



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**KONSTRUKCE LED SVĚTELNÉHO ZDROJE PRO
MIKROSKOP**

DESIGN OF LED LIGHT SOURCE FOR MICROSCOPE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Timotej Perháč

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Šperka, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Timotej Perháč**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojírenského inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Petr Šperka, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Konstrukce LED světelného zdroje pro mikroskop

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Interferenční metoda vyvinutá na Ústavu konstruování pro měření tloušťky mazací vrstvy v bodových kontaktech umožňuje měření v rozsahu tloušťek od 0 do 900 nm. Toto omezení plyne z použitého světelného zdroje, kterým je halogenová žárovka nebo xenonová výbojka. Při použití světelného zdroje kombinujícího tři úzkopásmové LED diody, lze získat světelný zdroj pro měření v širším rozsahu tloušťek.

Typ práce: vývojová – konstrukční

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je navrhnout a zrealizovat trichromatický LED světelný zdroj použitelný na mikroskopech, který rozšíří rozsah měřitelných tloušťek mazací vrstvy na optickém tribometru.

Dílní cíle bakalářské práce:

- navrhnout koncepci světelného zdroje, zvolit vhodné optické prvky a LED diody,
- navrhnout konstrukci světelného zdroje a vytvořit výkresovou dokumentaci,
- zrealizovat a otestovat světelný zdroj na tribometru.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, výkresy součástí.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2018.pdf

Seznam doporučené literatury:

MALACARA, D. a MALACARA, Z. Handbook of optical design. 2nd ed, Marcel Dekker, New York 2004. ISBN 08-247-4613-9.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že diplomovú prácu na tému *Konstrukce LED světelného zdroje pro mikroskop* som vypracoval samostatne pod vedením Ing. Petra Šperku, PhD. a že som uviedol všetky použité literárne a odborné zdroje v zozname použitej literatúry.

V Brne, dňa 18. mája 2018

.....
vlastnoručný podpis autora

POĎAKOVANIE

Touto cestou chcem poďakovať vedúcemu svojej bakalárskej práce Ing. Petrovi Šperkovi PhD. za pomoc a vedenie pri písaní diplomovej práce a pri realizácii jej praktickej časti. Moja vďaka patrí tiež otcovi, ktorý mi poskytol množstvo neoceniteľných rád pri návrhu a realizácii elektrického napájania pre osvetľovací zdroj.

ABSTRAKT

Táto bakalárska práca sa zaoberá konštrukčným návrhom a vyhotovením funkčného osvetlenia LED osvetľovacieho zdroja pre mikroskop NIKON Eclipse LV 150, s použitím troch úzkopásmových LED diód.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

LED, Zdroj svetla, Optická interferometria, Optický mikroskop, Köhlerovo osvetlenie.

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with the construction design of microscope episcopic, trichromatic LED illumination source for microscope Nikon Eclipse LV150, by using three LEDs with narrow spectral width.

KEY WORDS

LED, Source of light, Optical interferometry, Optical microscope, Köhler illumination.

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

PERHÁČ, T . *Konstrukce LED světelného zdroje pro mikroskop*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 37 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Šperka, Ph.D.

OBSAH

ÚVOD	8
1 PREHLAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA	9
1.1 Typy osvetlenia v mikroskopoch	9
1.1.1 Kritické osvetlenie	9
1.1.2 Köhlerovo osvetlenie	9
1.2 Elektrické zdroje svetla	10
1.3 LED diódy	11
1.3.1 Princíp činnosti	11
1.3.2 Vlastnosti LED	13
2 ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE	15
2.1 Problematika merania tenkých mazacích vrstiev	15
2.2 Typy svetiel pri meraní tenkých mazacích vrstiev	16
2.2.1 Biele svetlo	16
2.2.2 Monochromatické svetlo	16
2.3 Cieľ práce	16
3 KONCEPČNÉ RIEŠENIE	17
3.1 Základný koncept	17
3.2 Výber LED diód	17
3.3 Výber optických elementov	18
3.4 Umiestnenie LED diód a dichroických zrkadiel	18
4 KONŠTRUKČNÉ RIEŠENIE	20
4.1 Optomechanická časť	20
4.1.1 Variant 1	20
4.1.2 Variant 2	22
4.2 Elektrická časť	24
4.4 Ekonomický rozbor	28
5 DISKUSIA	29
5.1 Overenie funkčnosti a dosiahnuté výsledky	29
5.1.1 Výsledky merania pri statickom kontakte	29
5.1.2 Výsledky merania pri dynamickom kontakte	30
6 ZÁVER	32
ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	33
ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN	34
ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV	35
ZOZNAM TABULIEK	36
ZOZNAM PRÍLOH	37

Moderný mikroskop je komplikované optické zariadenie, ktoré slúži na pozorovanie drobných objektov a detailov. Slovo mikroskop je podľa [1] odvodené z gréckych slov mikros = malý a skopeo = pozerám.

Objekty pozorujeme pri veľkom zväčšení. Moderné mikroskopy môžeme rozdeliť do dvoch skupín. Ak je zväčšený obraz vytvorený svetlom, hovoríme o optických mikroskopoch. Svetlo môžeme podľa vlnovo – časticového dualizmu vnímať ako viditeľnú časť spektra elektromagnetického vlnenia, alebo ako tok častíc – fotónov. Zväčšenie optického mikroskopu je obmedzené vlnovou dĺžkou svetla a detaily, ktoré sú s vlnovou dĺžkou svetla porovnateľné sa nedajú rozlíšiť.

Druhú skupinu tvoria tzv. elektrónové mikroskopy. V nich je obraz vytvorený tokom elektrónov. Aby bol obraz pozorovateľný ľudským okom, musí byť pretransformovaný na pozorovateľný obraz.

Význam mikroskopie v technickej praxi neustále rastie, rastú požiadavky na technické možnosti mikroskopov a táto oblasť techniky sa dynamicky rozvíja.

V tribologickom laboratóriu v Ústave konštruovania VUT v Brne je k dispozícii modulárny priemyslový mikroskop Nikon Eclipse LV150. Jedná sa o optický mikroskop slúžiaci na pozorovanie hrúbky mazacej vrstvy.

Nielen jeho optická sústava, ale aj spôsob osvetlenia podstatným spôsobom ovplyvňuje výslednú kvalitu zobrazenia. Podľa [10] sa pri veľkých zväčšeniach obrazu svetlo „rozprestrie“ po ploche obrazu a osvetlenie v každom bode klesne s druhou mocninou zväčšenia obrazu. To je dôvod, prečo mikroskopy vyžadujú intenzívne osvetlenie pozorovaných objektov. Okrem intenzity zohráva významnú úlohu pre rozlišovaciu schopnosť mikroskopu aj spektrum a vhodné nasmerovanie osvetľovacích lúčov. Spektrum je dané použitým zdrojom svetla.

Návrh nového osvetlenia pre spomínaný mikroskop má rozšíriť rozsah hrúbok, ktoré budú merateľné.

1 PREHLAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA

1

Už v histórii sa používali pre mikroskopy otočné zrkadlá, ktoré sa snažili sústrediť okolité svetlo do potrebného bodu. V súčasnosti je neoddeliteľnou súčasťou každého mikroskopu elektrický zdroj svetla.

1.1 Typy osvetlenia v mikroskopoch

1.1

Podľa toho, na aké pozorovanie je mikroskop určený, rozoznávame tieto základné skupiny osvetlenia

1. Episkopické osvetlenie – objekty pozorujeme v dopadajúcom svetle, sú nepriehľadné
2. Diaskopické osvetlenie – objekty pozorujeme v prechádzajúcom svetle, sú priehľadné

Vhodné tvarovanie kužeľa svetla zabezpečuje optická sústava šošoviek. Snahou pritom je zabezpečiť, aby bolo rovnomerne osvetlené celé zorné pole a aby osvetľujúci zväzok čo najlepšie vyplnil apertúrny uhol objektívu.

Podľa toho, ako je kužeľ tvarovaný vzhľadom na pozorovaný objekt rozlišujeme dva základné typy osvetlenia:

- A) Kritické osvetlenie
- B) Köhlerovo osvetlenie

1.1.1 Kritické osvetlenie

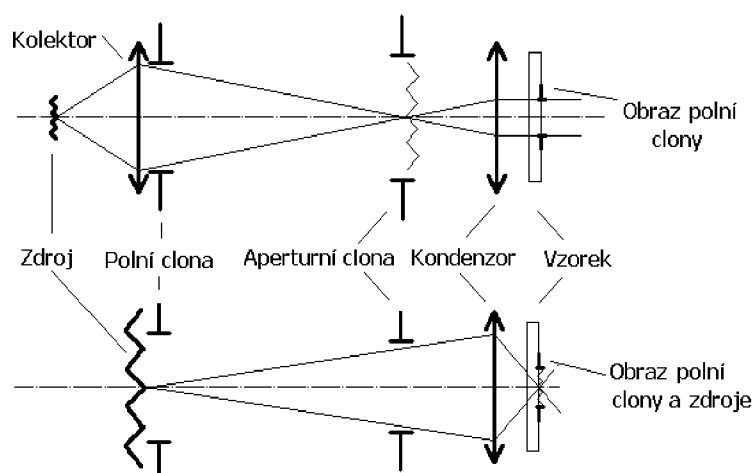
1.1.1

Optickú sústavu tvorí zdroj svetla, poľná clona, apertúrna clona a kondenzor. Svetlo zo zdroja prechádza poľnou clonou. Tá slúži na reguláciu veľkosti zorného poľa. Apertúrna clona zabraňuje tomu, aby vonkajšie lúče prenikli do objektívu. Veľkosť apertúry determinuje rozlišovaciu schopnosť a ostrosť obrazu. Kondenzor potom usmerní svetlo na pozorovaný objekt. Zdroj je na tento objekt zaostrený a to spôsobuje jeho nerovnomerné osvetlenie.

1.1.2 Köhlerovo osvetlenie

1.1.2

Oproti kritickému osvetleniu je v sústave navyše kolektorová šošovka. Tá zmení dráhu lúčov tak, že zdroj svetla sa nezobrazuje na pozorovaný objekt, ale do zadnej ohniskovej roviny objektívu. Pozorovaná oblasť je tak osvetlená rovnomerne. To je kvalitatívny posun oproti kritickému osvetleniu.



Obr. 1 Porovnanie kritického (dolu) a Köhlerovho osvetlenia (hore)

1.2 Elektrické zdroje svetla

1.2

Môžeme ich rozdeliť do troch základných skupín.

