

**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ
FAKULTA
Univerzita Karlova**

STUDENTSKÝ PROJEKT

Bc. Michal Ciesla

Chromatická holografie

Katedra chemické fyziky a optiky

Vedoucí studentského projektu: RNDr. Eva Schmoranzerová, PhD.

Konzultant: Mgr. Zeynab Sadeghi

Praha 2023

Obsah

Úvod	2
1 Výchozí stav a experimenty	3
1.1 Původní uspořádání	3
1.2 Návrh nového uspořádání	4
1.3 Úskalí laserových diod	6
1.3.1 Chování „negaussovských“ svazků	6
1.4 Vliv úhlu dopadu na holografickou desku	10
2 Optická část	11
2.1 Experimentální uspořádání	11
2.2 Holografické desky	15
2.3 Výroba hologramů	15
2.3.1 Reflexní hologramy	16
2.3.2 Transmisní hologramy	17
2.4 Náměty na zlepšení	17
3 Elektronická část	19
3.1 Ovládací panel	19
3.2 Napájení laserů	19
3.3 Dosvětlovací LED	19
3.4 Externí laser	19
4 Softwarová část	20
4.1 Řídící mikrokontroler	20
4.1.1 Časování	20
4.1.2 Komunikace	20
4.2 Uživatelské ovládací prostředí	20
Závěr	21

Úvod

Holografie je metodou zachycení a reprodukce obrazu, která narozdíl od *fotografie* nezachycuje výsledný dvourozměrný obraz, nýbrž původní předmětovou vlnu světla. Díky tomu umožňují hologramy reprodukovat zaznamenaný objekt v jeho trojrozměrné podobě, tj. lze objekt pozorovat z více úhlů tak, jako by se objekt na daném místě skutečně nacházel.

Hologramy je možné vytvářet ve dvou variantách: *reflexní* a *transmisní*. Reflexní hologramy jsou jednodušší jak na výrobu, tak na pozorování – na expozici je potřeba pouze jeden svazek koherentního světla a pozorovatelné jsou i v běžném bílém světle – vytvářejí ovšem pouze virtuální obraz. Hologramy transmisní vyžadují rozdělení svazku na alespoň dvě větve ve vhodném poměru a zobrazovat je lze pouze koherentním světlem stejné vlnové délky, ovšem vytvářejí virtuální obrazy i reálný obraz, který lze promítat na stínítko. Tento reálný obraz navíc lze dále použít pro proces tzv. *sekundární holografie*, díky kterému lze existující hologramy kopírovat.

Cílem tohoto projektu bylo sestavit, resp. aktualizovat, experimentální uspořádání pro záznam a zobrazování hologramů, a to hologramů plně barevných. Toto vyžaduje zapojení tří laserů (červeného, zeleného a modrého) do experimentálního uspořádání a jejich současnemu navedení na plochu holografické desky. Při tomto procesu jsme se setkali s řadou kuriozit a komplikací, které popisuje první kapitola.

Kapitola 1

Výchozí stav a experimenty

Na začátku úlohy jsme vycházeli z existujícího experimentálního uspořádání pro holografii. To bylo sestaveno pro holografii monochromatickou, a to vzhledem k velmi úzké spektrální citlivosti dříve používaných holografických desek. Toto existující uspořádání jsme využili pro vyzkoušení procesu s původními deskami a ověření fungování nových holografických desek.

1.1 Původní uspořádání

Existující uspořádání bylo uzpůsobeno pro monochromatické hologramy zelené barvy o vlnové délce 532 nm, na kterou jedinou byly citlivé používané chemické holografické desky. Proces vyvolávání těchto desek vyžadoval práci s nebezpečnými chemikáliemi, časově náročnou přípravu a proces vyvolávání, též časově náročný a obnášející vkládání desek do chemických roztoků, musel probíhat za velmi slabého osvětlení červeným světlem. Chemikálie i holografické desky samotné rychle degradovaly a často se díky tomu hologramy nepodařilo vytvořit vůbec. Tyto faktory byly tlakem ke změně.

Obrázek 1.1 ukazuje původní experimentální uspořádání holografie. Laserový paprsek vychází zprava, je kolimován spojnou čočkou a prochází elektronicky otevíratelnou clonou, která sloužila k ukončení expozice po potřebném čase. Dále paprsek prochází šedým filtrem, který dodatečně snižuje jeho intenzitu, a po odrazu na zrcátku prochází půlvlnovou destičkou, která určuje jeho polarizaci. Dále svazek světla vstupuje do polarizačního děliče, který v kombinaci s předešlou půlvlnovou destičkou umožňuje rozdělení svazku do dvou ramen s nastavitelným poměrem intenzit pro účely transmisní holografie. Jedno z ramen pokračuje doleva, prochází další půlvlnovou destičkou a po průchodu irisovou clonkou, která odstraňuje nežádoucí odrazy, je zvětšeno rozptylnou čočkou a odraženo na holografickou deskou a objekt v levém



Obrázek 1.1: Původní experimentální uspořádání

horním rohu. Toto rameno slouží reflexní holografii i jako referenční vlna v transmisní holografii. Druhé rameno polarizačním děličem pokračuje rovně na obdobnou zvětšující soustavu, která je na fotografii zakryta papírovým stínítkem, a slouží pak jako objektová vlna v transmisní holografii.

V rámci úvodních pokusů jsme se provedli dva pokusy o výrobu hologramu na chemických deskách, ani jeden z pokusů však nebyl úspěšný. V prvním případě došlo k přeexponování desky, v druhém případě se pravděpodobně vzhledem ke stáří chemikálií nepodařilo desku vyvolat.

