



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

ÚPRAVA FOKUSAČNÍ ČÁSTI STOLNÍ SESTAVY PRO LASEROVOU SPEKTROSKOPII LIBS

MODIFICATION OF THE FOCUSING PART OF THE TABLE-TOP SETUP FOR LASER INDUCED
BREAKDOWN SPECTROSCOPY (LIBS)

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JÁN BOROVSÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Mgr. OTA SAMEK, Dr.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav fyzikálního inženýrství

Akademický rok: 2011/12

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Ján Borovský

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Fyzikální inženýrství a nanotechnologie (3901R043)**

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:

Úprava fokusační části stolní sestavy pro laserovou spektroskopii LIBS

v anglickém jazyce:

Modification of the focusing part of the table-top setup for Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS)

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Technika laserové spektroskopie (LIBS) využívá záření mikroplazmy, vytvořené fokusováním laserového svazku pulzního laseru na povrch vzorku (v pevném, kapalném nebo plynném skupenství) pomocí fokusačního objektivu. Pro optimální nastavení je důležité správné zaostření laseru pomocí navigační kamery, která používá stejnou optickou trasu a stejný fokusační objektiv.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je úprava optických prvků a návrh nového konstrukčního řešení stávající fokusační části stolní sestavy pro spektrometrii laserem indukovaného plazmatu. Úprava by měla zvýšit světelnost a zvětšit zorné pole navigační kamery, zamezit ničení kamery zpětným odrazem laseru (mechanicky) a zachovat vakuovou těsnost interakční komory.

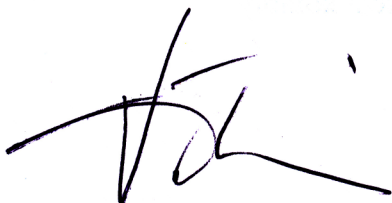
Seznam odborné literatury:

[1] MIZIOLEK, A.; PALLESCHI, V.; SCHECTER, I.: Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) Fundamentals and Applications. Cambridge University Press, 2006, ISBN:978-0-521-85274-6

Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Ota Samek, Dr.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/12.

V Brně, dne 23.11.2011



prof. RNDr. Tomáš Šíkola, CSc.
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

Abstrakt

Táto bakalárska práca rieši funkčné úpravy fokusačnej časti stolnej zostavy pre laserovú spektroskopiu LIBS. Hlavné požiadavky kladené na upravený návrh zahŕňali zväčšenie zorného poľa navigačnej kamery, zvýšenie svetelnosti zostavy a zabránenie ničenia kamery žiarením plazmy. Tieto požiadavky boli splnené v novom návrhu optického stojana, ktorý obsahuje možné riešenia väčšieho fokusačného objektívu, nového dielektrického zrkadla a mechanickej uzávierky. Časti navrhnutého riešenia budú použité v návrhu nových interakčných komôr pre analýzu LIBS pre firmu Tescan.

Summary

This bacheolor thesis solves functional modifications of the foccusing part of the table-top setup for laser induced breakdown spectroscopy LIBS. Main requirements for modified draft includes increasing view field of the navigation camera, increasing the setup's aperture and prevention of the camera destruction by radiation of plasma. These requirements were fulfilled in new draft of optical stand including possible solution as enlarging focusing lens, new dielectric mirror and mechanical iris shutter. Some elements of proposed solution will be used in suggestion of Tescan company's new interaction chambers for LIBS analysis.

Kľúčové slová

LIBS, optický stojan, fokusačný objektív, dielektrické zrkadlo, konštrukcia

Keywords

LIBS, optical setup, focusing lens, dielectric mirror, construction

BOROVSKÝ, J. *Úprava fokusační části stolní sestavy pro laserovou spektroskopii LIBS*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 45 s.
Vedoucí bakalářské práce Mgr. Ota Samek, Dr.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že svoju bakalársku prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

V Brne, dňa

.....
(podpis autora)

POĎAKOVANIE

Ďakujem vedúcemu mojej bakalárskej práce Mgr. Otovi Samekovi, Dr. za odborné vedenie a Ing. Radomírovi Malinovi, Ph.D. a Ing. Davidovi Prochazkovi za konzultácie, podnetné pripomienky a korekcie k tejto práci.

OBSAH

Obsah	1
Úvod	3
1 LIBS	5
1.1 Zostava LIBS	5
1.1.1 Laser	6
1.1.2 Fokusačná optika	7
1.1.3 Spektrometer	7
1.2 Zostava LIBS na ÚFI FSI VUT	8
2 Optický stojan	11
2.1 Zariadenia v optickom stojane	12
2.2 Potreba zmien v konštrukcii a funkčnosti	12
2.2.1 Popis problému	12
2.2.2 Ciele návrhu a optimalizácie	13
3 Konštrukčno-optické riešenie	15
3.1 Trasovanie	15
3.2 Fokusačný objektív	17
3.2.1 Sférický singlet	17
3.2.2 Asférický singlet	22
3.2.3 Asférický dublet	24
3.2.4 Viacšošovkový objektív	25
3.3 Konštrukčné riešenie	26
3.3.1 Príruba	26
3.3.2 Vákuový priezor	26
3.3.3 Posuv fokusačného objektívu v interakčnej komore	27
3.3.4 Dielektrické zrkadlo	28
3.3.5 Uzávierka	29
3.3.6 Ochranný kryt	29
3.3.7 Osvetlenie vzorky	30
4 Meranie	33
4.1 Zväčšenie zorného poľa	33
4.2 Vplyv objektívu na ablačný kráter	34
Záver	35
Zoznam použitých veličín, jednotiek a skratiek	37
Zoznam obrázkov a tabuliek	39
Zoznam príloh – výkresová dokumentácia	41
Použitá literatúra	43

ÚVOD

V súčasnosti je materiálová analýza nenahraditeľným nástrojom takmer v každom odvetví vedy, výskumu či priemyslu. Slúži predovšetkým na určovanie zloženia látok, hodnotenie ich kvality alebo na optimalizáciu rôznych výrobných postupov. Vďaka potrebe analyzovať rozličné materiály (kovy, plasty, organické látky, ...) vo všetkých skupenstvách (pevné, kvapalné, plynné) vzniklo množstvo analytických metód, ktoré umožňovali skúmať atomárne zloženie látok, prípadne ich molekulárnu štruktúru, ako aj pomery zastúpenia jednotlivých prvkov.

Tieto metódy môžeme deliť podľa toho, aký fyzikálny princíp využívajú. Jednou z najstarších fyzikálnych¹ metód je svetelná spektroskopia. Jej základy položil už William H. Wollaston, ktorý pozoroval tmavé čiary v slnečnom spektre (1802), Joseph Fraunhofer, ktorý ako prvý meral ich vlnové dĺžky (1812), a tiež Gustav Kirchhoff a Robert Bunsen, ktorí v roku 1859 zistili, že tmavé čiary zodpovedajú jednotlivým chemickým prvkom [1]. Tieto závery umožnili napríklad objavenie dovtedy neznámych prvkov, aj keď fyzikálna podstata tohto javu jasná nebola. Spektroskopickou metódou založenou na rozdielnom princípe je hmotnostná spektroskopia. Túto metódu umožnili pozorovania Eugena Goldsteina z roku 1886, ktorý pozoroval „kanálové lúče“² pri výbojoch v nízkom tlaku a Wilhelma Wiena, ktorý zistil, že sú citlivé na prítomnosť elektrického a magnetického poľa, čo umožnilo pozorovať hmotnostné spektrá iónov na základe pomeru m/Q [2].