- A) Tepelné zdroje – svetlo vzniká prechodom elektrického prúdu cez wolfrámové vlákno. Tým sa vlákno rozžeraví a časť energie sa premení na svetlo. Väčšina energie sa premení na teplo. Čím na vyššiu teplotu je vlákno zahriate, tým viac sa vylepšuje pomer svetlo : teplo v prospech svetla. Vlákno pri vyšších prúdoch a teda teplotách svieti intenzívnejšie, ale aj rýchlejšie prehorí. To viedlo ku konštrukcii tzv. halogénových žiaroviek. Ich banka je plnená zmesou plynov zo skupiny halogenidov a tie umožňujú pri vysokých teplotách regeneráciu vlákna – návrat sublimovaných častíc späť na vlákno. Práve kvôli vyššej pracovnej teplote halogénových žiaroviek musia používať banku z kremičitého skla, ktoré dobre znáša vysoké teploty. Mimoriadne citlivé je však na rozdiely teplôt, preto sa ich nemôžeme dotýkať. Pri dotyku zostáva na skle odtlačok prsta a oblasť so stopami tuku má rozdielnu teplotu vzhľadom na oblasť bez tuku. Sklo následkom toho praská. Vzhľadom na vyššiu intenzitu svetla a účinnosť mikroskopy využívajú práve halogénové žiarovky. Spektrum vyžarovaného svetla je spojité, ale mení sa s teplotou vlákna. Všeobecne žiarovky nie sú náročné na zdroj napájania, zvládajú jednosmerné aj striedavé napájacie napätie, dôležitý je príkon, resp. prúd pretekajúci vláknom. Jas sa dá jednoducho regulovať potenciometrom. Napriek regenerácii vlákna majú žiarovky obmedzenú životnosť a zo všetkých zdrojov majú najnižšiu účinnosť.
- B) Výbojové zdroje – obsahujú plyny, alebo kovové pary, ktoré sa musia vysokým napätím ionizovať. Ionizované prostredie sa stáva vodivým, čo umožní prietok elektrického prúdu. Energia excitovaných častíc sa uvoľňuje vo forme svetla. Emitované svetlo má výrazne čiarové spektrum,

čo umožňuje pomocou vhodných filtrov dosiahnuť monochromatické lúče. Spektrum je závislé od typu použitého výbojového zdroja, v mikroskopoch sa najčastejšie používajú ortuťové a xenónové výbojky. Veľkou nevýhodou je nutnosť vysokého napätia potrebná na vznik výboja. Potrebné je teda špeciálne napájanie. Životnosť týchto zdrojov je pomerne nízka okolo 200 hodín.

- C) Luminiscenčné zdroje svetla - svetlo vzniká prechodom jednosmerného prúdu cez polovodičový PN priedchod. Schopnosť emitovať energiu vo forme viditeľného svetla majú len niektoré polovodičové materiály a farba závisí od použitého materiálu. Vyžadujú jednosmerné napájanie nízkeho napätia. Účinnosť je vysoká a životnosť až 10000 hodín. Intenzita emitovaného svetla sa dá regulovať napájacím prúdom. LED dióda predstavuje veľmi efektívny zdroj svetla.

Samostatnú kategóriu tvoria zdroje monochromatického koherentného svetla, ktoré nazývame lasery. V poslednej dobe laserové zdroje svetla prenikajú aj do oblasti mikroskopie. Laserové lúče umožňujú presné tvarovanie osvetľujúceho zväzku a môžu mať aj veľkú intenzitu. To sa využíva napr. vo fluorescenčných mikroskopoch. Osvetlený je len jeden bod a signály od okolitých bodov sú obmedzené. Týmto spôsobom sa dá korigovať vplyv pozadia a výsledný obraz sa dá poskladať z viacerých – postupným prenikaním do hĺbky. Výrazným spôsobom sa tak zvyšuje hĺbka ostrosti.

Podľa typu prevádzky ich delíme na impulzné a spojité.

Podľa toho, v akom aktívnom prostredí dochádza ku stimulovanej emisii fotónov môžeme lasery rozdeliť na:

- A) Pevnolátkové napr. rubínový laser,
- B) plynové patria sem napr. argónový, xenónový, CO₂,
- C) kvapalinové,
- D) polovodičové – laserový lúč je emitovaný prechodom elektrického prúdu cez PN priedchod.

1.3 LED diódy

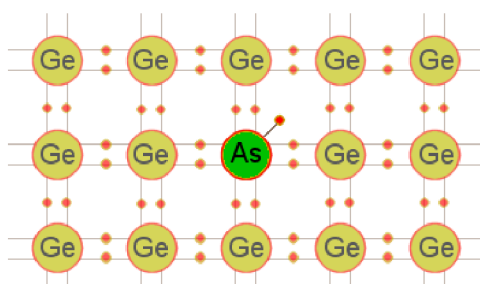
1.3

Elektroluminiscenčná dióda je moderný a mimoriadne efektívny zdroj svetla. Pre svoje vlastnosti bola práve polovodičová dióda zvolená za zdroj svetla v navrhovanom module osvetlenia.

1.3.1 Princíp činnosti

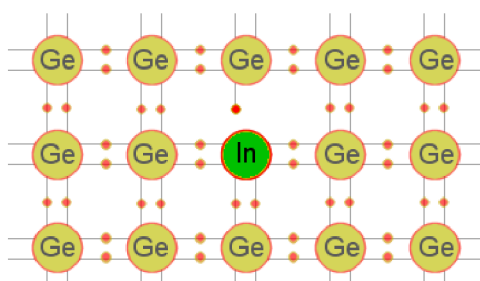
1.3.1

Dióda je dvojvrstvová polovodičová súčiastka s jedným PN priedchodom. Polovodič je štvormocný prvok (kremík, germánium), ktorý má svoje štyri valenčné elektróny viazané silnými kovalentnými väzbami v elektrónových pároch. Pridaním prvku s piatimi valenčnými elektrónmi (donor) vzniká polovodič typu N. Štyri z piatich valenčných elektrónov vytvoria kovalentné väzby a jeden elektrón zostane voľný.



Obr. 2 Štruktúra polovodiča typu N (upravené zo [16])

Pridaním prvku s tromi valenčnými elektrónmi (akceptor) vzniká polovodič typu P. Všetky tri vytvoria so susednými atómami väzby, ale jedno miesto na každý atóm trojmocnej prímеси zostane voľné. Vznikne tzv. diera, ktorá sa navonok javí ako kladný voľný nosič náboja.



Obr. 3 Štruktúra polovodiča typu P (upravené zo [16])

Polovodiče schopné emitovať svetlo sú však najčastejšie zo skupiny intermetalických polovodičových zlúčenín typu $A^{III}B^V$, alebo dokonca $A^{II}B^{VI}$. To znamená, že základnú štruktúru s elektrónovými párami (štyri páry) vytvára trojmocný a päťmocný prvok, resp. dvoj a šesťmocný. Vhodnými prímесami potom možno dosiahnuť materiál s prebytkom elektrónov – typ N, alebo ich nedostatkom – typ P.

Ak je PN priedchod polarizovaný v priamom smere – teda anóda P je kladnejšia ako katóda N s požadovaným rozdielom potenciálov, potom cez PN priedchod prechádzajú elektróny. Ak sa priblížia ku diere obsadia voľné miesto. Nastáva rekombinácia dvoch voľných nosičov náboja a uvoľní sa pritom energia vo forme svetla. Frekvencia vyžiarenej energie je determinovaná použitým polovodičovým materiálom. Vývoj materiálov neustále napreduje. Prvé sa objavili červené, až neskôr pribudli zelené, oranžové a žlté LED diódy. Ako posledné boli objavené materiály s modrou farbou emitovaného svetla. Potom už nič nestálo v ceste vývinu LED zdroja s bielym svetlom. Biele LED svetlo sa dá získať dvoma spôsobmi. Prvým je klasické miešanie zdrojov RGB – teda červenej, zelenej a modrej diódy. Druhým spôsobom je využitie luminoforov. Luminofór je budený buď modrou diódou, alebo je použitý trojpásmový luminofór budený ultrafialovou diódou.

1.3.2 Vlastnosti LED

1.3.2

LED diódy ako zdroje svetla majú mnohé výhody, avšak pre použitie v osvetľovacej sústave mikroskopu sú významné najmä tieto:

- Ich svietivosť možno regulovať napájacím napätím a to s veľmi rýchlou odozvou, majú možnosť úplného zotmenia bez zmeny farby. To znamená, že môžeme vytvoriť osvetľovaciu sústavu s dynamickým riadením intenzity aj farby svetla.
- Sú spoľahlivé a majú dlhú životnosť, ktorú neovplyvňuje ich zapínanie a vypínanie, čo bol vážny problém pri žiarovkách (samozrejme aj halogénových).
- V porovnaní s inými zdrojmi majú vysokú účinnosť a ich prevádzka je ekonomická.
- Neobsahujú zdraviu škodlivú ortuť, ich prevádzka ani likvidácia nemá závažné negatívne vplyvy na životné prostredie
- Majú malé rozmery a tým minimálne obmedzujú konštruktérov pri vytváraní svetelných sústav rôznych tvarov, výkonov a rozmerov.

Hoci LED diódy pri svojej činnosti vytvárajú málo tepla v pomere ku svetlu, aj tak je to spojené s istými problémami. Vysoká pracovná teplota jednak skracuje životnosť diódy, ale hlavne znižuje jej svietivosť. Je to rozdiel oproti všetkým ostatným zdrojom svetla, ktoré so zvyšujúcou sa pracovnou teplotou zvyšujú svoju svietivosť. Z týchto poznatkov vyplýva záver, že diódy je potrebné vybaviť chladičmi.

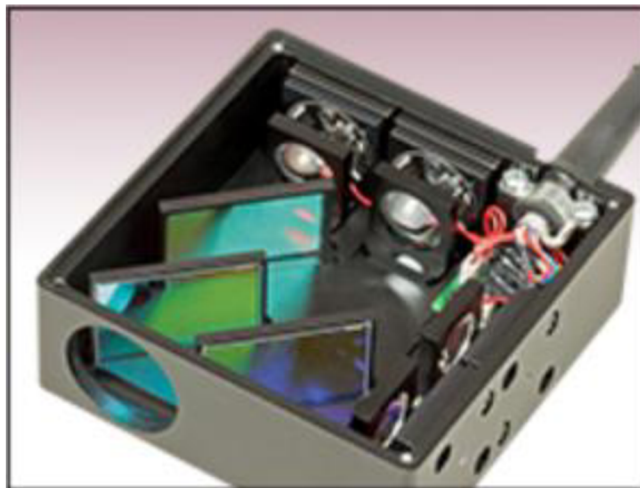
1.4 Dostupný polychromatický LED zdroj svetla

Pri návrhu polychromatického zdroja je možné vychádzať z existujúceho riešenia. Na Obr. 4 je LED zdroj svetla z ponuky firmy Thor Labs, ktorý kombinuje štyri kolimované lúče svetla s rôznymi vlnovými dĺžkami, ktoré sú emitované úzkopásmovými LED diódami.