V tomto uspořádání byly také provedeny pokusy na nových holografických deskách, které umožňují plně barevný zápis. Pokusné expozice byly monochromatické, jelikož toto uspořádání neumožňovalo navedení více laserových svazků naráz, nicméně tyto pokusy posloužily k určení vlivu kvality laserového svazku na výsledný hologram, který je popsán v sekci 1.3.

1.2 Návrh nového uspořádání

Důležitý požadavkem na nové uspořádání byla možnost jednoduchého přemístění. Z toho důvodu bylo celé nové uspořádání stavěno na desce velikosti $60\text{ cm} \times 30\text{ cm}$, kterou je možné jednoduše zvednout a přemístit bez potřeby jakékoli demontáže. Pro barevnou holografii bylo také potřeba zajistit vstup tří laserových paprsků, plus bylo již od začátku počítáno s možností



Obrázek 1.2: První iterace nového experimentálního uspořádání

navedení čtvrtého, externího, laserového paprsku pro experimenty s lasery jinými, než jsou v uspořádání umístěné napevno.

První iterace pro účely testování konceptu je na obrázku 1.2. Paprsky z trojice laserových diod jsou odraženy malými zrcátky umístěnými tak, aby paprsky dále pokračovaly co nejbližše sobě. Dále procházejí spojnou čočkou pro kolimaci a irisovou clonkou pro kalibraci a odstínění divokých odrazů. Následně je použita stejná kombinace půlvlnové a polarizačního děliče jako v původním uspořádání pro rozdělení kombinovaného svazku na dvě ramena pro transmisní holografii. Rameno objektové vlny je na obrázku 1.2 ukončeno další irisovou clonkou pro kalibraci a odstínění, druhé rameno je vedeno skrz irisovou clonku na rovinné zrcátko, které svazky směruje na držák holografické desky a podstavec pro objekt.

Chybějící v této iteraci byla rozptylná čočka pro rozšíření svazku dopadajícího na desku a objekt a celé rameno objektové vlny, které by se skládalo z hranolového děliče svazku a soustavy zrcátek a rozptylných čoček pro osvícení objektu ze dvou stran.

Základní formát tohoto uspořádání byl zachován i do výsledného uspořádání (viz kapitola 2). Vzhledem k problémům se svazky používaných laserů popisovaných dále v sekci 1.3.1 však musely být všechny čočky nahrazeny sférickými a/nebo parabolickými zrcátky, tedy se výsledné uspořádání zjednodušilo o veškeré čočky.

1.3 Úskalí laserových diod

Při úvodních experimentech na starém uspořádání jsme nové desky testovali na třech různých laserových zdrojích.

Prvním byl zelený solid-state laser o velmi konstantní vlnové délce 532 nm, který byl používán i v původní úloze. Tento laser má velmi kvalitní tvar svazku, gaussovské rozložení intenzity světla a světelný výkon 40 mW. Po zvětšení a expozici v reflexním uspořádání dával ze všech nejlepší výsledky – poskytoval potřebné homogenní osvětlení desky; zvětšený svazek i výsledný hologram je na obrázku 1.3(a).

Červené světlo poskytl alignment laser o též dobrém tvaru svazku, rozložení intenzity zde však bylo konstantní a klasická geometrické optika na čočkách se tím pádem nechovala dle očekávání – docházelo ke vzniku kroužků ve výsledné stopě. Tento jev je popisován v následující sekci 1.3.1. Nominální světelný výkon tohoto laseru byl výrazně nižší, oproti předchozímu laseru pouchých 5 mW. Stopa i výsledný hologram jsou na obrázku 1.3(b).

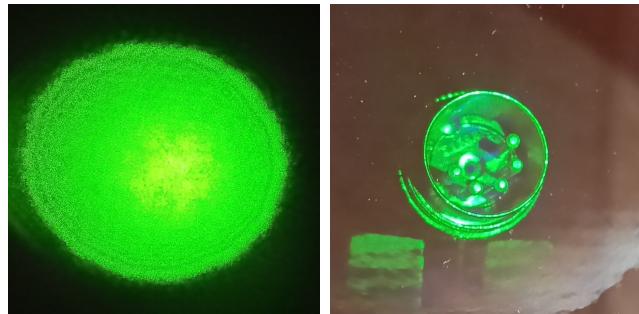
Poslední složkou bylo modré světlo, pro které jsme využili výkonové laserové diody modré barvy. Tato dioda měla světelný výkon až 1 W, ovšem její svazek měl obdélníkový tvar a rozložení intenzity ve svazku bylo velmi různorodé. Oříznutí svazku a následná manipulace čočkami vedla na velmi nepěknou stopu a tedy i nekvalitní hologram na obrázku 1.3(c).

Nejlepším zdrojem koherentního světla pro účely holografie by tedy byl solid-state laser, a to i přes nehomogenní, gaussovské, rozložení intenzity. Po dovyvolání holografické desky bílým světlem byl zelený hologram dokonce tak kvalitní a kontrastní, že na virtuální obraz bez problémů ostřilo automatické zasotření fotoaparátu mobilního telefonu. Tento hologram tedy ještě jednou představujeme na obrázku 1.4.