Rozvoj kvantovej fyziky začiatkom 20. storočia umožnil vedcom pochopiť mnohé, už pomerne dlho známe javy a s pochopením ich fyzikálnej podstaty ich využiť na presnú analýzu. Jedným z týchto javov sú aj typické emisné a absorbné spektrá jednotlivých atómov, pozorované pri svetelnej spektroskopii, no uspokojivo vysvetliť ich vznik a príslušnosť k jednotlivým atómom umožnilo až pochopenie kvantovej podstaty mikrosвета, ktorá zahŕňa existenciu energetických hladín v atómoch, prechody medzi nimi a súvislosť³ s vyžarovanými, resp. pohlcovanými fotónmi.

Tento pomerne jednoduchý princíp získavania informácií o zložení látok mal za následok vznik niekoľkých spektrografických metód, ktoré pomocou rôznych mechanizmov excitácie elektrónov na vyššie energetické hladiny a ich následného spádu umožňujú určiť zloženie látky. Jednou z nich je spektroskopia laserom budenej plazmy (LIBS), ktorá je ideálnym riešením v podmienkach, umožňujúcich len minimálnu (prípadne žiadnu) prípravu vzorky a vyžadujú pomerne presné výsledky v reálnom čase. Pri tejto metóde navyše dochádza len k minimálnemu poškodeniu vzorky (odparenie rádovo μg materiálu).

Dôvodov na úpravy a vylepšenia súčasných zostáv LIBS je niekoľko. Analýza touto metódou má isté limity, ktoré sa prejavujú napríklad v tom, že metóda nie je absolútna, t.j. je potrebná kalibrácia pomocou štandardu so známym zložením. Ďalej je to nízka presnosť stanovenia koncentrácie prvkov, s neistotou typicky 5 – 10%, ktorá naďalej stúpa s klesajúcou koncentráciou prvkov [5]. Na zlepšenie detekčných limitov, spresnenie a zrýchlenie merania sú možné dva prístupy. Jedným z nich je kombinácia LIBS s inými spektroskopickými

¹Metódy analytickej chémie [3], či metalurgie [4] na skúmanie zloženia látok boli známe už skôr.

²V origináli „Kanalstrahlen“ [2].

³ $E = \frac{hc}{\lambda}$

metódami, ako je plazmová hmotnostná spektrometria alebo laserová fluorescencia. Druhou metódou je zlepšovanie klasickej metódy LIBS so snahou odstrániť všetky vplyvy, ktoré môžu negatívne ovplyvňovať meranie.

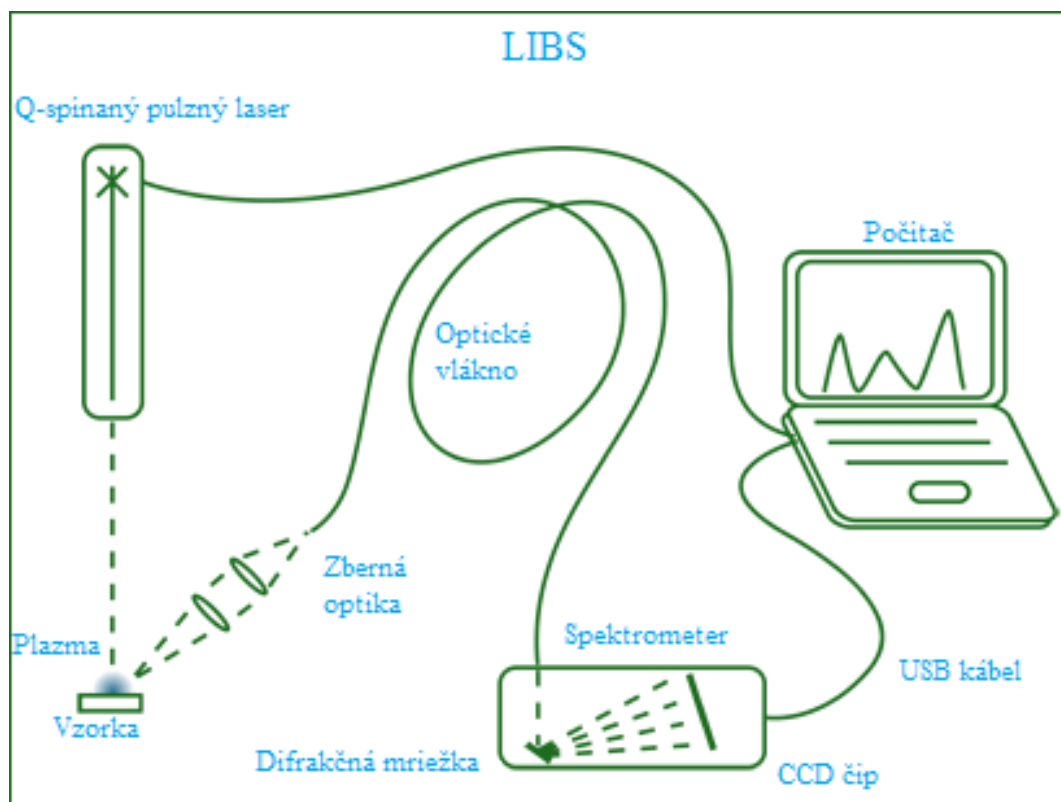
Podmienkou pre získanie spektra pre materiállovú analýzu je vznik plazmy odparením a následnou ionizáciou skúmaného materiálu. Aby však bola plazma použiteľná, musí spĺňať určité parametre závislé na podmienkach jej vzniku [6 – 14]. Presnejšie podmienky vzniku plazmy sú popísané v kapitole 1. Dôležitým parametrom metódy LIBS je veľkosť stopy, do ktorej je fokusovaný laserový zväzok. Optimalizáciou fokusačnej optiky je stopu možné zmenšiť na minimum, čo spôsobí zmenšenie ablačného krátera a zvýši priestorové rozlíšenie metódy. Aby bol ablačný kráter čo najmenší, je potrebné umiestniť ho čo najpresnejšie do ohniskovej roviny fokusačnej optiky. Jednou z možností, ako to dosiahnuť, je využiť kameru, ktorá zobrazuje povrch vzorky priamo cez fokusačnú šošovku (viď. kapitola 2). Pre optimálne zobrazenie vzorky je nevyhnutné aj kvalitné osvetlenie.

1 LIBS

Laserová spektroskopia je metóda materiálovej analýzy založená na princípe vytvorenia mikroplazmy zo skúmaného materiálu pomocou krátkeho (rádovo nanosekundy) laserového pulzu s energiou v rozsahu desiatok až stoviek mJ na jeden pulz a fokusačnej optiky [15]. Fokusovaný laserový zväzok interaguje s povrchom vzorky – dochádza k ohriatiu, roztaveniu, odpareniu, atomizácii a ionizácii malého množstva materiálu a vzniku žiariacej mikroplazmy. Plazma krátko po svojom vytvorení začína chladnúť. Po jednotkách μs sa rekombináciou zo vzniknutých iónov stávajú neutrálne atómy, ktoré sa postupne dostávajú do svojho základného stavu spádom⁴ excitovaných elektrónov na nižšie energetické hladiny, pričom zaznamenávame žiarenie presných vlnových dĺžok zodpovedajúcich prechodom medzi jednotlivými hladinami. Toto charakteristické žiarenie pre každý atóm je pomocou zbernej optiky transportované na vstup spektrometra a spracované v počítači, čo umožňuje na základe získaného spektra detekovať jednotlivé prvky, z ktorých sa skladá ablatovaná časť vzorky.