Obr. 4 štvor-chromatický zdroj svetla firmy Thor Labs

Obr. 5 ukazuje vnútorný pohľad do zariadenia. Lúče svetla sú kolimované asférickými šošovkami a vedené cez sústavu troch dichroických zrkadiel. Ich konfigurácia závisí na voľbe kombinácie LED diód.



Obr. 5 Vnútorný pohľad 4-chromatického zdroja

Cena samotného zdroja svetla je približne 62000 Kč. Pre regulovateľnosť LED diód je potrebné dokúpiť ovládač na Obr. 6 za cenu približne 62400 Kč. Celková cena tak prevyšuje 120000 Kč.



Obr. 6 Ovládač LED diód

2 ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE

2

2.1 Problematika merania tenkých mazacích vrstiev

2.1

Ako uvádza Hartl v [2], pri pohyblivých strojových sústavách dochádza k interakcii povrchov a ich vzájomnému treniu. Dôsledkom trenia je opotrebenie. To je možné znižovať mazaním, ktorého úlohou je zabrániť bezprostrednému styku povrchov.

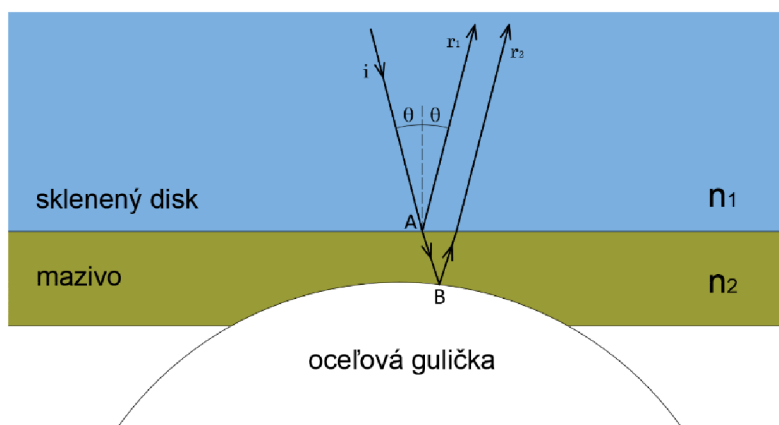
Trecie povrchy s vrstvou maziva vytvárajú tzv. tribologickú sústavu. Podľa tohto autora rozlišujeme niekoľko režimov mazania. Podstatné je, že s rozvojom techniky dochádza k postupnému znižovaniu hrúbky mazacích vrstiev. Hrúbka mazacieho filmu dosahuje pre niektoré aplikácie rádovo nanometre. Jedná s teda o veľmi tenké mazacie filmy, ktorých hrúbka je porovnateľná s veľkosťou molekúl maziva.

Vzhľadom na malé rozmery mazacích filmov je potrebné použiť špeciálne metódy pre ich meranie.

Podľa spomínaného autora je optická interferenčná metóda najrozšírenejšou metódou používanou pri meraní hrúbky veľmi tenkých mazacích filmov.

Podľa Hartla [2] sa používajú dva základné spôsoby vyhodnocovania interferenčných obrazcov. Prvý je založený na spektrálnom rozklade farieb, pri ktorom vznikajú pružky rovnakého chromatického rádu. Pomer hrúbky mazacieho filmu k vlnovej dĺžke je tu konštantný. Druhý je založený na kvantitatívnom porovnávaní farieb medzi vyhodnocovaným interferogramom a interferogramom získaným pomocou interferenčnej sústavy so známou geometriou.

V tomto prípade ide o meranie tenkej mazacej vrstvy rozloženej okolo ocelevej guľičky pritlačenej na priehľadný, sklenený disk. Obr.4 ukazuje základný princíp tohto typu merania. Svetelné vlny znázornené lúčom i dopadajú na optické rozhranie medzi skleneným diskom a tenkou vrstvou maziva v bode A, kde sa časť lúča odráza a časť lúča sa láme. Tá časť, ktorá prenikla do vrstvy maziva sa odráza v bode B. Odrazené lúče r_1 a r_2 interferujú a vytvárajú interferenčný obrazec, z ktorého je možné určiť hrúbku maziva. Rozsah merateľnej hrúbky maziva závisí na koherencii svetla emitovaného použitým zdrojom. Pri dostatočne veľkej hrúbke je koherencia natoľko potlačená, že lúče r_1 a r_2 spolu nedokážu interferovať. [4] Väčšie hrúbky maziva potom interferenčnou metódou nedokážeme odmerať.



Obr. 7 Odraz a lom lúčov na rozhraní dvoch optických prostredí.

2.2 Typy svetiel pri meraní tenkých mazacích vrstiev

2.2

2.2.1 Biele svetlo

2.2.1

Výhoda bieleho svetla pri meraní interferenčnou metódou spočíva v množstve farieb, ktoré biele svetlo obsahuje. Keďže každá farba interferuje konštruktívne (resp. deštruktívne) v rôznych hĺbkach mazacieho filmu kvôli rozdielnym vlnovým dĺžkam, môžeme hrúbku maziva odmerať vo viacerých vzdialenostiach od stredu kontaktu guľičky a disku, takže je výsledný interferenčný obrazec informatívnejší.

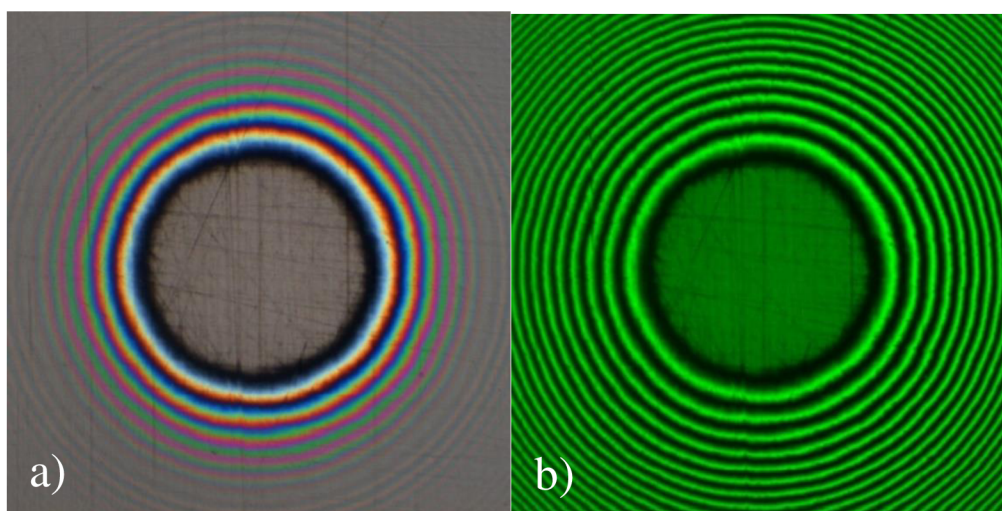
Nevýhodou je malá koherenčná vzdialenosť, teda vzdialenosť, v ktorej si svetlo zachováva určitý stupeň koherencie. Kvôli tejto vlastnosti biele svetlo vytvára interferenčný obrazec len do pomerne malej hrúbky maziva čo je vidieť na obr. 8a.

2.2.2 Monochromatické svetlo

2.2.2

Koherenčná vzdialenosť monochromatického svetla je výrazne vyššia a preto môže interferovať pri väčších hrúbkach maziva. Oproti bielemu svetlu sa jeho vlnová dĺžka pohybuje v úzkom pásme spektra.

Kvôli tomuto faktoru majú svetlé prúžky, kde vzniká konštruktívna interferencia väčší rozostup. Preto je výsledný interferenčný obrazec na obr. 8b menej informatívny ako pri bielom svetle.



Obr. 8 Interferenčný obrazec vytvorený pomocou zdroja: a) bieleho svetla b) monochromatického

2.3 Cieľ práce

2.3

Cieľom tejto práce je navrhnuť a skonštruovať trichromatický zdroj svetla s úzkopásmovými LED diódami, ktorý zachová informatívnosť interferenčného obrazca pri použití bieleho svetla a rozsah merateľnej hrúbky maziva pri použití monochromatického svetla.

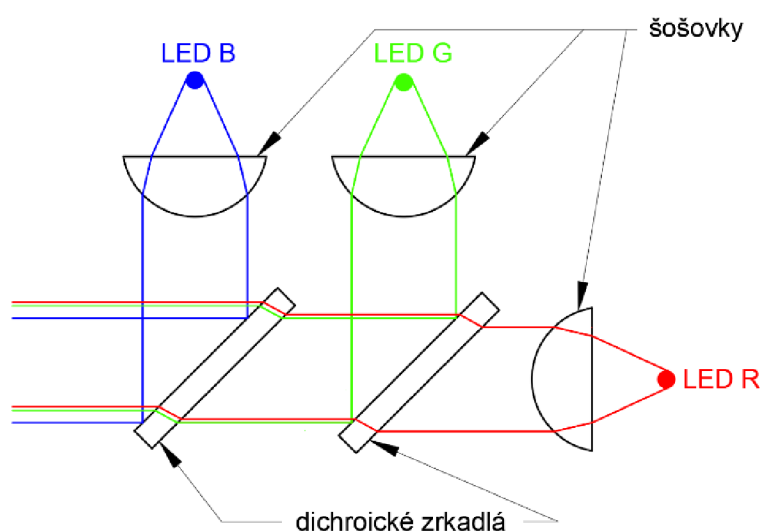
3 KONCEPČNÉ RIEŠENIE

3

3.1 Základný koncept

3.1

Základom pre vytvorenie trichromatického zdroja je prepojenie troch kolimovaných lúčov svetla cez polopriepustné zrkadlá. V tomto prípade ide o kombináciu červeného, zeleného a modrého svetla cez dve dichroické zrkadlá podľa obr. 9. LED diódy sú umiestnené v ohniskových vzdialenostiach od kolektorových šošoviek, aby si zväzky lúčov zachovali rovnobežnosť.