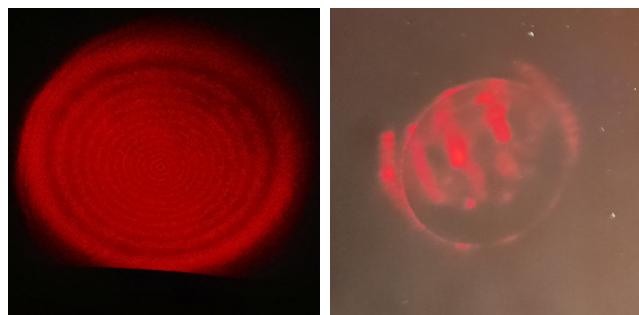
Tento typ laseru je však k dispozici pouze v této jedné vlnové délce a kombinovat různé druhy laserových zdrojů není vhodné. Velikost a způsob napájení tohoto laseru by navíc výrazně zhoršila přenosnost experimentálního uspořádání. Nakonec tedy byly pro nové uspořádání zvoleny alignment lasery, které jsou k dispozici ve červené, zelené i modré barvě a vyladěním nového uspořádání je možné kvalitu hologramu oproti tomuto pokusu zlepšit.

1.3.1 Chování „negaussovských“ svazků

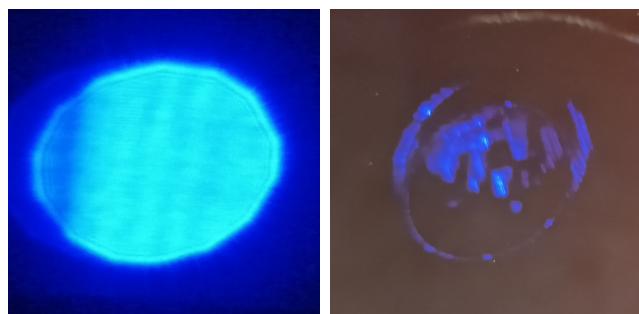
Pro pokrytí holografické desky a objektu je potřeba malý laserový svazek rozšířit na větší plochu (ve finálním uspořádání používáme kolem 60 cm^2). Toto jsme zprvu považovali za triviální, prostým vložením rozptylné čočky s vhodnou ohniskovou vzdáleností svazek zvětšíme na libovolnou plochu. Toto



(a) solid-state



(b) alignment

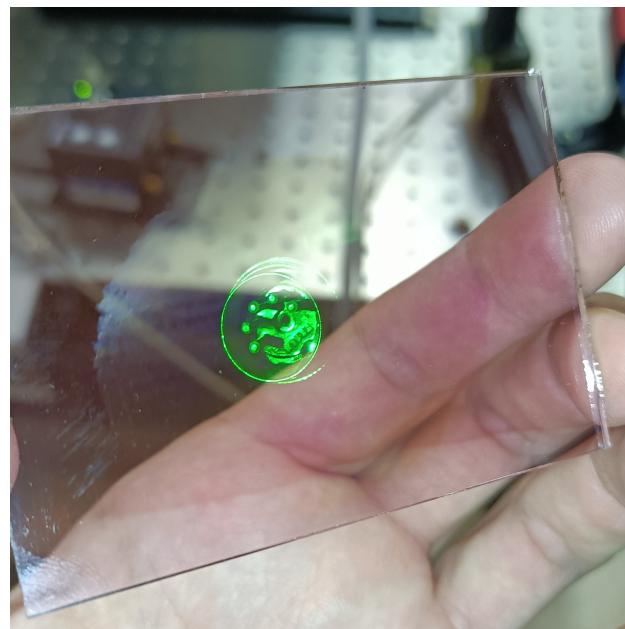


(c) výkonová

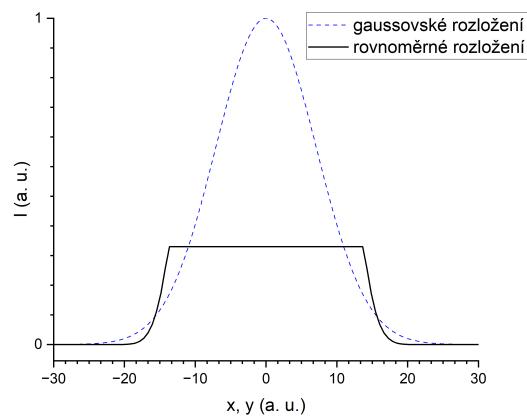
Obrázek 1.3: Vliv kvality svazku na výsledný hologram

bez problémů funguje pro nekohherentní světlo a pro svazky koherentního světla s gaussovským rozložením intenzity toto opravdu platí bez problémů. U použitých alignment laserů však máme rovnoměrné rozložení intenzity (znázorněno na obrázku 1.5), které způsobuje problémy.

Uvnitř reálných čoček dochází k vnitřním odrazům na stěnách čoček. To v případě nekohherentního světla pouze snižuje kvalitu obrazu, v případě koherentního světla ale dochází unitř čočky k interferenci procházejícího světla s vnitřními odrazy. Je-li rozložení intenzity ve svazku koherentního světla



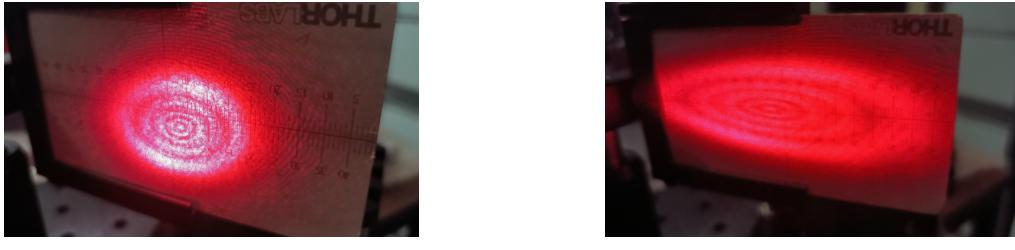
Obrázek 1.4: Automaticky zaostřený reflexní hologram v zelené barvě



Obrázek 1.5: Ilustrace gaussovského a rovnoměrného rozložení intenzity ve svazku

gaussovské, je interference potlačena, u jiných rozložení však vznikají interferenční obrazce, Airyovy kroužky, které jsou zřetelné na obrázku 1.3(b) vlevo.