1.1 Zostava LIBS

Zostava LIBS nemá dané jednoznačné zapojenie alebo usporiadanie. Toto sa môže líšiť podľa konkrétnych požiadaviek, avšak zapojenie základných prvkov je vždy rovnaké. Usporiadanie typickej zostavy LIBS je možné vidieť na obrázku 1.1.



Obr. 1.1: Typické usporiadanie zostavy LIBS. Prevzaté z [16], upravené.

⁴breakdown (angl.)

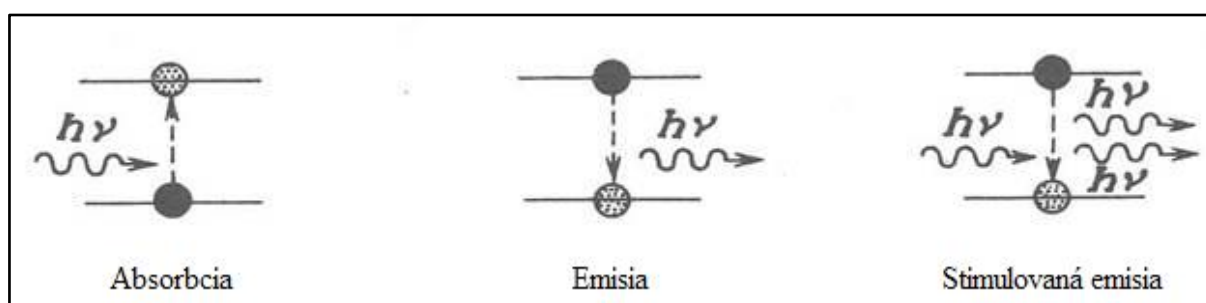
⁵
$$P(E) = \frac{e^{-\frac{E}{kT}}}{\sum_l e^{-\frac{E_l}{kT}}}$$

Aparatúra pre laserovú spektroskopiú pozostáva z niekoľkých základných častí:

- laser
- fokusačná optika
- zberná optika
- spektrometer
- počítač s príslušným softvérom

1.1.1 Laser

Z angl. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation je zložitý zariadenie využívajúce zákony kvantovej mechaniky na zosilňovanie svetla pomocou stimulovanej emisie žiarenia (obr. 1.2). Základným princípom jeho funkcie je excitácia elektrónov na vyššie energetické hladiny a ich následný zostup spojený s vyžarovaním svetla na vlnovej dĺžke zodpovedajúcej energetickému rozdielu týchto hladín. Tento jav by však nebol možný bez existencie tzv. metastabilných hladín, na ktorých zostáva elektrón dostatočne dlho na to, aby sa stretol s iným fotónom a mohla prebehnúť stimulovaná emisia (normálna dĺžka života excitovaného stavu elektrónu je zhruba 10^{-8} s, čo je príliš krátka doba na to, aby elektróny vo vybudenom stave interagovali s fotónmi). Preto je možné využiť iba niektoré druhy látok, v ktorých existujú vyššie spomínané metastabilné hladiny. Takáto látka sa nazýva aktívne prostredie a tvorí základnú súčasť každého laseru.

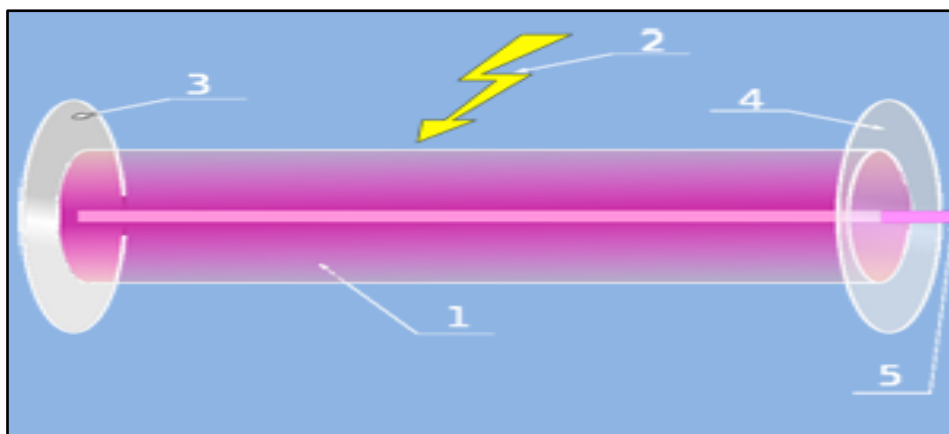


Obr. 1.2: Absorbcia, emisia a stimulovaná emisia fotónu. Prevzaté z [17], upravené.

Aktívne prostredie je vložené do optického rezonátora tvoreného jedným nepriepustným a jedným polopriepustným zrkadlom, ktoré zabezpečia, že výsledný lúč bude nerozbiehavý, a taktiež aktívne podporujú rast populácie fotónov v aktívnom prostredí. Fotóny potrebné pre naštartovanie stimulovanej emisie sa dodávajú budením svetelným zdrojom alebo elektrickým poľom (obr. 1.3). Po istom čase dôjde v aktívnom prostredí k inverzii populácie. Znamená to, že existuje viac atómov v excitovanom ako v základnom stave. Tento jav, ktorý odporuje známemu Boltzmannovmu rozdeleniu⁵, je vysvetliteľný s využitím teórie kvantovej elektrodynamiky. Pre pulzný mód laseru používaný v laserovej spektroskopii je nutné využiť tzv. Q-spínanie⁶, ktoré pomocou elektrooptického modulátora a polarizačného filtra umožňuje brzdiť nárast počtu atómov v excitovanom stave, a teda spúšťať pulz presne v dobe, keď je to potrebné.

⁵ $P(E) = \frac{e^{-\frac{E}{kT}}}{\sum_l e^{-\frac{E_l}{kT}}}$

⁶Q - switch (angl.)



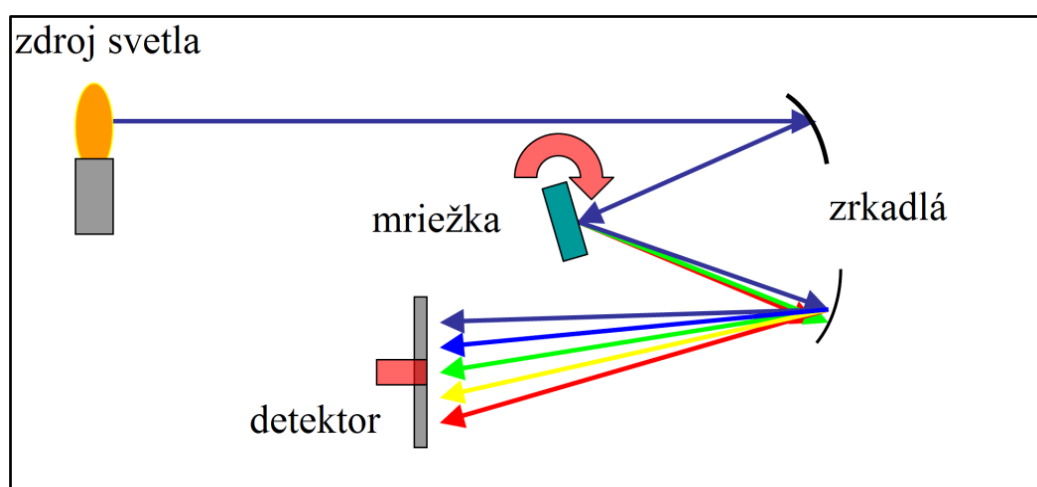
Obr. 1.3: Hlavné časti laseru. 1 – aktívne prostredie, 2 – budenie aktívneho prostredia, 3 – zrkadlo, 4 – polopriepustné zrkadlo, 5 – laserový lúč. Prevzaté z [18].