Obr. 9 Tvorba bieleho svetla v osvetľovacom zdroji

3.2 Výber LED diód

3.2

Pri výbere LED diód sa bral ohľad najmä na ich rozsah vlnových dĺžok, svetelnú účinnosť a dodávaný príkon. V ideálnom prípade by svetelné lúče z LED zdrojov boli monochromatické, teda by mali jednu konkrétnu vlnovú dĺžku. Reálne diódy sú zdrojom elektromagnetického vlnenia s vlnovými dĺžkami z určitých intervalov. Vybrané boli LED diódy Cree® XLamp® XP-E2 od firmy Digi-Key s vlnovými dĺžkami v intervaloch:

RED: $\lambda \in (620\text{nm} \sim 630\text{nm})$

GREEN: $\lambda \in (520\text{nm} \sim 535\text{nm})$

BLUE: $\lambda \in (465\text{nm} \sim 485\text{nm})$

3.3 Výber optických elementov

1. Šošovky

Na základe geometrických rozmerov a ohniskovej vzdialenosti bola zvolená asferická, kolektorová šošovka ACL25416U-A s ohniskovou vzdialenosťou 16mm.

2. Dichroické zrkadlá

Dichroické zrkadlá sú zrkadlá s výrazne odlišnou schopnosťou priepustnosti a odrazu svetla pri dvoch rozdielnych vlnových dĺžkach. Vďaka tejto vlastnosti sa dajú použiť na kombinovanie alebo rozklad lúčov svetla s rôznymi farbami a teda rozdielnymi vlnovými dĺžkami. Medzná vlnová dĺžka, pri ktorej nastáva prechod medzi odrazivou a priepustnou vlastnosťou zrkadla sa označuje ako *cutoff wavelength*.

Dichroické zrkadlá môžeme rozdeliť do dvoch kategórií:

Shortpass – prepúšťajú svetlo s vlnovou dĺžkou pod hranicou cutoff

Longpass – prepúšťajú svetlo s vlnovou dĺžkou nad hranicou cutoff

Pre účely navrhovaného trichromatického zdroja boli zvolené dve zrkadlá s cutoff hranicami 490 nm a 567 nm. Zrkadlá boli vybrané z kategórie longpass z dôvodu nižšej ceny.

3.4 Umiestnenie LED diód a dichroických zrkadiel

Poloha zrkadiel voči LED diódam závisí na dvoch najdôležitejších faktoroch. V prvom rade to závisí na tom, či sú použité longpass alebo shortpass dichroické zrkadlá. Keďže boli zvolené zrkadlá z kategórie longpass musí byť najvzdialenejšia LED dióda od bajonetu červená pretože má najväčšiu vlnovú dĺžku. Druhá musí byť zelená a posledná modrá. Toto usporiadanie je znázornené na obr.5.

Ďalší dôvod pre znázornené uloženie spočíva v obmedzenej odrazivosti a priepustnosti dichroických zrkadiel. Pri ich osvetlení teda dochádza k stratám svetelného toku jednotlivých diód.

Maximálne svetelné toky jednotlivých diód môžeme vypočítať podľa vzťahu:

$$\Phi_{max} = K \cdot P_{max} = K \cdot I_{max} \cdot U_{max}$$

Kde

Φ_{max} [lm] je maximálny svetelný tok

K [lm/W] - svetelná účinnosť LED diódy

P_{max} [W] - maximálny príkon dodávaný dióde

I_{max} [A] - maximálny prúd

U_{max} [V] - maximálne napätie

	K [lm/W]	I _{max} [A]	U _{max} [V]	Φ _{max} [lm]
RED	109	0,9	2,58	253,1
GREEN	121	0,9	3,62	394,2
BLUE	45	0,9	3,35	135,7

Tabuľka 1 Vypočítané hodnoty maximálnych svetelných tokov LED diód

Podľa tabuľky 1 má najmenší svetelný tok modrá dióda. Jej najefektívnejšia pozícia je preto najbližšie k bajonetu podľa obr.5 kde osvetľuje len jedno z dvoch zrkadiel.

4 KONŠTRUKČNÉ RIEŠENIE

4

4.1 Optomechanická časť

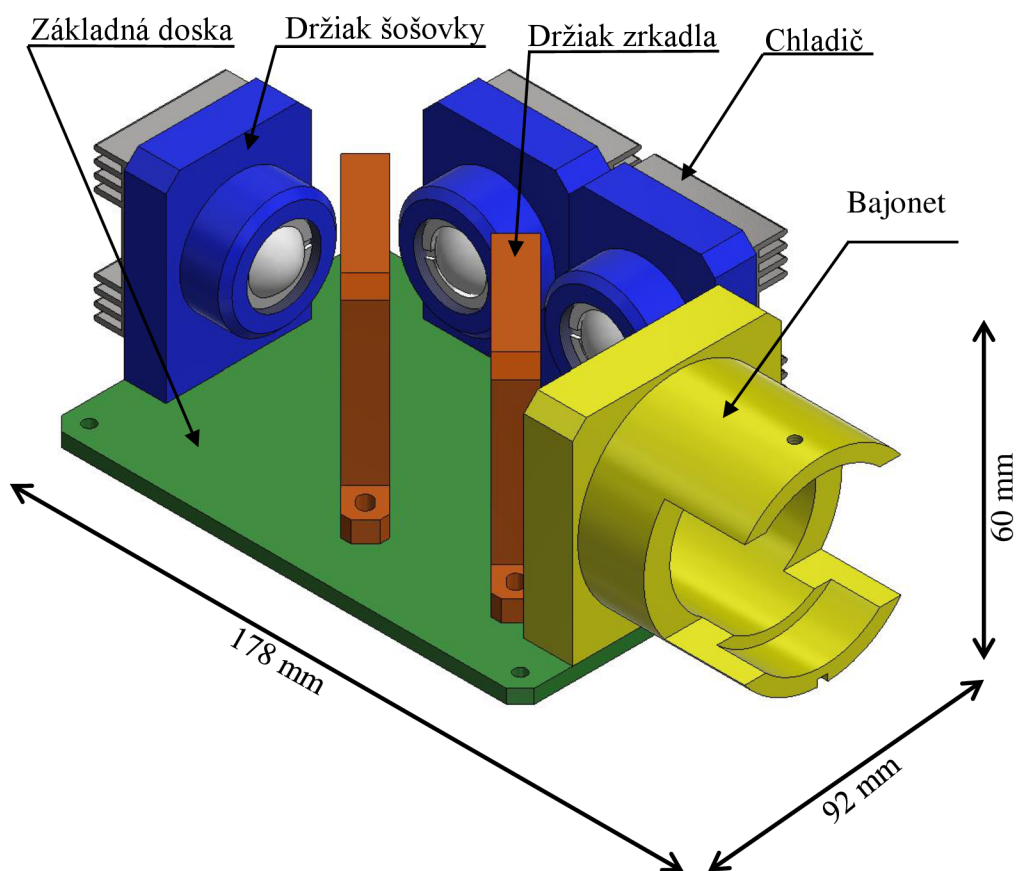
4.1

Návrh optomechanickej časti, celá výkresová dokumentácia a 3D model boli realizované v programe Autodesk Inventor 2018.

4.1.1 Variant 1

4.1.1

Na obrázku 10 je zostava prvej varianty konštrukčného riešenia LED zdroja svetla. Držiaky šošoviek a držiaky zrkadiel sú na základnú dosku pripevnené skrutkami M3x16. Bajonet je uchytený pomocou dvoch skrutiek M4x16 a je totožný s Bajonetom vo variante II. Pretože bol zrealizovaný variant II je Bajonet popísaný v časti, ktorá sa venuje variante II.

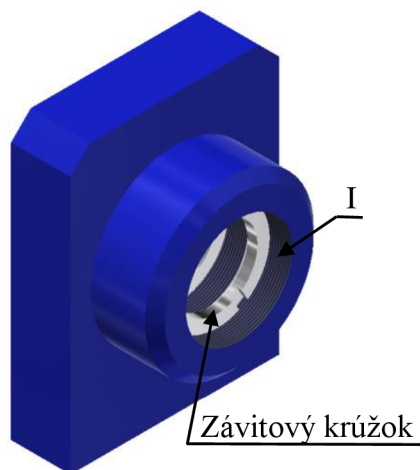


Obr. 10 LED zdroj svetla variant 1

Držiaky šošoviek

Držiaky šošoviek, ktoré sú zároveň držiakmi LED diód majú závitové diery (I), v ktorých je šošovka uchytená medzi dvoma závitovými krúžkami. Dôvodom takéhoto riešenia je možnosť meniť polohu šošoviek do potrebnej vzdialenosti.

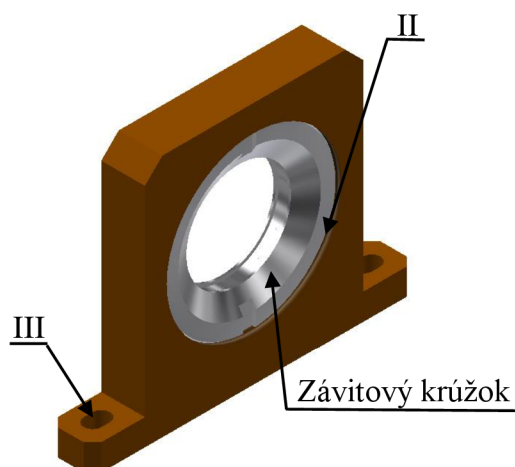
LED diódy sú uchytené na pasívne chladiče, ktoré sú následne pripevnené na samotné držiaky šošoviek. .