Pro holografii je potřebné mít holografickou desku a objekt osvícené co nejvíce homogenním světlem, na což jsou svazky s rovnoměrným rozložením



(a) parabolické zrcadlo

(b) sférické zrcadlo

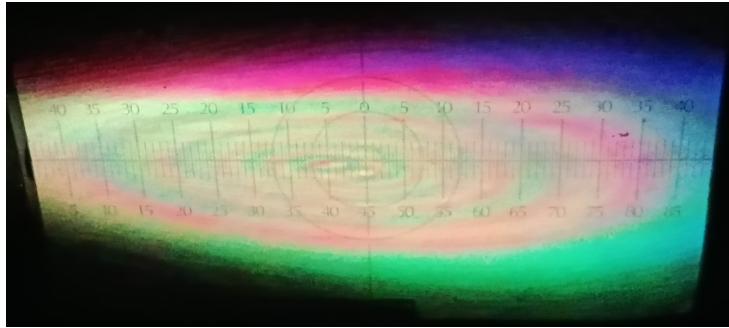
Obrázek 1.6: Stopy laserového svazku po rozšíření parabolickým a sférickým zrcadlem

intenzity principiálně ideální, ovšem vznik interferenčních obrazců v čočkách narušuje homogenitu příliš na to, abychom mohli vyrábět hologramy přijatelné kvality. Z tohoto důvodu jsme se rozhodli nahradit čočky za dutá sférická a parabolická zrcadla.

Sférická a parabolická zrcadla mají stejně jako čočky danou ohniskovou vzdálenost a mají tedy možnost obraz zvětšovat. To navíc bez vnitřních odrazů. V případě sférického zrcadla by při přenosu obecného obrazu došlo k vnešení kulové vady, u parabolického zrcadla při správném nastavení nikoliv, ovšem jelikož přenášíme pouze homogenní laserový svazek, vady zobrazení nijak neovlivní výsledek.

Absence vnitřních odrazů znamená, že nedochází k interferenci a tedy vzniku interferenčních obrazců. Zde jsme bohužel opět narazili na úskalí reálných optických komponent: Použitá zrcadla mají na odrazivé vrstvě navíc ještě ochrannou vrstvu, která v našem případě efektivně vytvořila Fabryho-Pérotův interferometr, který vede na vznik dalších interferenčních obrazců. U parabolického zrcadla se dále stopa jevila tečkovaná, jev označovaný jako *speckling*, ke kterému dochází při odrazu o hrubý povrch: Usuzujeme, že vzhledem k náročnosti vybrušování parabolických zrcadel je povrch tohoto zrcadla z výroby hrubší. Speckling je viditelný také na obrázku 1.6(a).

Ultimátním řešením by bylo použití budto zrcadel bez ochranné vrstvy, která by se ale pravděpodobně velmi rychle poškodila, nebo použití zrcadel vypouklých, která ale bohužel výrobce námi používaných optických součástek nevyrábí. Pro rozšíření svazku dopadajícího na holografickou desku jsme proto zvolili sférické zrcadlo namísto původně preferovaného parabolického, jelikož při porovnání v obrázku 1.6 vedlo na méně ostré interferenční obrazce a při lehkém rozladění jednotlivých laserů vytvářelo přijatelně homogenní stopu téměř bílé barvy na obrázku 1.7.



Obrázek 1.7: Stopa kombinace červeného, zeleného a modrého laserového svazku

1.4 Vliv úhlu dopadu na holografickou desku

Z teorie Fresnelovské optiky plyne, že při dopadu světla s p -polarizací na povrch pod Brewsterovým úhlem nedochází k odrazu světla. Jelikož pro holografii chceme odstranit jakékoli paprsky, které by mohly interferovat na holografické desce a způsobovat tak světelnou „mlhu“ ve výsledném hologramu zvanou *halo*, je vhodné splnit tyto podmínky: Brewsterův úhel a p -polarizaci.

Až do finálních úprav jsme se vskutku snažili Brewsterův úhel dodržovat, ovšem jelikož je tento úhel pro používané holografické desky mezi 50 a 60° , byl stejný i pozorovací úhel výsledných hologramů. To znamenalo, že se člověk na hologram, obzvlášt v případě reflexních hologramů, musel dívat ze strany.

Při posledních pokusech jsme se rozhodli toto ignorovat a laserový paprsek na holografickou desku pustit téměř kolmo. Překvapivě se ukázalo, že halo nebylo nijak významné a pro pozorování byl hologram výrazně pohodlnější. Finální uspořádání tedy používá tento minimální úhel dopadu.

Následující kapitoly již dokumentují současný stav.