1.1.2 Fokusačná optika

Jednou z hlavných výhod metódy LIBS je jej relatívna nedeštruktívnosť. Preto je dôležité, aby laser pri dopade na vzorku a vytvorení plazmy zanechal na povrchu čo najmenšiu možnú ablačnú stopu. Na veľkosti stopy sa podieľajú hlavne dva parametre, a to dĺžka pulzu [15] a priemer laserového zväzku v rovine povrchu vzorky. Ideálnym riešením by bola fokusácia lúča do jedného bodu (okrem zmenšenia stopy aj zvýšenie merného výkonu pulzu vztiahnutého na plochu). Tomuto však bránia chyby optických sústav, preto je snaha optimalizovať fokusačnú optiku tak, aby priemer stopy nebol väčší ako priemer prvého difrakčného maxima, ktoré nezávisí od kvality optiky, a teda je hraničným limitom, na ktorý sa je možné dostať.

1.1.3 Spektrometer

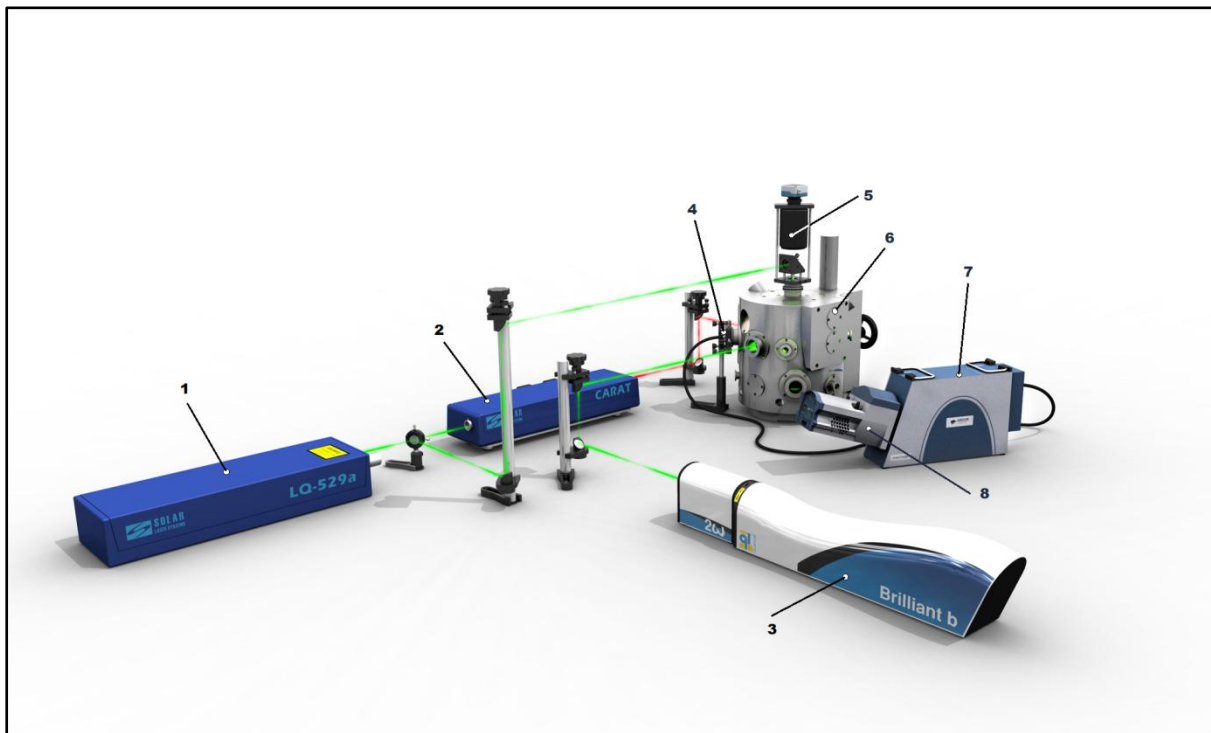
Zozbieraná časť žiarenia produkovaného plazmou putuje cez optické vlákno do spektrometra. Spektrometer využíva sústavu hranolov, zrkadiel a difrakčných mriežok, ktorými rozkladá prichádzajúce svetlo na jeho jednotlivé zložky. Tie sú následne zachytené na CCD čip, ktorý dokáže zmerať intenzitu jednotlivých zložiek rozloženého svetla (obr. 1.4).



Obr. 1.4: Schéma spektrometra. Prevzaté z [19], upravené.

1.2 Zostava LIBS na ÚFI FSI VUT

Na Fakulte strojního inženýrství VUT v Brně v Ústavu fyzikálního inženýrství funguje laboratorium laserové spektroskopie už od roku 1995. V laboratoriu je plne funkčná aparátúra umožňujúca analýzy pevných aj kvapalných materiálov (obr. 1.5).



Obr. 1.5: Zostava LIBS (SP & DP) a LIFS na ÚFI FSI VUT⁷. 1 – Nd:YAG laser Solar, 2 – Ti:Sa laser Carat, 3 – Nd:YAG laser Brilliant, 4 – zberná optika, 5 – optický stojan, 6 – interakčná komora, 7 – spektroskop Mechelle, 8 – ICCD kamera.

Ako zdroj laserového žiarenia pre metódu LIBS je využívaný pevnolátkový pulzný Nd:YAG laser Solar LQ-529a, ktorý pracuje na základnej vlnovej dĺžke 1064 nm (IR oblasť spektra) s maximálnou energiou pulzu 500 mJ s možnosťou využitia druhého harmonického módu s vlnovou dĺžkou 532 nm (zelená farba) a energiou 280 mJ. Profil zväzku je flat-top, čo výrazne uľahčuje návrh optiky a hľadanie polohy ohniska pre zaostrenie na vzorku.

Lúč z lasera je vedený cez sústavu zrkadiel do optického stojana. Jeho funkciou je naviesť zväzok do interakčnej komory, fokusovať ho a zároveň umožniť pohľad do komory cez kameru s objektívom. Toto všetko musí optický stojan spĺňať pri zachovaní vákuovej tesnosti komory, resp. zachovaní tesnosti kvôli analýze v inertej atmosfére.