Obr. 11 Držiak šošovky (variant I)

Držiaky zrkadiel

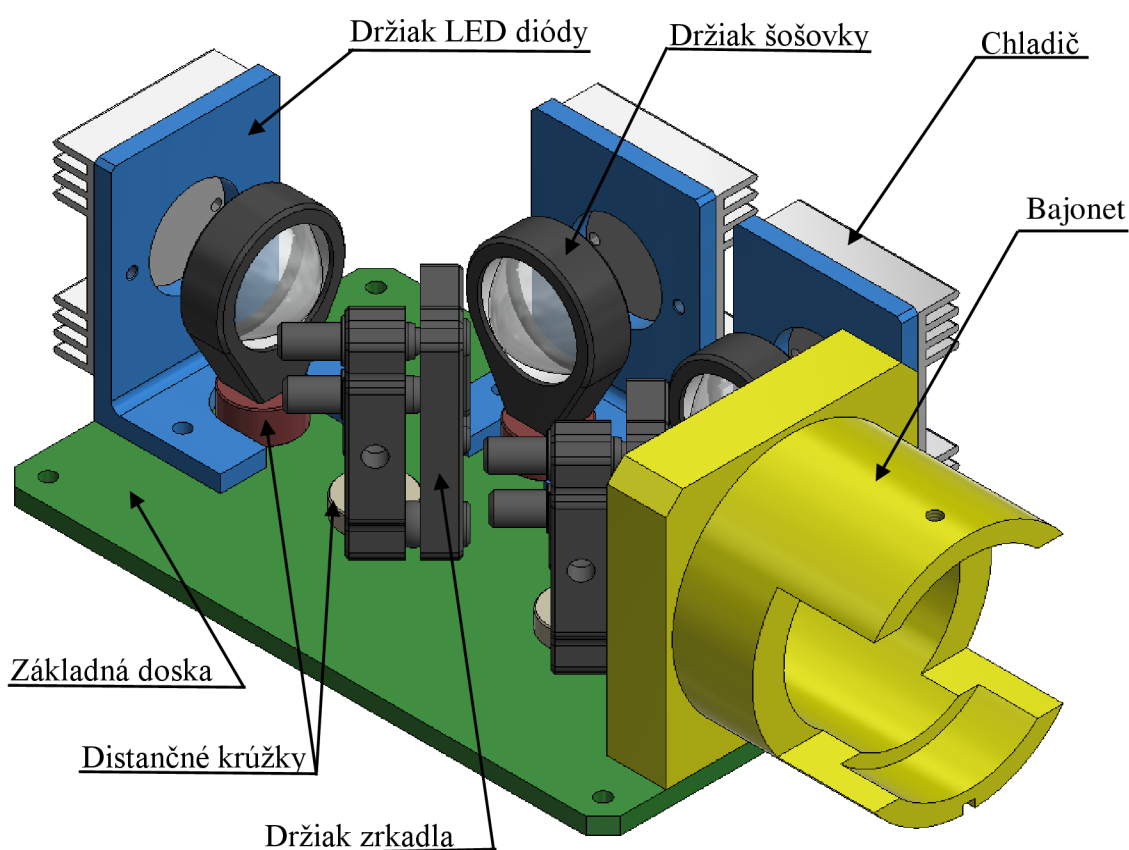
Závitové diery, v ktorých sú uložené zrkadlá (II) majú rovnakú funkciu polohovateľnosti ako závitové diery v držiakoch šošoviek. Držiak zrkadla je na základnú dosku pripevnený cez podlhovasté diery (III) kvôli možnosti posuvu do potrebnej polohy. Pre dosiahnutie čo najmenšieho vytienenia zväzku svetla na hranách závitových krúžkov, ktoré držia zrkadlá sú vnútorné hrany zrazené pod uhlom 60°.



Obr. 12 Držiak zrkadla (variant I)

4.1.2 Variant 2

Oproti variantu I sú na základovú dosku pripevnené držiaky na LED diódy vyrobené z L profilu. Takéto riešenie má oproti pôvodnému dve prednosti. Prvou je menšia hmotnosť a druhou ľahšia obrobiteľnosť. Aj v tomto prípade je LED dióda prichytená priamo na chladič, ktorý je priskrutkovaný na L profil. Celkové rozmery zostavenia sú rovnaké ako vo variante I.



Obr. 13 LED zdroj svetla variant 2

Bajonet

Bajonet bol pre výrobu navrhnutý z duralového, tyčového polotvaru so štvorcovým prierezom. Na základovú dosku sa dá pripevniť pomocou dvoch skrutiek M4x16 s ultranízkou valcovou hlavou, kvôli malej hrúbke plechu základnej dosky. Časť bajonetu, ktorá sa pripája na mikroskop je navrhnutá podľa existujúceho bajonetu pôvodného zdroja svetla. Hlavnou podmienkou je kompatibilita s mikroskopom NIKON Eclipse LV150. Tolerancie boli volené s ohľadom na túto podmienku. Konštrukcia bajonetu je teda podmienená existujúcim stavom a je rovnaká pre oba varianty konštrukčného riešenia.

Držiak šošovky

Náročnosť kusovej výroby pôvodne navrhovaného riešenia držiakov šošoviek je po konzultácii s odborníkmi (školské dielne, dielne firmy MEOPTA) príliš vysoká. Rovnako sa to týka aj výroby držiakov zrkadiel.

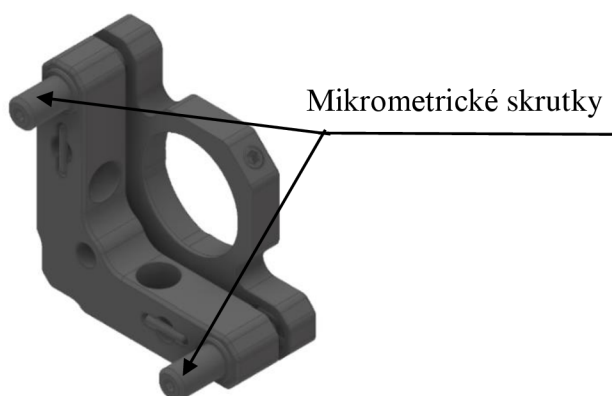
Jednoduchším, dokonca aj cenovo dostupnejším riešením je zvoliť niektorý zo sériovo vyrábaných držiakov. Na základe ceny a kompaktnosti bol pre vybranú asférickú šošovku ACL25416U-A zvolený fixný držiak LMR1/M na obr. 14. Šošovka je umiestnená medzi dvoma pridržiavacími krúžkami, podobne ako vo variante 1. Medzi základovou doskou a držiakom je dištančný krúžok. Ten zabezpečuje, že os kolimovaného zväzku bude v rovnakej rovine ako os bajonetu.



Obr. 14 Držiak šošovky

Držiaky zrkadiel

Držiak KM100 na obr. 15 od firmy Thorlabs poskytuje možnosť nakloniť zrkadlo v horizontálnej aj vo vertikálnej osi pomocou mikrometrických skrutiek, pričom si zachováva kompaktnosť a je cenovo výhodnejší. Podobne ako držiak šošovky LMR1/M je k základnej doske pripevnený cez dištančný krúžok kvôli zachovaniu spoločnej roviny kolimovaných lúčov.

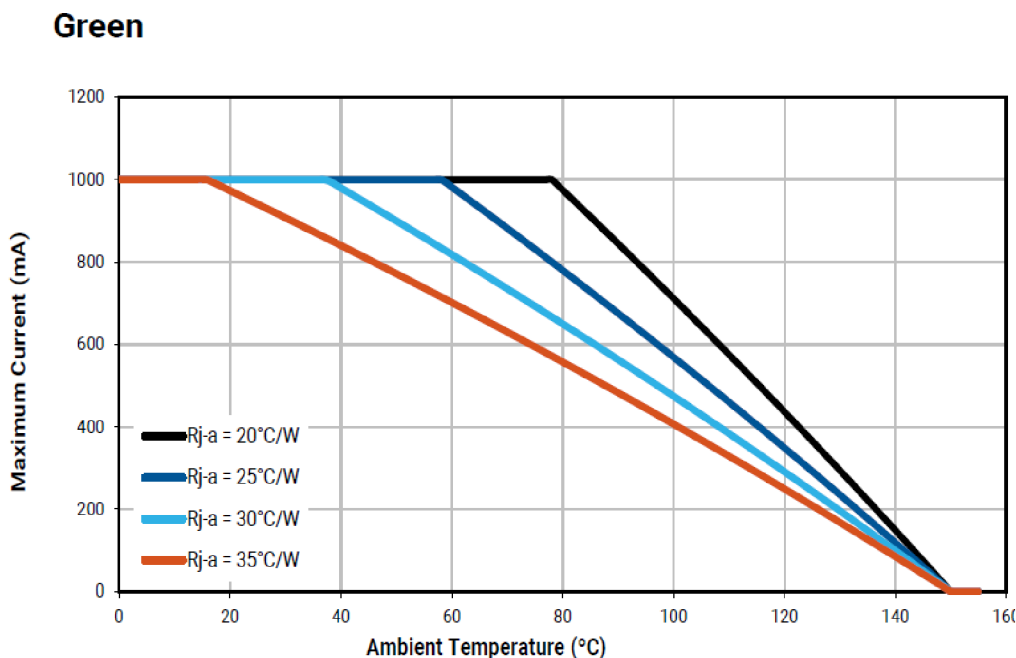


Obr. 15 Držiak zrkadla (variant II)

Chladič

Pri výbere chladičov sa vychádzalo z dátového listu CREE XLampXPE2, ktorý je dostupný v katalógu predajcu použitých LED diód. Podľa dátového listu je najrizikovejšia zelená LED dióda, ktorá má aj najväčší príkon. V grafe na obr. 16 je zobrazená hraničná teplota okolia pri určitých tepelných odporoch PN priechodu a okolitého prostredia R_{j-a} pri maximálnom prúde, ktorý môže trvale tiecť diódou a to je 1 A. Pri tepelnom odpore PN priechodu a prostredia $25\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$ nesmie pri dlhodobej záťaži a maximálnom prúde 1 A presiahnuť teplota okolia $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Chladič teda môžeme voliť najmä s ohľadom na geometriu a hmotnosť svetelného zdroja výkonnejši, než je nutný vzhľadom na potrebný tepelný odpor.

Zvolený bol jednostranne rebrový chladič CH 17/37 z eloxovaného hliníka s tepelným odporom $8\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$. Chladič je teda značne predimenzovaný ale vďaka malým rozmerom a nízkej hmotnosti je pre daný návrh ideálnou možnosťou. Na obr. 8 je zobrazený v optomechanickej zostave.



Obr. 16 Graf hranice teplôt okolia pre zelenú (G) diódu

4.2 Elektrická časť

Návrh elektrickej časti zariadenia spočíva v návrhu regulovateľného napájania. LED diódy vyžadujú napájanie jednosmerným napätím výrobcom predpísanej veľkosti, pričom toto napätie musíme vedieť plynule znižovať na nulu. V princípe by bolo možné použiť laboratórny zdroj, ktorý je bežnou súčasťou vybavenia laboratória. Požiadavkou ale je, aby bolo možné regulovať každú diódu samostatne. To už predstavuje 3 zdroje, čo je nepraktické. Najjednoduchším riešením je preto vybrať zo

širokej ponuky vhodný stabilizovaný zdroj, ktorý premieňa napätie siete $\sim 230\text{V}/50\text{ Hz}$ na jednosmerné napätie vhodnej veľkosti s dostatočným výkonom. Diódy potom zapojíme paralelne na tento AC adaptér.

