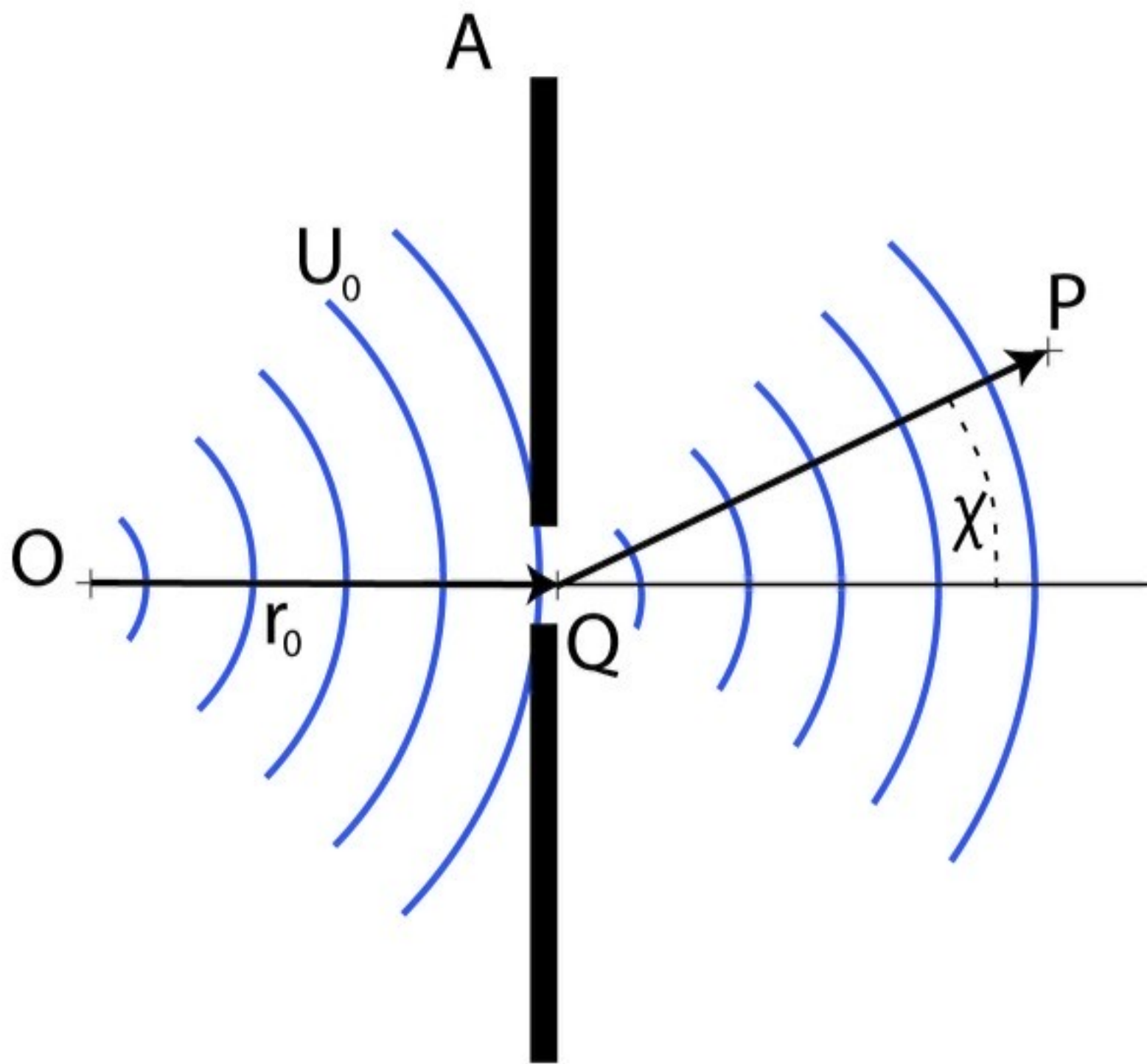


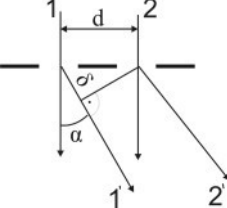


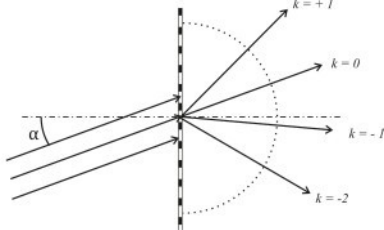




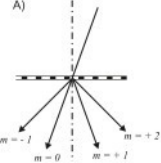




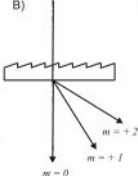




A)

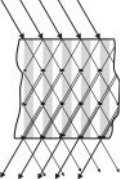


B)



C)





Dopadající záření

Načítání dílčích
příspěvků od period
mřížky

Vystupující záření