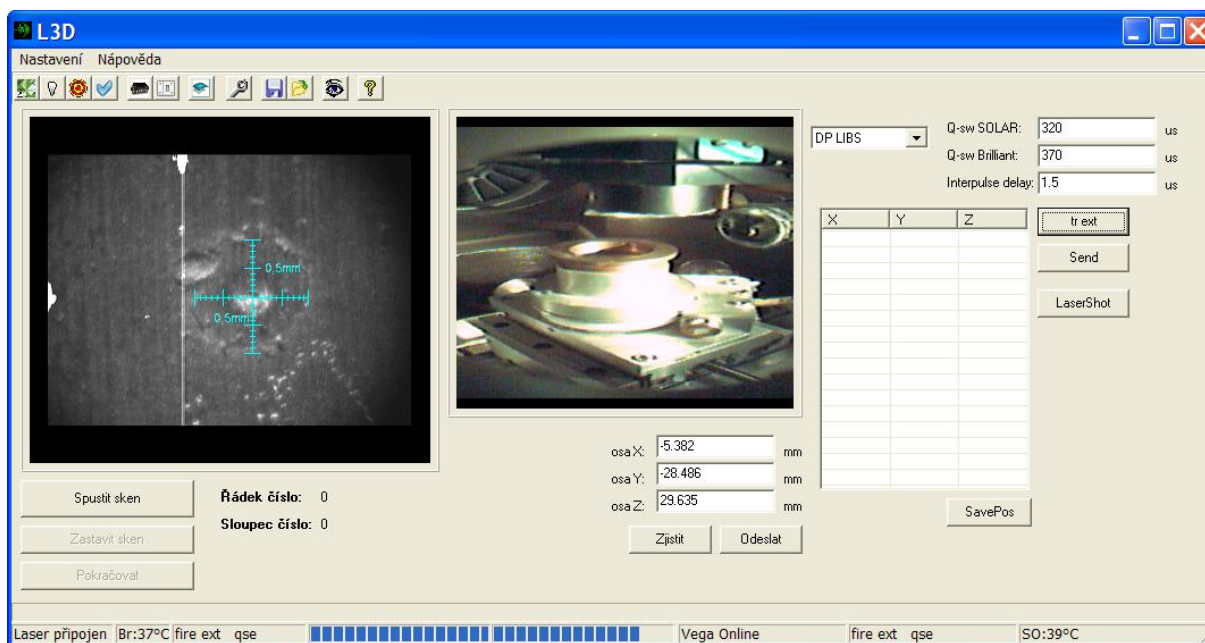
Samotná analýza prebieha v špeciálne upravenej vákuovej komore od firmy Tescan. Vybavenie tejto komory umožňuje trojosý pohyb stolčeka, ktorý slúži na upevnenie vzorky. Tento pohyb je primárne využívaný na umiestnenie vzorky do ohniskovej roviny fokusačnej optiky a na výber vhodného miesta na povrchu vzorky na uskutočnenie analýzy. Komora má nainštalovaných ešte niekoľko priezorov (externé osvetlenie, vstup laserových lúčov pre

⁷S láskavým dovolením Ing. Jana Novotného, upravené.

analýzy LIBS DP a LIFS) a vákuové priechodky, určené na prívod elektrických vodičov do vnútra komory.

Žiarenie zo vzniknutej plazmy je zbierané cez jeden z priezorov vákuovej komory vyrobeného z kremenného skla⁸ a pomocou kolimátora sa vedie optickým káblom do spektrometra. V laboratóriu je využívaný spektrometer Andor Mechelle 5000 spolu s ICCD kamerou Andor iStar 734. Hlavnou prednosťou tohto systému je jeho schopnosť jedným meraním zachytiť a zmerať žiarenie v rozsahu vlnových dĺžok 200 – 975 nm. CCD čip v kamere je navyše chladený na -30 °C, čo výrazne znižuje úroveň šumu v meranom signáli [20].

Celé zariadenie je ovládané z počítača. Posuvy vzorky, ovládanie laserov, fokusácia zväzku, nastavenie spektrometra a vyhodnocovanie získaných dát prebieha pomocou softvéru L3D vytvoreného špeciálne pre tento účel [15]. Tento program spolupracuje s niekoľkými podprogramami, napr. ovládanie posuvu vzorky (program Vega od fy Tescan), algoritmus na umiestnenie vzorky do obrazovej roviny objektívu [21], vyhodnocovanie dát zo spektrometra (program Solis od fy Andor) a nastavovanie laserov. Užívateľské rozhranie tohto softvéru je vidno na obr. 1.6.



Obr. 1.6: Užívateľské rozhranie programu L3D⁹

⁸fused silica (angl.) – sklo, ktoré umožňuje priechod žiarenia aj v UV oblasti

⁹S láskavým dovolením Ing. Davida Prochazku

2 OPTICKÝ STOJAN

Vstup laserového zväzku do vákuovej komory pre analýzu LIBS v rámci laboratória laserovej spektroskopie na ÚFI je riešený komplexnou jednotkou (obr. 2.1) zabezpečujúcou viacero činností [22]. Prvou a zásadnou funkciou je privedenie laserového lúča do komory a jeho zaostrenie na povrch vzorky. Rovnobežný zväzok ku komore prichádza horizontálne a v osi komory je zalomený dielektrickým¹⁰ zrkadlom o 90°, takže smeruje priamo dole, prechádza cez vákuovú priechodku a vstupuje do objektívu, ktorý ho fokusuje do ohniska.



Obr. 2.1: Optický stojan¹¹

Nad zrkadlom je farebná kamera s 1/2`` CCD čipom¹² a s objektívom s premenlivou ohniskovou vzdialenosťou (zoom objektív), ktorý je zaostrený do nekonečna. Obraz vzorky umiestnenej v ohniskovej rovine fokusačného objektívu sa teda zobrazuje do rovnobežného zväzku, ktorý prechádza cez priechodku a zrkadlo (je ochudobnený o príslušnú časť spektra, ktorú zrkadlo odráža) a vstupuje cez zoom objektív do kamery. V sústave má teda svetlo vstupujúce do kamery aj laserový lúč rovnakú optickú dráhu, aj keď svetlo ide v podstate opačnými smermi. Týmto zostavením je zabezpečené, že v čase, keď je obraz na kamere ostrý (vzorka je v obrazovej rovine fokusačného objektívu) aj laserový zväzok je zaostrený presne do roviny povrchu vzorky, a teda sú zabezpečené ideálne podmienky pre vznik mikrop plazmy a jej následnú analýzu. Zaostrovanie je riadené algoritmom na automatický posun vzorky do ohniskovej roviny objektívu [21].

¹⁰Zrkadlo s odrazivou vrstvou tvorenou dielektrikom, ktorého voľbou je možné nastaviť maximálnu odrazivosť pre konkrétnu vlnovú dĺžku (532 nm), ostatné vlnové dĺžky prechádzajú s minimálnou zmenou intenzity.

¹¹S láskavým dovolením Ing. Jana Novotného

¹²6,40 x 4,80 mm

Konštrukčné riešenie umožňuje navyše motorizovaný posuv fokusačného objektívu vo vertikálnom smere (dôležitý najmä pre metódy LIBS DP a LIFS) [22], ktorý je implementovaný do programu L3D [15], a tiež jemné nastavenie uhlu, pod ktorým zrkadlo odráža laserový zväzok do komory. Celé zariadenie je obalené čiernou hliníkovou fóliou, aby sa zabránilo nechceným odleskom laserového svetla do miestnosti, a na potlačenie svetelného šumu vstupujúceho do kamery a obmedzujúce možnosť presného zaostrenia.