Zvolené diódy majú výrobcom stanovené tieto parametre:

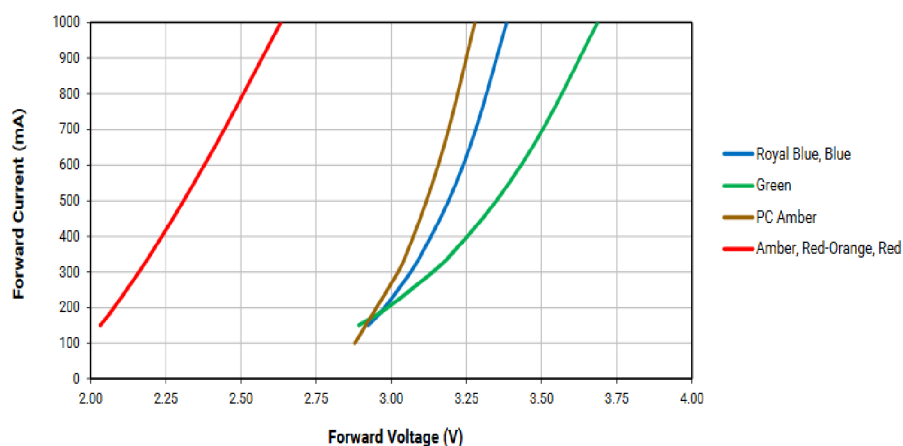
U_D – menovitý úbytok napätia na dióde

I_{nom} – menovitý prúd diódou

I_{max} – maximálny prúd diódou

U_{max} – úbytok napätia na dióde pri maximálnom prúde – tento údaj je odčítaný z volt-ampérovej charakteristiky dostupnej v Datasheets výrobcu.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS - COLOR ($T_j = 25^\circ\text{C}$)



Obr. 17 Volt-ampérové charakteristiky použitých diód

Z volt-ampérových charakteristík vyplýva, že najvyššie napätie je potrebné pre zelenú diódu 3,62 V. Volíme teda najbližšiu vyššiu hodnotu AC adaptéra, čo je $U_{AC} = 5\text{ V}$.

Súčet všetkých maximálnych prúdov pri maximálnom rozsvietení diód je:

$3 \times 0,9 = 2,7\text{ A}$. Najbližšia vyššia hodnota s rezervou je $I_{AC} = 4\text{ A}$. Súčin týchto hodnôt potom určí výkon adaptéra $P_{AC} = U_{AC} \cdot I_{AC}$; $P_{AC} = 5 \cdot 4 = 20\text{ W}$

Napájacie napätie spoločné pre všetky diódy bude teda 5V. To by cez diódy pretlačilo vyšší prúd než je maximálny prípustný. Aby sme zabezpečili, že jednotlivé diódy nebudú zničené vysokým prúdom je potrebné vypočítať predradný rezistor pred každú diódu ako jej ochranu. Použijeme jednoduchú aplikáciu Ohmového zákona.

$$R_P = \frac{(U_{AC} - U_{\text{max}})}{I_{\text{max}}} \quad [\Omega]$$

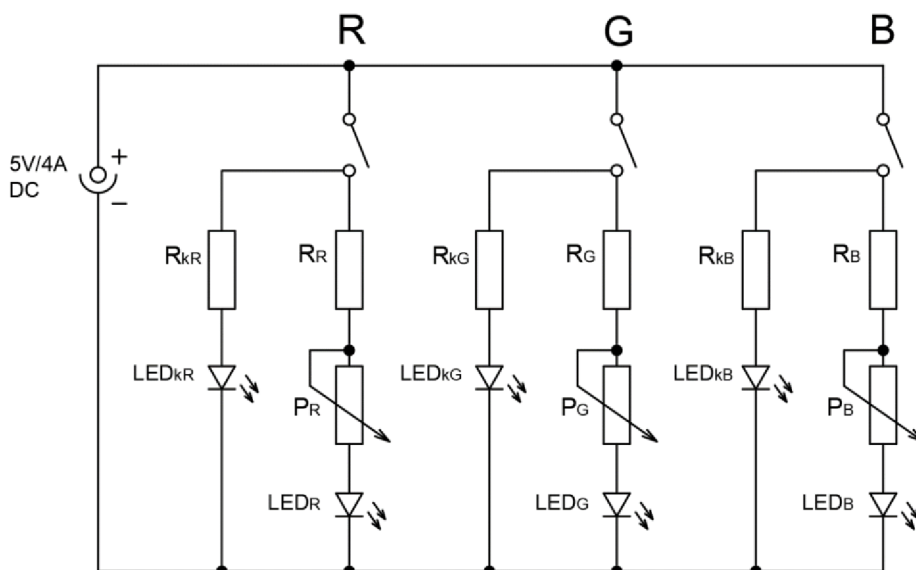
Reálny predradný rezistor R_{PR} určíme ako najbližšiu dostupnú hodnotu z výrobného radu rezistorov. Pre výber vhodného rezistora ešte potrebujeme vedieť jeho výkonovú stratu, ktorú počítame zo vzťahu:

$$P_R = (U_{AC} - U_{\text{max}}) \cdot I_{\text{max}} \quad [\text{W}]$$

Pre reálny rezistor volíme najbližšiu vyššiu hodnotu výrobného radu R_{PR} .

Do série s predradným rezistorom bude zapojený potenciometer. Zvyšovaním jeho odporu potom znižujeme prúd v obvode. Z vlastností použitých LED diód vyplýva, že ani pri plnom odpore potenciometra dióda neprestane úplne svietiť. Aby bolo možné jednotlivé farby svetla vypínať úplne, je potrebné doplniť elektrické zapojenie samostatnými vypínačmi pre R, G aj B vetvu.

Výsledná schéma zapojenia potom bude vyzerat' nasledovne:



Obr. 18 Schéma zapojenia elektrickej časti

	U_D [V]	I_{nom} [mA]	I_{max} [mA]	U_{max} [V]	R_P [Ω]	R_{PR} [Ω]	P_R [W]	P_{RP} [W]
RED	2,2	350	900	2,58	2,69	2,7	2,178	2,2
GREEN	3,2	350	900	3,62	1,53	1,5	1,242	1,5
BLUE	3,1	350	900	3,35	1,83	1,8	1,485	1,5

Tabuľka 2 Vypočítané hodnoty rezistorov

Vzorový výpočet pre RED:

$$R_P = \frac{(U_{AC} - U_{max})}{I_{max}} = \frac{(5 - 2,58)}{0,9} = 2,69 \Omega, \text{ najbližšia hodnota výrobného radu je } 2,7 \Omega$$

$$P_R = (U_{AC} - U_{max}) \cdot I_{max} = (5 - 2,58) \cdot 0,9 = 2,178 \text{ W}, \text{ najbližšia hodnota výrobného radu je } 2,2 \text{ W}$$

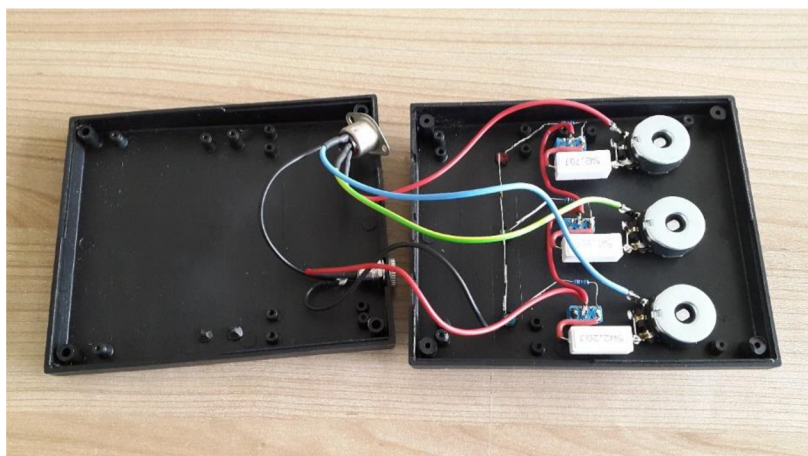
Vzhľadom na malé cenové rozdiely budú mať však všetky rezistory maximálnu povolenú výkonovú stratu 3W. Hodnota je mierne predimenzovaná, ale všetky tri hodnoty potrebné pre ovládací modul boli s týmto výkonom nielen dostupné (podľa kontroly skladových zásob e-shopu), ale aj cenovo prijateľné.

Výber potenciometrov P_R , P_G , P_B bol determinovaný požiadavkou na reguláciu jasu diód. Dôležité sú krajné polohy potenciometrov. Požadujeme, aby pri krajnej polohe pre maximálny jas bol odpor potenciometra bližiaci sa nule. Tejto požiadavke najlepšie vyhovujú drôtové potenciometre. Aby sa dal jas viditeľne znížiť, musí byť prúd diódou pod hodnotou, pre ktorú výrobca udáva volt-ampérovú charakteristiku, čo je podľa obr. 17 približne 100 mA. Zvolili sme potenciometre s hodnotou 100 Ω , ktoré dokážu obmedziť prúd diódou na menej ako 50 mA.

Pre zabezpečenie komfortu ovládania sú prvky pre reguláciu svietivosti jednotlivých diód svetelného zdroja vložené do univerzálnej prístrojovej krabičky. Na vrchnej strane sú vyvedené kontrolné LED pre indikáciu napájania jednotlivých svetelných diód v samotnom zdroji.