Kapitola 2

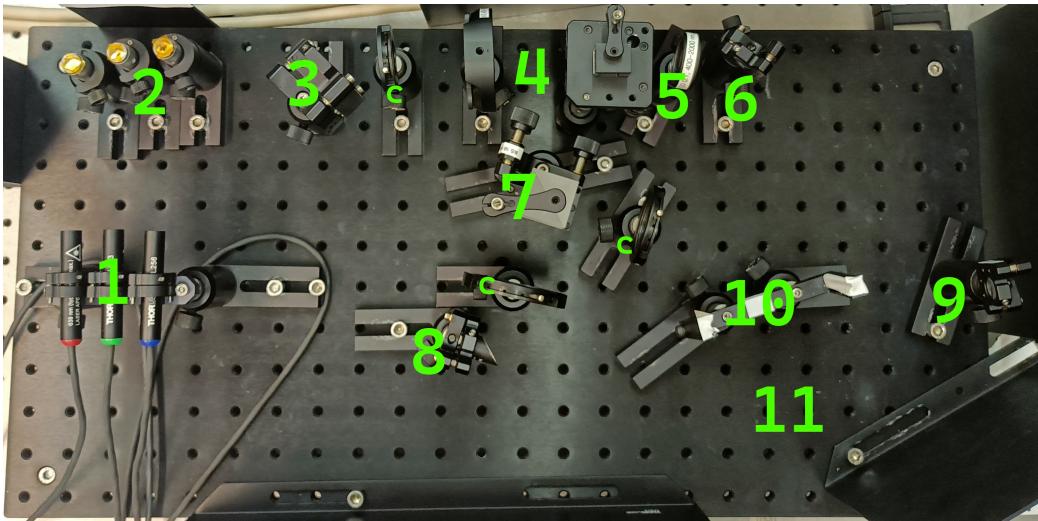
Optická část

Tato kapitola je přehledovou dokumentací finálního stavu optického experimentálního uspořádání.

Veškerá optická aparatura včetně trojice laserů je umístěna na desce, kterou lze jednoduše přesouvat. Disponuje magnetickým držákem pro zrcátko, jímž lze do soustavy navést externí laser, a pozicí pro vložení senzoru měřiče intenzity světla, která je potřeba pro výpočet doby expozice. Sestaveny byly také nový držák holografické desky a platforma pro umístění objektu, která lze jednoduše přesunout či naopak upevnit a obsahuje jednoduchý mechanismus pro upevnění vzorku.

2.1 Experimentální uspořádání

Obrázek 2.1 ukazuje finální stav nového experimentálního uspořádání. Lasery (1) směřují na malá stříbrná rovinná zrcátka (2), která jsou blízko u sebe a tím navádějí trojici laserových svazků blízko u sebe. Kombinace půlvlnové destičky a polarizačního děliče svazků (4) umožňuje nastavit poměr intenzity referenční a objektové vlny, či pro reflexní uspořádání nasměrovat veškerou intenzitu na holografickou desku. Sférické zrcadlo (6) s ohniskovou vzdáleností 9 mm odráží a zvětšuje svazek na holografickou desku uchycenou v držáku (10) tak, že dopadá pod malým úhlem. Hranolový dělič svazků (7) rovnoměrně rozděluje svazek objektové vlny do dvou ramen, aby hologramy v transmisním uspořádání měly více pozorovacích úhlů. Parabolické zrcadlo (8) s ohniskovou vzdáleností 9,5 mm a sférické zrcadlo (9) s ohniskovou vzdáleností 12 mm zvětšují ramena objektové vlny a odrážejí je na objekt, který je umístěn na podstaci v oblasti (11). Podstavec zde není vyobrazen, je však na obrázku 1.2. V uspořádání jsou také tři irisové clony (c), které slouží pro kalibraci a pro odstínění nežádoucích odrazů. Pravá dolní část uspořádání je



Obrázek 2.1: Popis nového experimentálního uspořádání:

- (1) trojice laserů, (2) malá rovinná zrcátka, (3) držák pro zrcadlo navádějící externí laser, (4) kombinace půlvlnové destičky a polarizačního děliče svazku, (5) pozice pro umístění senzoru, (6) sférické zrcadlo referenční vlny, (7) hranolový dělič objektové vlny, (8) parabolické zrcadlo pravé objektové vlny, (9) sférické zrcadlo levé objektové vlny, (10) držák holografické desky, (11) plocha pro umístění držáku objektu (nevýobrazen), (c) irisové clonky