2.1 Zariadenia v optickom stojane

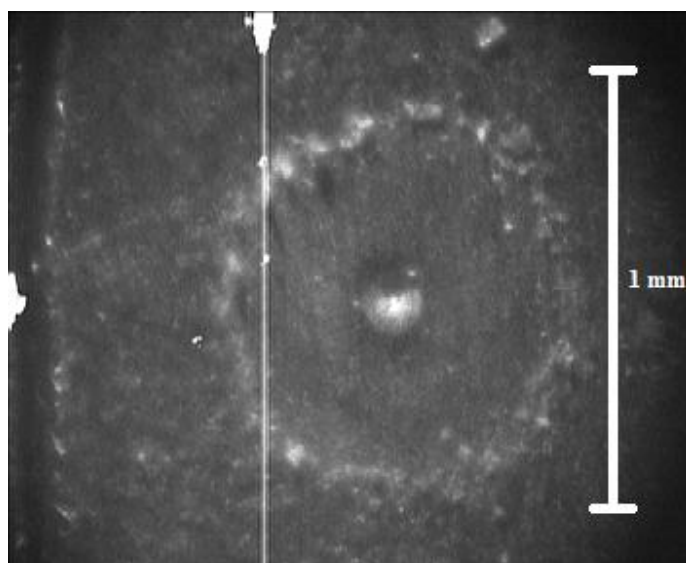
Optický stojan na aparátúre LIBS na ÚFI využíva komerčne dostupné prvky, ktoré boli zostavené do zostavy pomocou súčiastok navrhnutých a vyrobených unikátne pre túto aplikáciu. Ide o kameru Ernitec – ECB282, zoom objektív Eneo – A08Z15NDDCPOIRS, pravouhlý držiak zrkadla Thorlabs – KCB1, vákuovú priechodku MDC – DN25 KF a fokusačný objektív Sill Optics – S6ASS1030/121 .

Súčiastky a diely vyrobené v dielňach na ÚFI sú hlavne držiak kamery a zoom objektívu, záslepka medzi interakčnou komorou a vonkajším prostredím a zariadenie na posuv fokusačného objektívu vnútri vákuovej komory [22]. Všetky tieto časti sú zmontované s využitím systému prírub, držiakov a vodiacich tyčiek od firmy Thorlabs.

2.2 Potreba zmien v konštrukcii a funkčnosti

2.2.1 Popis problému

Postupom času a po mnohých meraniach na zostave LIBS sa začali ukazovať isté nedostatky vo funkčnosti optického stojana, tak, ako bol používaný. Najdôležitejším nedostatkom bolo orezané zorné pole kamery, ktoré sa čiastočne prejavovalo už pri maximálnom priblížení zoom objektívu (zorné pole 1,41 x 1,87mm) (obr. 2.2, obr. 3.2). Tento objektív tak vlastne úplne strácal svoje opodstatnenie v tom zmysle, že vzdďaľovanie objektívom malo za následok iba zmenšujúci sa krúžok s pohľadom na vzorku a čierne okolie. Z tohto bolo jasné, že v optickej dráhe kamery leží niečo, čo výrazne obrezáva zorné pole. Tento fakt v podstate znemožňoval akúkoľvek zmysluplnú orientáciu na povrchu vzorky a prípadné pokusy o nájdenie konkrétneho miesta, ktoré bolo treba zmerať, boli veľmi zložité.



Obr 2.2: Zorné pole kamery pri maximálnom priblížení zoom objektívom

Z obrázku 2.2 sú jasne čitateľné aj ďalšie problémy, ktoré bolo potrebné riešiť. Ide o pomerne nízku svetelnosť celej zostavy, a taktiež jasný pás spálených pixelov v CCD čipe kamery, ktorý vznikol intenzívnym žiarením plazmy, fokusovaným z povrchu vzorky priamo na čip. Toto žiarenie malo evidentne dostatočnú intenzitu na to, aby poškodilo detektor. Žiarenie plazmy aj časť odrazeného laserového svetla sa však rozptyľovalo aj mimo kamery a potenciálne mohlo ohrozovať osoby prítomné počas merania. Tento problém, dočasne riešený čiernou hliníkovou fóliou, bolo tiež potrebné komplexne a uspokojivo vyriešiť.

Ďalšou časťou aparatury, ktorú bolo treba prepracovať, bolo osvetlenie interiéru interakčnej komory. Toto bolo riešené pomocou externého halogénového zdroja svetla, ktoré bolo následne privedené pomocou optického vedenia v tzv. „husích krkoch“ cez optickú vákuovú priechodku. Toto riešenie bolo však nevyhovujúce, lebo zdroj zaberal v zostave LIBS príliš veľa miesta a osvetlenie cez optické vedenie bolo nedostatočné.

2.2.2 Ciele návrhu a optimalizácie

Z vyššie uvedených problémov bol zostavený zoznam určujúci jednotlivé ciele, ktoré bolo potrebné dosiahnuť v rámci skvalitnenia používanej aparatury:

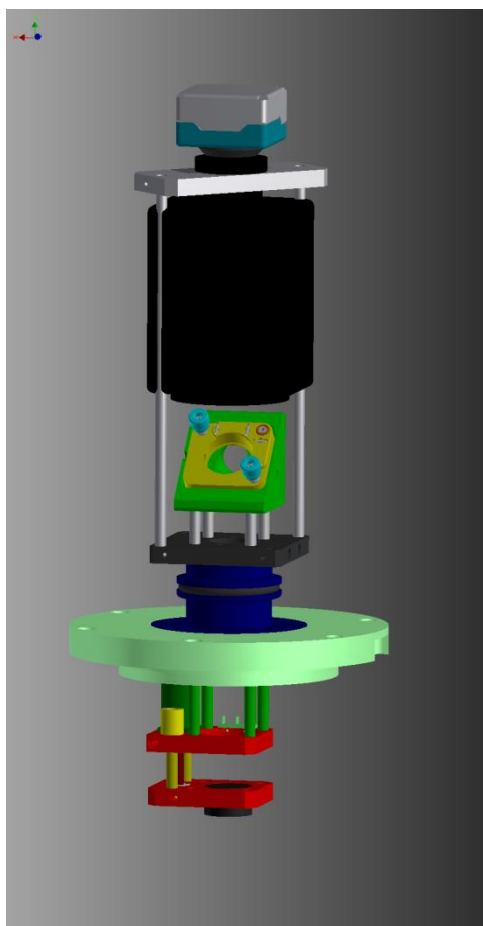
- zväčšiť zorné pole kamery pre lepšiu orientáciu na povrchu vzorky,
- zvýšiť svetelnosť zorného poľa,
- mechanicky zabrániť ničeniu kamery žiarením plazmy,
- navrhnúť nové osvetlenie vzorky, upevnené priamo na objímke fokusačnej šošovky,
- navrhnúť kryt, ktorý zabráni rozptylu svetla z optického stojana,
- navrhnúť systém tak, aby sa dal použiť aj na analýzu so štvrtým harmonickým módom Nd: YAG laseru (266 nm),
- teoreticky spočítať veľkosť zorného poľa a túto hodnotu porovnať s výsledkami z merania,
- všetky návrhy musia počítať so zachovaním vákuovej tesnosti interakčnej komory.