Obr. 19 Nakúpené komponenty pre elektrickú časť



Obr. 20 Vnútorne zapojenie elektrickej časti



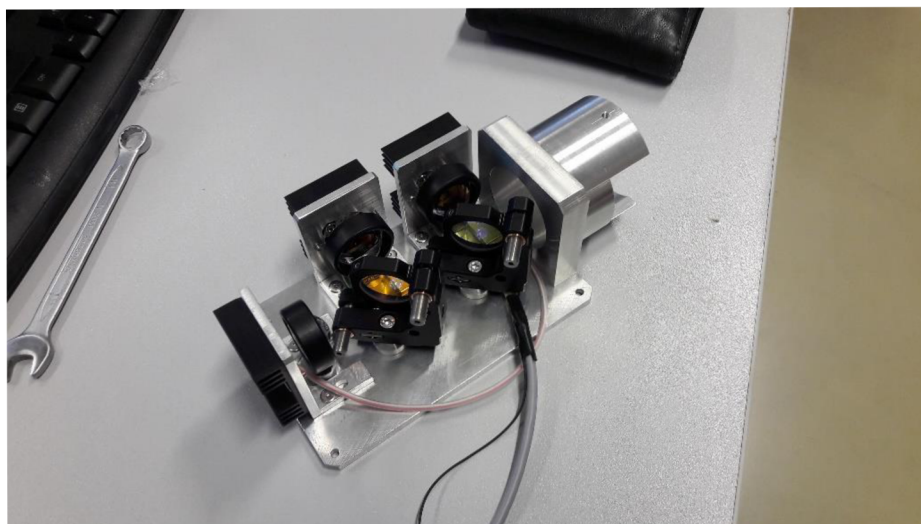
Obr. 21 Vonkajší vzhľad elektrickej časti

4.4 Ekonomický rozbor

4.4

Položky	Typ	Cena [Kč]
Obrábané diely		3 970
Elektronické súčasti		1 381
LED diódy	CREE XLampXPE2	400
Chladiče	CH 17/37	168
Držiaky šošoviek	LMR1/M	1 059
Držiaky zrkadiel	KM100	1 794
Šošovky	ACL25416U-A	1 915
Dichroické zrkadlá	DMLP490/567	7 991
Ostatné		1 500
Cena spolu v Kč		20 178

Tabuľka 3 Cenová kalkulácia celkových nákladov



Obr. 22 Fotografia funkčného zdroja I

5 DISKUSIA

5

5.1 Overenie funkčnosti a dosiahnuté výsledky

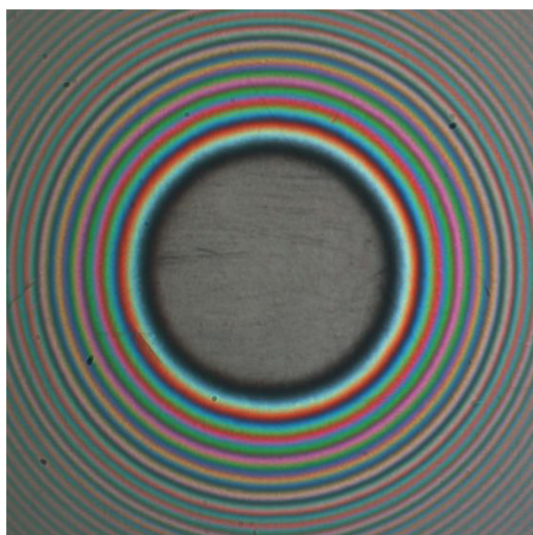
5.1

Overovanie funkčnosti po zostavení prebiehalo pri dvoch typoch merania. Ako prvá bola odmeraná hrúbka maziva okolo statického kontaktu guličky na sklenenom disku. Druhý typ merania spočíval v meraní hrúbky maziva okolo guličky, ktorá sa odvaľovala po otáčajúcom disku.

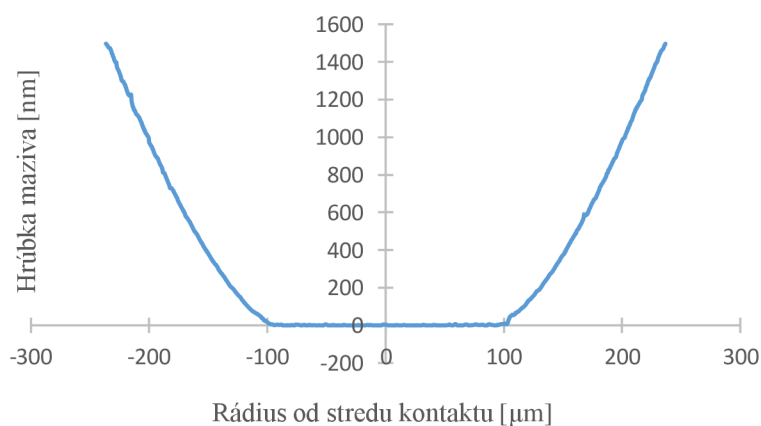
5.1.1 Výsledky merania pri statickom kontakte

5.1.1

Pretože sa gulička nepohybuje vytlačuje z kontaktnej plochy všetko mazivo a teda centrálna hrúbka maziva je nulová. To môžeme vidieť na Obr. 23 kde je zobrazená závislosť hrúbky maziva na rádiuse od stredu kontaktnej plochy.



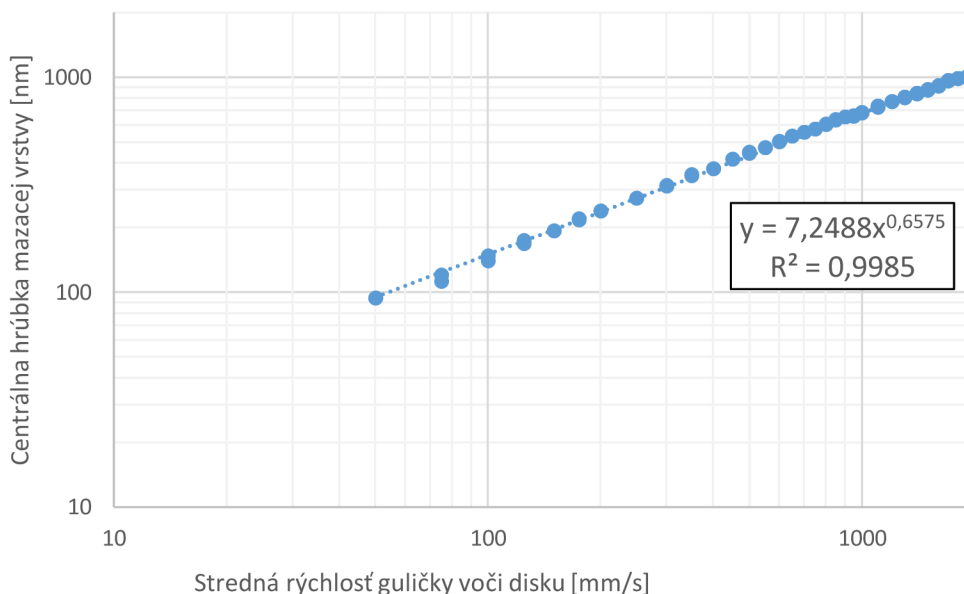
Obr. 23 Interferenčný obrazec pri osvetlení trichromatickým zdrojom



Obr. 24 Graf závislosti hrúbky maziva na rádiuse od stredu kontaktu pri nepohybujúcej sa guličke

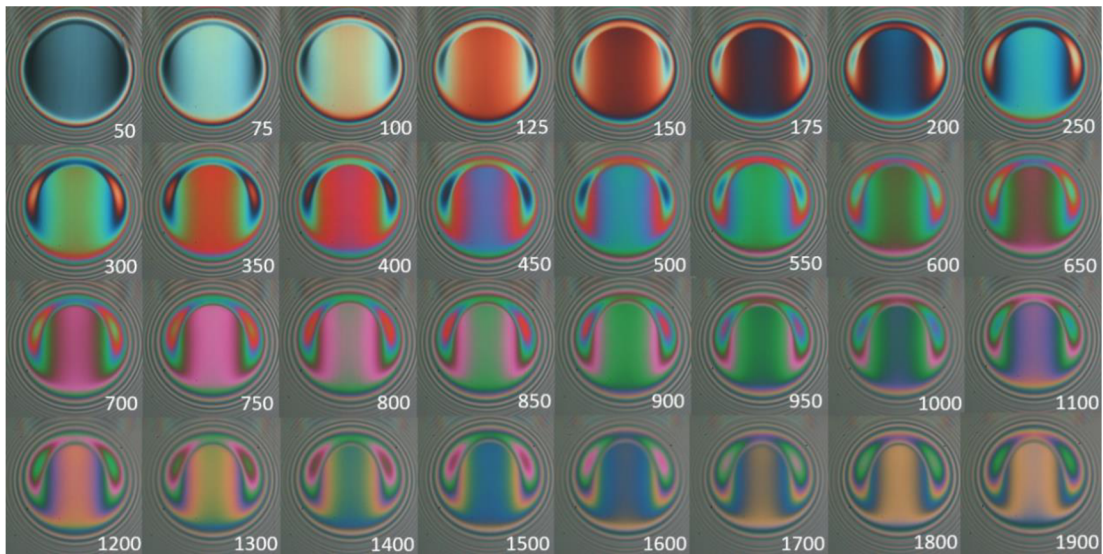
5.1.2 Výsledky merania pri dynamickom kontakte

Gulička, ktorá sa odvaľuje po sklenenom disku nemá čas na to aby z kontaktnej plochy vytlačila mazivo a tak je centrálna hrúbka maziva nenulová. So zvyšujúcou rýchlosťou sa znižuje aj čas, ktorý má guľička na vytlačenie a tým pádom sa zvyšuje aj centrálna hrúbka maziva. Závislosť centrálnej hrúbky maziva na strednej rýchlosti guľičky je zobrazená na obr. 25. Z grafu je vidieť, že ide o mocninovú závislosť.

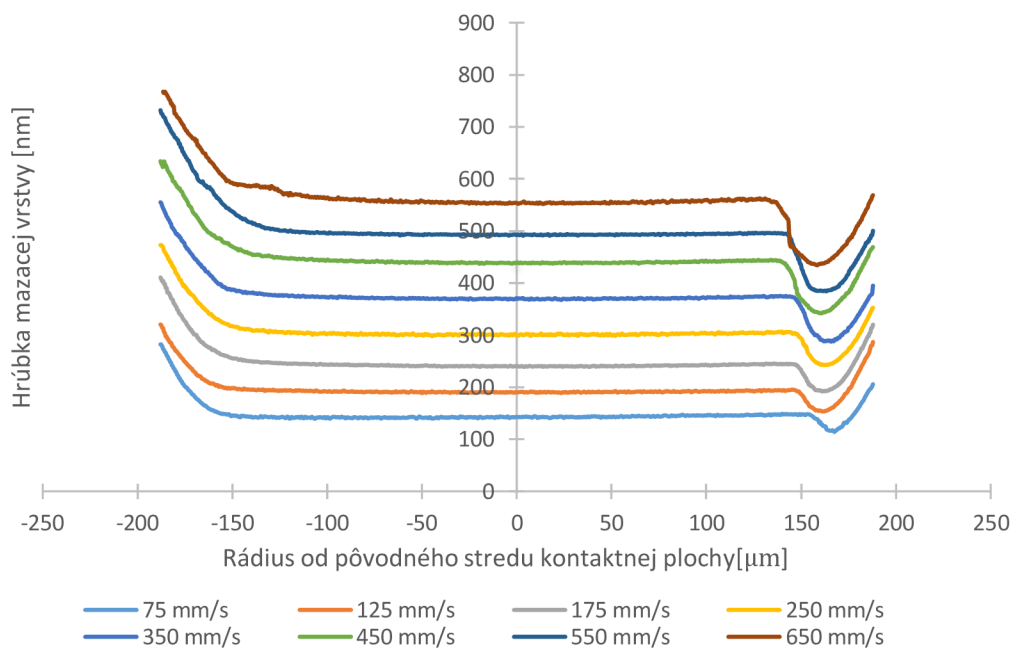


Obr. 25 Graf závislosti centrálnej hrúbky maziva na strednej rýchlosti guľičky

Kvôli interferencii sa so zvyšujúcou rýchlosťou mení tiež farba kontaktnej plochy ako je zreteľné z obr.26 . Pozorovateľná je tiež nerovnomernosť rozloženia maziva okolo guľičky v dôsledku jej pohybu. Táto nerovnomernosť je vyhodnotená na obr. 27 ako závislosť hrúbky maziva na rádiuse pri pohľade z profilu na kontakt a pri určitých stredných rýchlostiach guľičky.