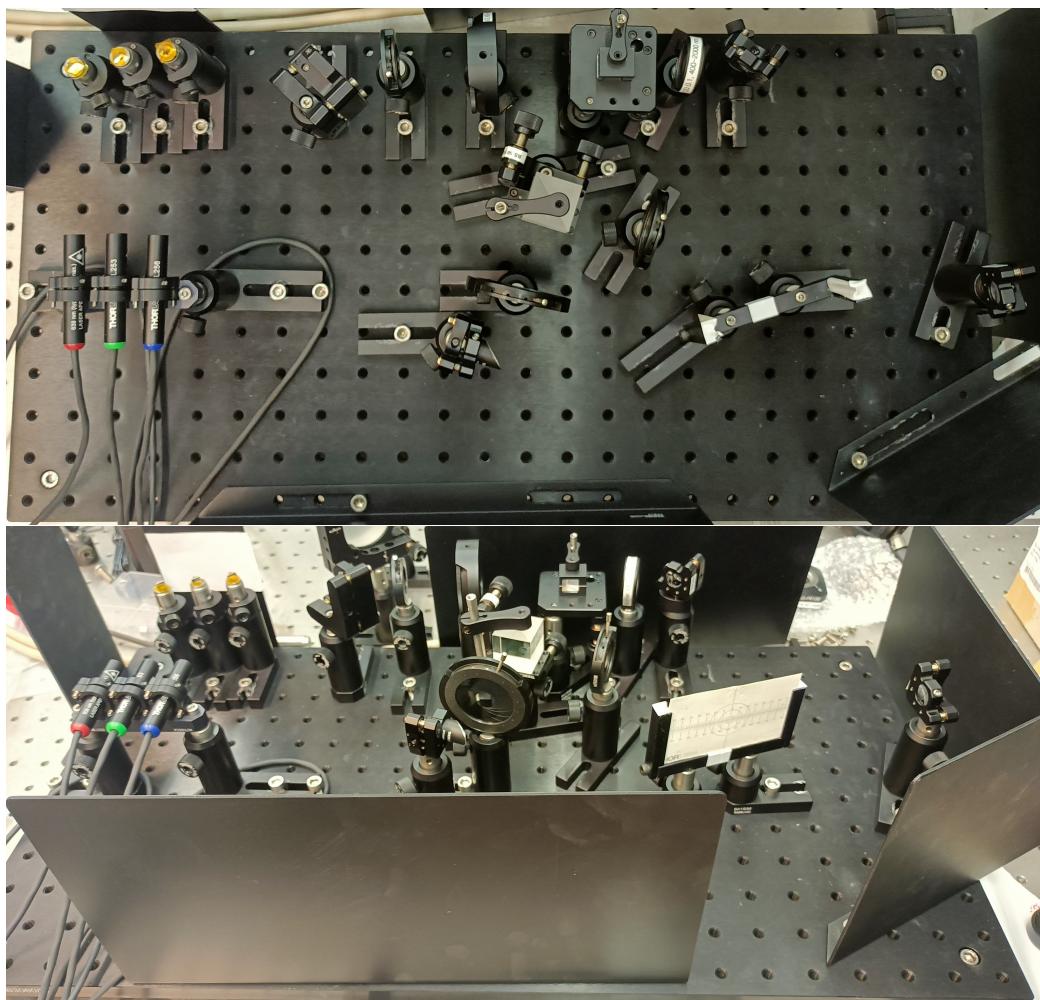
také zastíněna několika černými stínítky pro zabránění úniku do a odrazu v prostoru laboratoře.

Jako zdroje koherentního světla (1) jsme zvolili alignment lasery, které jsou dostupné v červené, zelené a modré barvě a poskytují dle experimentů 1.3(b) při lepším naladění rozumné výsledky. Jejich nevýhodou je, že jsou vyráběny pro účel čistě vizuální indikace, a tedy se při jejich výrobě příliš nedbá na přesnost vlnové délky. Modrý laser, který jehož nominální vlnová délka 420 nm se již tak liší od vlnové délky 450 nm, na kterou je holografická deska v modré oblasti nejcitlivější, z výroby přišel s vlnovou délkou 402,1 nm, což je již na hranici ultrafialové oblasti světla a nejenže je na tuto vlnovou délku holografická deska velmi málo citlivá, optické komponenty pro viditelnou oblast na této vlnové délce již nemusí fungovat správně (např. zrcátka (2) mají pro tento konkrétní laser ztráty až 20 %).

Držák (3) umožňuje magnetické uchycení rovinného zrcadla, pomocí kterého lze do aparatury navést externí laser. Vzhledem k malému světelnému výkonu napevno umístěných laserů (1), který je příliš nízký pro transmisní holografii při rozumných expozičních časech, budou transmisní hologramy vytvářeny pomocí externího laseru, např. dříve využívaného solid-state laseru,

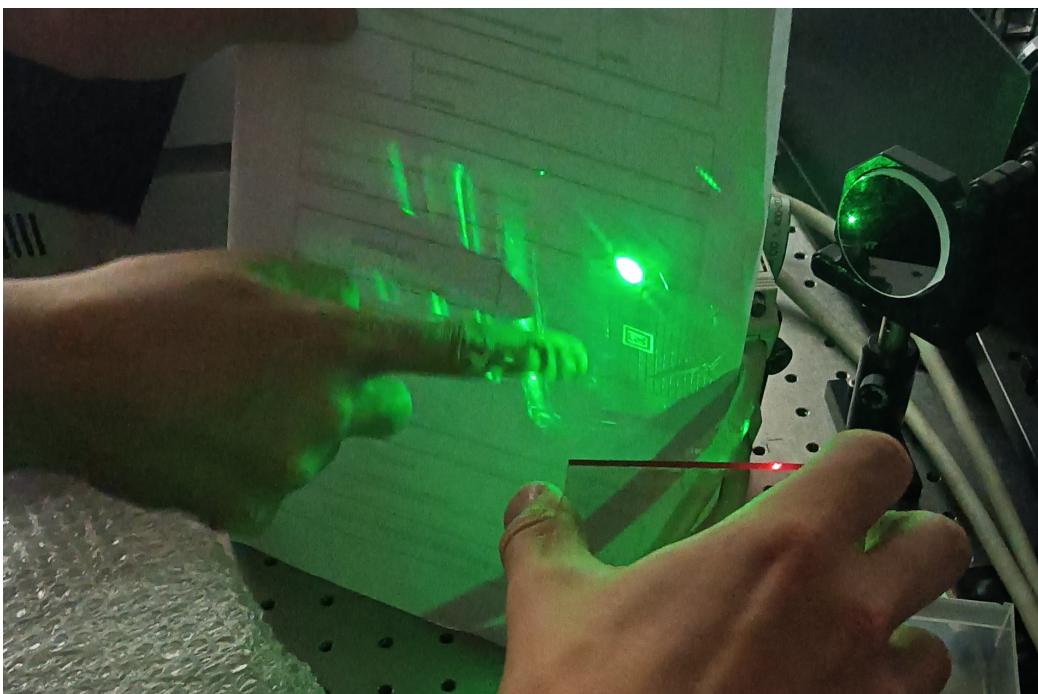
se kterým jsme i transmisní hologram vytvořili. Projekce tohoto transmisního hologramu je na obrázku 2.3.