3 KONŠTRUKČNO-OPTICKÉ RIEŠENIE

3.1 Trasovanie

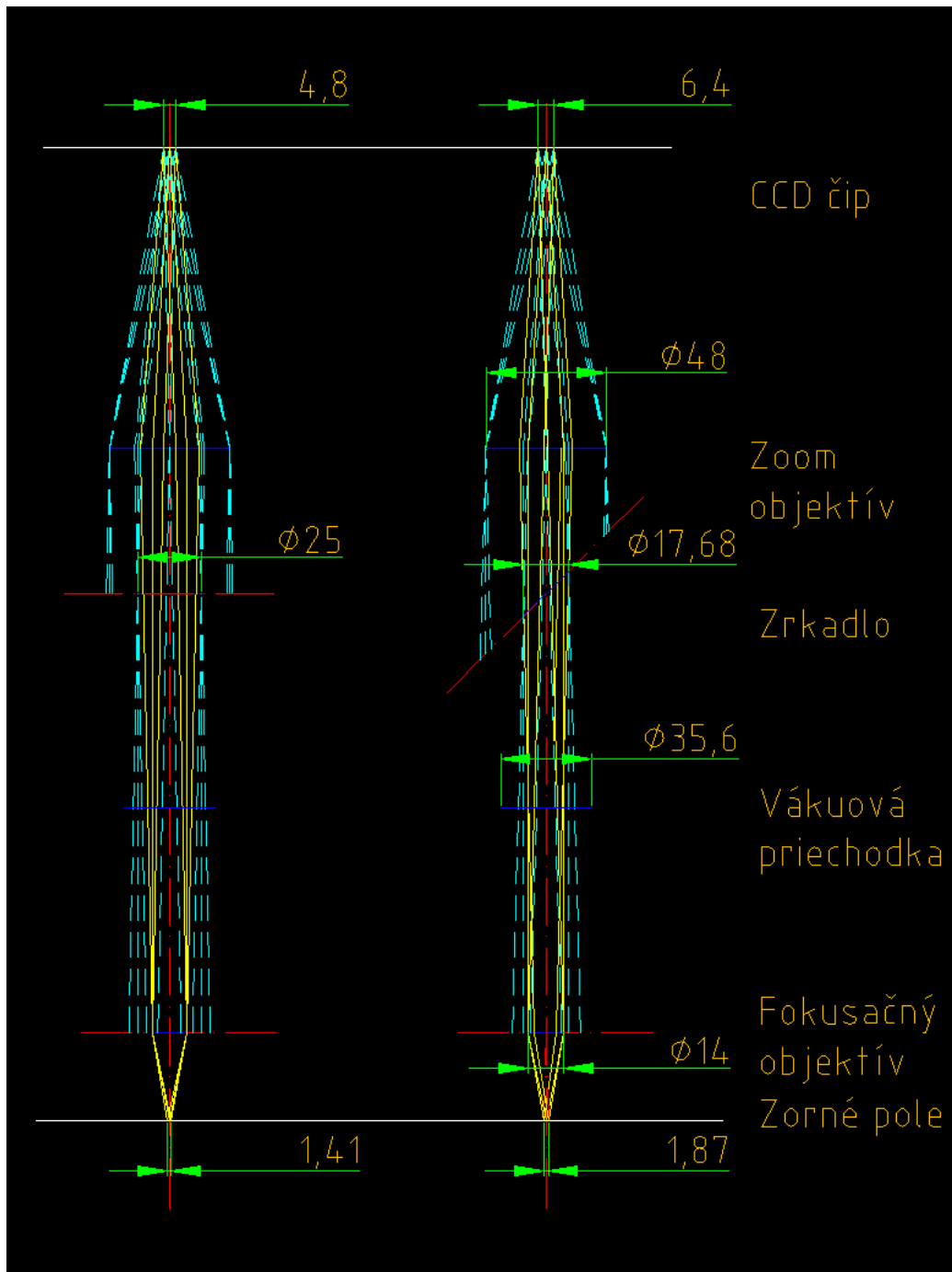
Prvým krokom k optimalizácii optického stojana bolo zistiť, ako rôzne otvory v optických dráhach – či už laseru alebo kamery –, obmedzujú chod svetelných lúčov. Keďže zväzok laserového svetla je rovnobežný s priemerom približne 8 mm [23] a na fokusačnom objektíve sa zaostruje teoreticky do jedného bodu, limitujúcim faktorom v tomto prípade bola optická dráha svetla z interakčnej komory do kamery. Bolo teda potrebné zistiť, ako sa svetlo šíri systémom a ktorá apertúra spôsobuje orezávanie zorného poľa.

Z počítačového 3D modelu pôvodného optického stojana (obr. 3.1) je zrejmé, že limitujúcimi faktormi pre veľkosť zorného poľa sú rozmery CCD čipu v kamere, apertúrazoom objektívu, priemer dielektrického zrkadla, priemer vákuového priezoru a apertúrafokusačného objektívu. Optické prvky v sústave boli pre jednoduchosť aproximované tenkými šošovkami a trasovaním jednotlivých optických dráh boli určené obmedzujúce prvky v zostave (obr. 3.2).



Obr. 3.1: Model pôvodného stojana¹³

¹³S láskavým dovolením Ing. Radomíra Malinu, Ph.D., upravené.



Obr. 3.2: Trasovanie optického systému s vyznačenými apertúrami. Rozmery sú v mm.

Trasovaním optických dráh v stojane bolo zistené, že prvkom, ktorý najviac orezával zväzok svetla bol fokusačný objektív a zrkadlo. Nové riešenie bolo teda navrhované tak, aby nové optické prvky mali maximálnu apertúru v rámci priestorových možností aparatury. Obmedzením veľkosti priemeru bola iba svetelnosť zoom objektívu, o ktorého výmene sa neuvažovalo, a bolo by zbytočné navrhovať optickú sústavu s priermi, ktoré by neboli využité, lebo svetelný zväzok by bol orezaný na apertúre zoom objektívu.

3.2 Fokusačný objektív

3.2.1 Sférický singlet

Hlavnou funkciou fokusačného objektívu je zaostriť rovnobežný laserový zväzok do ideálne jedného bodu, kde vzniká dostatočne veľká energia na jednotku plochy na to, aby mohla byť indukovaná plazma pre spektroskopické meranie. Jeho druhou funkciou je vytvoriť zo svetla odrazeného zo vzorky rovnobežný zväzok, ktorý následne prechádza zoom objektívom, ktorý je zaostrý do nekonečna. Táto konštrukcia má však za následok, že žiarenie plazmy je fokusované cez fokusačný a zoom objektív priamo na CCD čip kamery.

Najjednoduchším riešením tohto problému bolo navrhnúť jednoduchú šošovku, ktorá bude fokusovať laserový zväzok do jedného bodu. Tento predpoklad spĺňa už jednoduchá spojka, ktorá má v Gaußovej aproximácii požadované vlastnosti. Keďže je veľkosť spotu (priemer zväzku v ohniskovej rovine fokusačného objektívu) kritickým faktorom pre funkčnosť metódy LIBS, bolo treba zohľadniť aj optické vady, ktoré sa na šošovke prejavajú. Cieľom teda bolo vybrať šošovku, ktorá má minimálnu vadu zobrazenia pre laserový zväzok. Laserové svetlo je zo svojej povahy monochromatické, takže nebolo nutné brať do úvahy farebnú vadu. Zväzok je v aparátúre vedený súmerne okolo optickej osi a vzhľadom na jeho priemer bolo možné zanedbať vady zobrazenia mimoosových bodov. Bolo teda treba vyriešiť, do akej miery sférická vada ovplyvní veľkosť spotu a teda, či bude singlet dostatočným riešením.