Obr. 26 Interferenčné obrazce pri rozličných rýchlostiach (uvedené v pravom dolnom rohu v mm/s)



Obr. 27 Profily hrúbok maziva pri rôznych rýchlostiach guľičky po sklenenom disku

Hlavným cieľom Bakalárskej práce bolo navrhnuť a zrealizovať trichromatický osvetľovací zdroj pre optický tribometer Nikon Eclipse LV150, ktorý by rozšíril rozsah merateľných hrúbok mazacích vrstiev.

Prvá časť práce je venovaná teoretickému rozboru problematiky osvetľovacích zdrojov mikroskopov. Podrobne sú popísané ich princípy a vlastnosti, z ktorých vyplývajú prednosti či negatíva pre ich použitie v mikroskopoch.

V druhej časti je načrtnutá problematika merania tenkých mazacích vrstiev, kde má významnú funkciu práve interferenčná metóda. Porovnané sú možnosti metódy pri použití bieleho a monochromatického svetla. Práve zdroj bieleho svetla tvorený skladaním troch monochromatických svetiel môže spojiť výhody týchto dvoch prístupov. Spomenuté sú aj komerčne dodávané trichromatické zdroje, ich cena však prevyšuje 120 000 Kč.

V tretej časti je navrhnutý koncept výsledného zdroja. Biele svetlo je tvorené pomocou červenej (R), zelenej (G) a modrej (B) LED diódy.

Štvrtá časť práce sa zaoberá konštrukčným riešením. V dvoch variantoch predstavuje postupnú optimalizáciu návrhu. Tiež sú definované mechanické a elektrické súčiastky, ktoré bolo výhodnejšie kúpiť u komerčných dodávateľov. Výstupom tejto časti sú dve samostatné prílohy bakalárskej práce. Prvou prílohou je kompletná výkresová dokumentácia tých mechanických dielov, ktoré boli zadané do výroby. Druhou prílohou je zrealizovaný samotný osvetľovací zdroj s napájaním a reguláciou jednotlivých diód.

Piata časť je venovaná analýze výsledkov experimentálneho merania. Tie potvrdili, že trichromatický zdroj skutočne rozšíril rozsah merateľných hrúbok mazacích vrstiev. Dobré výsledky boli dosiahnuté aj pri hrúbkach okolo 1500 nm, čo je výrazný posun oproti 900nm, ktoré bolo možné na prístroji merať doteraz, pri použití polychromatického bieleho svetla. Ako ukazuje ekonomická analýza, za cenu zdroja celkom 20 178 Kč.

Práca tak splnila vytýčené ciele a zrealizovaný osvetľovací zdroj je funkčný. Môže sa ďalej používať v tribologickom laboratóriu.

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] SUCHORUKICH V. S *Mikroskop a dalekohled*, Naše vojsko 1953, 68 stran.
- [2] HARTL, Martin: *Velmi tenké elasto-hydrodynamické mazací filmy*, Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 187 ISSN 1213-418X, VUT Brno, FSI, Brno 2005.
- [3] HARTL, Martin *Studium a měření velmi tenkých mazacích filmů*, habilitační práce, VUT Brno, FSI, Brno 2002.
- [4] HALLIDAY D., RESNICK R., WALKER J. *Fyzika 2*, Nakladatelství VUTIUM, Antonínská 1, Brno 2008, ISBN 978-80-214-4123-1.
- [5] MALACARA, D. a MALACARA, Z.: *Handbook of optical design*. 2nd ed, Marcel Dekker, New York 2004. ISBN 08-247-4613-9.
- [6] LOŠŤÁK, M. *Programovatelná osvětlovací soustava pro optický mikroskop*. Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 54 s.
- [7] DVOŘÁČEK, Vladimír, Ing. *Světelné zdroje – světelné diody*, Časopis Světlo, 2009/5
- [8] HABEL, Jiří. *Světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2013, 622 s. ISBN 978-80-86534-21-3.
- [9] SLABÝ, T. *Osvětlovací soustava pro konfokální mikroskop s duálním rastrováním*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 76 s.

INTERNETOVÉ ZDROJE

- [10] Kolektiv autorov, *Moderná mikroskopia a digitálne spracovanie obrazu*, Bratislava 2008, ISBN: 978-80-89186-37-2. Dostupné z: http://www.mikroskopia.sk/materials/skripta_mikroskopia.pdf
- [11] BORN M. and WOLF E. *Principles of optics*. Cambridge University Press, 1999. 952 p. ISBN 0521642221.
- [12] BÁRTKOVÁ R.: *Interferenční mikroskopy*, 2002 [online]. Dostupné z: http://www.fch.vutbr.cz/~zmeskal/obring/prednasky_2005/03_interferencni_mikroskop
- [13] MIKŠ, Antonín. *Mikroskop – Mikroskopy* [online]. *Zobrazovací metody v optické mikroskopii*. Dostupné z: <http://www.mikroskopmikroskopy.cz/mikroskopicke-metody/>
- [14] DAVIDSON, M. W. - ABRAMOVITZ, M.: *Optical Microscopy*. [online]. Dostupné z: <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/pdfs/microscopy.pdf>
- [15] TARJÁNYI, Norbert: *Základy optických systémů*, Katedra fyziky, EF ŽU, dostupné na: <http://tarjanyi.fyzika.uniza.sk/Teaching/Coherence.pdf>
- [16] WOLFF, Christian: *Semiconductors*. [online]. Dostupné z: <http://www.radartutorial.eu/21.semiconductors/hl07.en.html>

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN

Skratka	Význam
LED	Light emitting diode – svetlo emitujúca dióda
PN	spojenie polovodiča s pozitívnymi a negatívnymi nosičmi náboja

Symbol	Jednotka	Popis
n	-	index lomu optického prostredia
Θ	$^{\circ}$	uhol dopadu/odrazu svetelného lúča
λ	nm	vlnová dĺžka elektromagnetického vlnenia
\sim	-	harmonický (sinusový) signál
AC	A	striedavý prúd (alternating current)
DC	A	jednosmerný prúd (direct current)
U_D	V	menovitý úbytok napätia na dióde
I_{nom}	A	menovitý prúd diódou
I_{max}	A	maximálny prúd diódou
U_{max}	V	úbytok napätia na dióde pri maximálnom prúde
R_{j-a}	$^{\circ}C/W$	tepelný odpor PN priechodu voči okolitému prostrediu
P_X	Ω	potenciometer
R_X	Ω	predradný rezistor
R,G,B	-	červená, zelená, modrá
Φ_{max}	lm	maximálny svetelný tok
K	lm/W	svetelná účinnosť LED diódy
P_{max}	W	maximálny príkon dodávaný dióde
P_R	W	stratový výkon rezistora

ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV

Obr. 1 Porovnanie kritického (dolu) a Köhlerovho osvetlenia (hore)	10
Obr. 2 Štruktúra polovodiča typu N (upravené zo [16])	12
Obr. 3 Štruktúra polovodiča typu P (upravené zo [16])	12
Obr. 4 štvor-chromatický zdroj svetla firmy Thor Labs	13
Obr. 5 Vnútorný pohľad 4-chromatického zdroja	14
Obr. 6 Ovládač LED diód	14
Obr. 7 Odraz a lom lúčov na rozhraní dvoch optických prostredí.	15
Obr. 8 Interferenčný obrazec vytvorený pomocou zdroja: a) bieleho svetla b) monochromatického	16
Obr. 9 Tvorba bieleho svetla v osvetľovacom zdroji	17
Obr. 10 LED zdroj svetla variant 1	20
Obr. 11 Držiak šošovky (variant I)	21
Obr. 12 Držiak zrkadla (variant I)	21
Obr. 13 LED zdroj svetla variant 2	22
Obr. 14 Držiak šošovky	23
Obr. 15 Držiak zrkadla (variant II)	23
Obr. 16 Graf hranice teplôt okolia pre zelenú (G) diódu	24
Obr. 17 Volt-ampérové charakteristiky použitých diód	25
Obr. 18 Schéma zapojenia elektrickej časti	26
Obr. 19 Nakúpené komponenty pre elektrickú časť	27
Obr. 20 Vnútorné zapojenie elektrickej časti	27
Obr. 21 Vonkajší vzhlľad elektrickej časti	27
Obr. 22 Fotografia funkčného zdroja I	28
Obr. 23 Interferenčný obrazec pri osvetlení trichromatickým zdrojom	29
Obr. 24 Graf závislosti hrúbky maziva na rádiuse od stredu kontaktu pri nepohybujúcej sa guličke	29
Obr. 25 Graf závislosti centrálnej hrúbky maziva na strednej rýchlosti guličky	30
Obr. 26 Interferenčné obrazce pri rozličných rýchlostiach (uvedené v pravom dolnom rohu v mm/s	31
Obr. 27 Profily hrúbok maziva pri rôznych rýchlostiach guličky po sklenenom disku	31

ZOZNAM TABULIEK

Tabuľka 1 Vypočítané hodnoty maximálnych svetelných tokov LED diód	19
Tabuľka 2 Vypočítané hodnoty rezistorov	26
Tabuľka 3 Cenová kalkulácia celkových nákladov	28

ZOZNAM PRÍLOH

1. Funkčný model osvetľovacieho zdroja
2. Kompletná výkresová dokumentácia osvetľovacieho zdroja