Pozice (5) je primárně určena pro umístění senzoru měřiče intenzity světla, jejíž hodnota je potřeba pro výpočet expoziční doby (podrobněji popsáno v sekci 2.3). Na obrázku 2.1 je v této pozici umístěn šedý filtr, který může být v závislosti na použitém externím laseru potřeba pro dodatečné snížení intenzity referenční vlny v transmisní holografii pro dasažení správného poměru referenční a objektové vlny (k tomu nemusí stačit polarizační dělič, který při eliptické polarizaci světla propustí v minimu větší intenzitu, než je žádoucí).



Obrázek 2.2: Finální verze nového experimentálního uspořádání

Obrázek experimentálního uspořádání 2.1 bez popisků a z dalšího úhlu je na obrázku 2.2.



Obrázek 2.3: Projekce monochromatického transmisního hologramu hodinek vytvořeného v novém uspořádání

Tabulka 2.1: Vlnové délky a expoziční dávky pro expozici holografické desky (převzato z návodu dodaného s deskami)

barva	vlnová délka ¹ [nm]	expoziční dávka [mJ.cm^{-2}]
červená	635	20
zelená	532	30
modrá	450	80

2.2 Holografické desky

Nově jsou používány holografické desky výrobce **LitiHolo** [1], které dokáží zaznamenávat hologramy v červené, zelené a modré barvě a jejich libovolné kombinaci, tedy lze vytvářet i bílé, resp. plně barevné, hologramy. Tyto desky jsou navíc samovyvolávací, není tedy potřeba žádná práce s chemikáliemi, pouze se doporučuje pro zlepšení kontrastu hologramu exponovanou desku dosvitit bílým světlem.

Tabulka 2.1 ukazuje potřebné expoziční energie holografických desek. Jelikož pro lasery předpokládáme intenzitu I konstantní a rozšířujeme-li svazky tak, že jejich stopa v rovině holografické desky má plochu S , vypočteme expoziční dobu v sekundách

$$t = \frac{\mathcal{E} \cdot S}{I} \quad (2.1)$$

z udané expoziční dávky \mathcal{E} . Máme-li intenzitu světla I v miliwattech a plochu v cm^2 , nemusíme ani provádět žádné převody jednotek.

Při výrobě hologramů jsme vyzorovali, že na holografické desce vzniká při expozici viditelná mlhová stopa v místech, kam dopadá laserové světlo, a je-li intenzita příliš silná (např. při příliš dobrém odrazu v transmisním uspořádání), je fotocitlivá vrstva „vypálena“ a stává se opět dobře průhlednou.

Dále je s holografickými deskami potřeba opatrnost při veškeré manipulaci, jelikož jsou zjevně vyrobeny jako fotocitlivá fólie nalepená na skleněné destičce, a při neopatrné manipulaci na hranách desky se začne fólie odlepat. Drobná odlepení se neprojevila jako problém, fólie se snadno přilepí zpět, ale úplné odlepení by mohlo být problematické.

2.3 Výroba hologramů

Samotná výroba hologramů je velmi jednoduchá. V této sekci popíšeme i teorii obou typů hologramů, nicméně pro samotnou výrobu je potřeba jen

¹Vlnová délka, na kterou je v dané barevné oblasti deska nejvíce citlivá.

zdroj napájení a rovný povrch v temné místnosti. Pro obě metody musíme na pozici (5) naměřit intenzitu světla I a v rovině holografické desky (10) naměřit rozměry stopy laserových paprsků. Stopa bude mít tvar elipsy, stačí tedy naměřit délku hlavní polooosy a a vedlejší poloosy b a vzorcem

$$S = \pi ab \quad (2.2)$$

vypočítat plochu. Intenzitu I a plochu stopy S pak použijeme společně s expozičními dávkami z tabulky 2.1 ve vzorci (2.1) k zísákní expoziční doby pro danou barvu.

Pro monochromatické hologramy toto znamená celkovou expoziční dobu, pro barevné hologramy toto udává dobu, po které je daný laser potřeba vypnout. Toto časování však za uživatele řeší software popsaný v kapitole 4.

Z teoretického pohledu je výroba hologramů založená na interferenci referenční a objektové vlny ve fotocitlivém materiálu holografické desky. Realizace referenční a objektové vlny se v reflexním a transmisním uspořádání liší a je popsána v odpovídajících sekcích, nicméně mají společný princip. Vzniklé interferenční pole ve fotocitlivém materiálu iniciuje fotochemickou přeměnu, která permanentně zachytí rozložení intenzit interferujícího světla a vytvoří tak jakousi mřížku, jejímž následným osvětlením lze reprodukovat objektovou vlnu a tím vytvoří iluzi, že se objekt v daném místě skutečně nachází. Reprodukce se ale u obou metod také liší a je opět popsána v odpovídajících sekcích níže.

2.3.1 Reflexní hologramy

Reflexní hologramy jsou jednodušší na výrobu i pozorování, to ale za cenu toho, že vytvářejí pouze virtuální obraz – tedy se zdá, že se objekt nachází za holografickou deskou, a konvexní povrchy se jeví jako konkávní a obráceně [2]. Hotové hologramy mohou být pozorovány v bílém světle pod úhlem, pod kterým byly exponovány, což je s malou destičkou v ruce jednoduché najít.

V reflexním uspořádání je referenční a objektová vlna stejná, resp. referenční vlna se po průchodu holografickou deskou stává vlnou objektovou. Je tedy potřeba pouze jeden rozšířený svazek koherentního světla. Po průchodu holografickou deskou světlo dopadá na a odráží se od objektu a část odražená zpět na holografickou desku interferuje s přicházejícím světlem, čímž vzniká interferenční pole ve fotocitlivé vrstvě.

Při exponování hologramů v reflexním uspořádání nasměrujeme pomocí kombinace půlvlnové destičky (4) veškerou intenzitu do ramene přímo dopadajícího na holografickou desku a uzavřením irisových clonek (c) v druhém

rameni odstíníme případné zbytkové světlo. Objekt umístíme na podstavci na plochu (11) tak, aby se pokud možno dotýkal holografické desky – tím jsou deska a objekt spojeny tak, že vibrují společně, a vibrace tedy nepůsobí problémy s kvalitou hologramu.

2.3.2 Transmisní hologramy

2.4 Náměty na zlepšení

Uvádíme zde seznam námětů, na které jsme při experimentech narazili a které by bylo do budoucna přínosné zlepšit, ale nebyly nezbytné pro úspěšné sestavení experimentálního uspořádání. Jsou zde uvedeny za účelem postupného vylepšování, naskytne-li se příležitost.

Fluorescenční značky

Holografické desky musejí být před samotnou expozicí uchovávány v co největší tmě, což také vyžaduje, aby byly vyndavány z balení a umisťovány do držáku v temné místnosti. Orientace po hmatu je sice možná, ale je nepraktická a hrozí rozladění aparatury či znečištění povrchu citlivých optických komponent dotykem.

Při pokusech jsme na optickém stole měli připravený měřák intenzity, jehož sonda je po obvodu vyrobena z fluorescenčního materiálu. Ukázalo se, že tento prvek je výborným orientačním bodem pro navigaci v temné místnosti a zároveň je intenzita světla vycházející z tohoto prvku velmi nízká.

Umístěním fluorescenčních značek např. na vnější stranu stínítka by byla značně zjednodušena orientace v temné místnosti a neměly by negativně ovlivnit kvalitu hologramu.

Uchycení zrcátek

Malá trojúhelníková zrcátka (2) v obrázku 2.1 jsou upevněna relativně dočasně na tyčkách pomocí oboustranné lepící pásky. Jelikož byla zrcátka lepena ručně a manipulace s nimi není jednoduchá, nejsou všechna zrcátka nalepena stejně a jsou přilepena pod různým úhlem, který musí být kompenzován uchycením laseru.

V laboratoři je k dispozici „beam combiner,“ který je určen přesně pro účel přiblížení laserových svazků, má ale špatné rozměry. Pro méně robustní řešení by bylo možné ponechat stávající umístění zrcátek a použít úchyty zrcátek z „beam combineru,“ našel-li by se způsob převodu M3 a M4 závitů,

ideálním řešením by však bylo sehnat či vyrobit „beam combiner“ s vhodnou roztečí zrcátek.

Modrý laser

V sekci 2.1 uvádíme, že modrý laser má nevhodnou vlnovou délku 402,1 nm, která nejenže neexponuje holograficou desku dobře, ale navíc na ní ani správně nefungují některé komponenty. Zrcátko (2) a půlvlnová destička (4) z obrázku 2.1 se ukázaly jako obzvláště problematické.

Laser má na svém výstupu intenzitu světla cca. 4,6 mW. Po odrazu na zrcátku ale pokračuje dále do uspořádání pouze přibližně 3,6 mW a dále za půlvlnovou destičkou jsme naměřili již jen asi 2,6 mW. To je intenzita již příliš nízká pro praktické využití, jelikož dle tabulky 2.1 má vyžaduje modrá barva nejvyšší expoziční dávku. To vedlo na expoziční dobu kolem 40 min, při které se již ztrácí stabilita laserového výstupu i vibrací aparatury.

Při expozici všemi třemi barvami laseru jsme byli schopni pozorovat modré a bílé oblasti hologramu, tedy se modrá složka holografické desky tímto světlem exponovala, nicméně při expozici pouze tímto modrým laserem jsme na desce žádný hologram nenalezli. Pro účely barevené holografie tedy bude postačující nalézt zrcátko a půlvlnovou destičku, které budou fungovat dobré se všemi třemi barvami laserů, aby se snížila expoziční doba, ale obecně by bylo vhodné modrý laser nahradit jiným, který bude mít vlnovou délku bližší 450 nm doporučeným výrobcem holografických desek.

Držák holografické desky

Současný držák holografické desky (10) je vyroben z různých dílů optické „stavebnice“ a jeví se jako velmi praktický. Disponuje pozicí na umístění holografické desky i kalibrační papírové kartičky, jak je vidět na obrázku 2.2 dole.

Pozice pro umístění holografické desky je ale momentálně závislá na elektrikářské lepící pásce, která ačkoli díky své pružnosti velmi dobře drží holografickou desku, její opotřebení je nevyhnutelné. Do budoucna tedy bude muset být pánska vyměňována, nebo bude potřeba vytvořit gumové vložky do drážek držáku, které zajistí pevné uchycení desky s trvalejší životností.

Kapitola 3

Elektronická část

3.1 Ovládací panel

3.2 Napájení laserů

3.3 Dosvětlovací LED

3.4 Externí laser

Kapitola 4

Softwarová část

- 4.1 Řídící mikrokontroler**
 - 4.1.1 Časování**
 - 4.1.2 Komunikace**
- 4.2 Uživatelské ovládací prostředí**

Závěr