Pri použití hrubej šošovky v Gaußovom priestore sa šošovka nahrádza konštrukciou dvoch hlavných rovín – predmetovou a obrazovou. Obrazové, resp. predmetové ohnisko je potom od týchto rovín rovnako vzdialené, predmetové do predmetového priestoru a obrazové do obrazového. Priesečníky hlavných rovín s optickou osou sa nazývajú hlavné body a ich polohy, spolu s polohami ohnisk (obr. 3.3) sú dané vzťahmi (1 - 3) [24]:

- vzdialenosť predmetového hlavného bodu od priesečníka optickej osi s prvou lámavou plochou:

$$a(H) = \frac{n_1 R_1 d}{d(n_2 - n_1) + n_2(R_2 - R_1)} \quad (1)$$

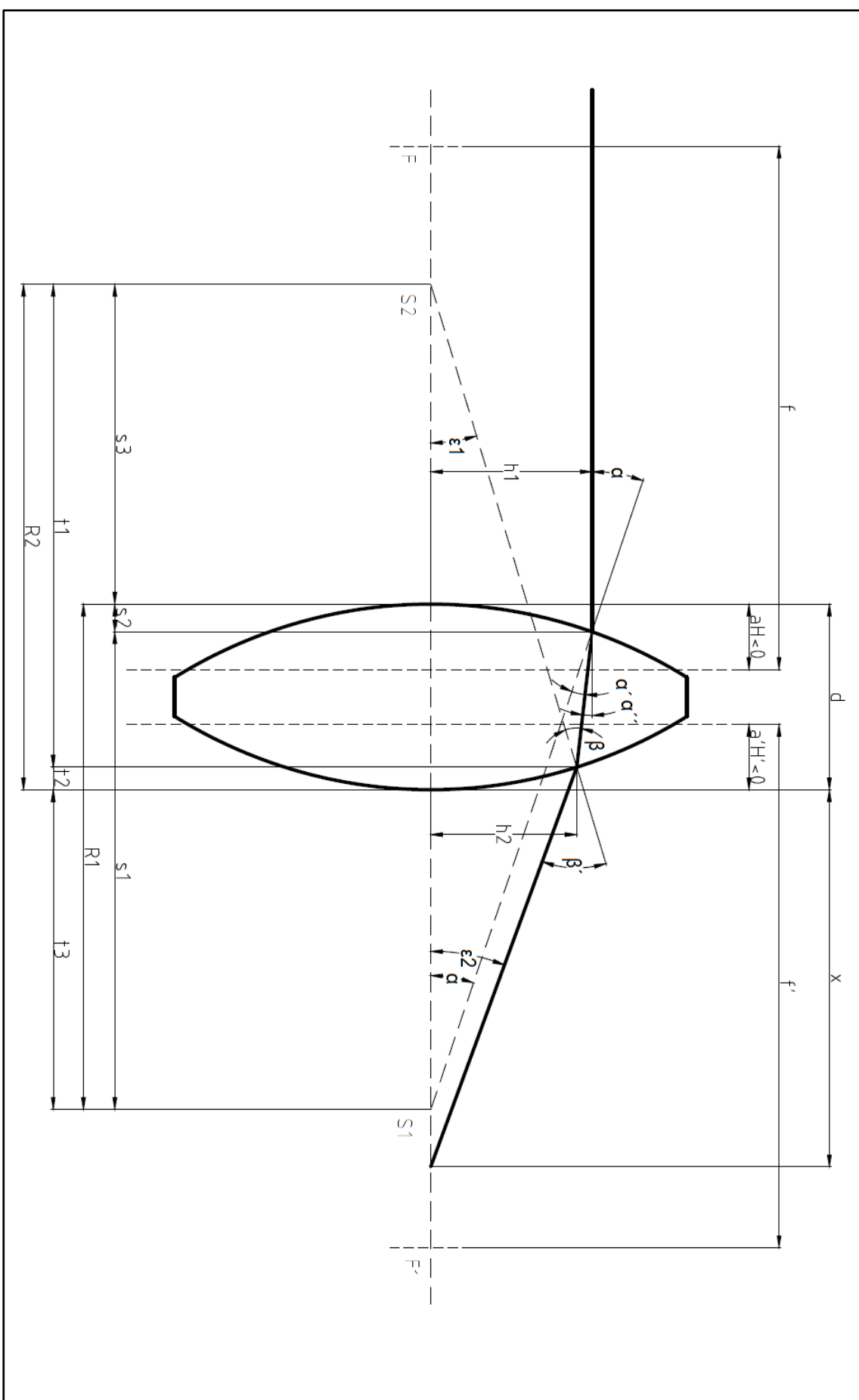
- vzdialenosť obrazového hlavného bodu od priesečníka optickej osi s druhou lámavou plochou:

$$a'(H') = \frac{n_1 R_2 d}{d(n_2 - n_1) + n_2(R_2 - R_1)} \quad (2)$$

- vzdialenosť ohnisk od hlavných rovín:

$$f = f' = \frac{n_1 n_2 R_1 R_2}{(n_2 - n_1)(d(n_2 - n_1) + n_2(R_2 - R_1))} \quad (3)$$

Sférická vada je spôsobená tým, že lámavé plochy šošoviek sú časti guľových plôch a lúče vzdialené od optickej osi (mimo Gaußovho priestoru) nepretínajú optickú os v ohnisku. Túto chybu je možné aj presne spočítať pomocou dôsledného trasovania prechodu svetelného lúča cez optickú sústavu. Dôležitým parametrom vo výpočte je hodnota priečnej otvorovej vady, ktorá udáva konečnú veľkosť spotu v ohniskovej rovine. Význam jednotlivých premenných je zrejмый z obrázku 3.3.



Obr. 3.3: Trasovanie prechodu lúča cez šošovku – výpočet sférickej vady

Vzťahy pre výpočet sférickej vady v závislosti na dopadovej výške boli urobené pomocou metód analytickej geometrie, preto sú v nich všetky vzdialenosti brané ako kladné (obr. 3.3).

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{h_1}{R_1}\right) \quad (4)$$

$$s_1 = \frac{h_1}{\tan(\alpha)} \quad (5)$$

$$s_2 = R_1 - s_1 \quad (6)$$

$$s_3 = R_1 + R_2 - d - s_1 \quad (7)$$

$$\alpha' = \arcsin\left(\frac{\sin(\alpha)}{n}\right) \quad (8)$$

$$\alpha'' = \alpha - \alpha' \quad (9)$$

$$k = \tan(180^\circ - \alpha'')^{14} \quad (10)$$

$$q = h_1 + s_3 \cdot \tan(\alpha'')^{15} \quad (11)$$

$$h_2 = \frac{q + k\sqrt{R_2^2 - q^2 + k^2 R_2^2}}{1 + k^2}^{16} \quad (12)$$

$$t_1 = \sqrt{R_2^2 - h_2^2} \quad (13)$$

$$t_2 = R_2 - t_1 \quad (14)$$

$$\varepsilon_1 = \arctan\left(\frac{h_2}{t_1}\right) \quad (15)$$

$$\beta = \alpha'' + \varepsilon_1 \quad (16)$$

$$\beta' = \arcsin(n \cdot \sin(\beta)) \quad (17)$$

$$\varepsilon_2 = \alpha'' + \beta' - \beta \quad (18)$$

$$x = \frac{h_2}{\tan(\varepsilon_2)} - t_2 \quad (19)$$

$$xH = x - |a'(H')|^{17} \quad (20)$$

¹⁴Smernica rovnice priamky, ktorá popisuje šírenie lúča vo vnútri šošovky.

¹⁵Posunutie rovnice priamky na vertikálnej osi v súradnicovom systéme so začiatkom v bode S₂.

¹⁶Riešenie sústavy rovníc prieniku priamky a kružnice. Vo vyhovujúcom riešení sa vyskytuje člen $q - |k|(\quad)$, ale keďže pre danú situáciu je k záporné číslo, možno v rovnici použiť $q + k(\quad)$.

¹⁷Vzdialenosť priesečníka lomeného lúča s optickou osou od hlavnej obrazovej roviny.

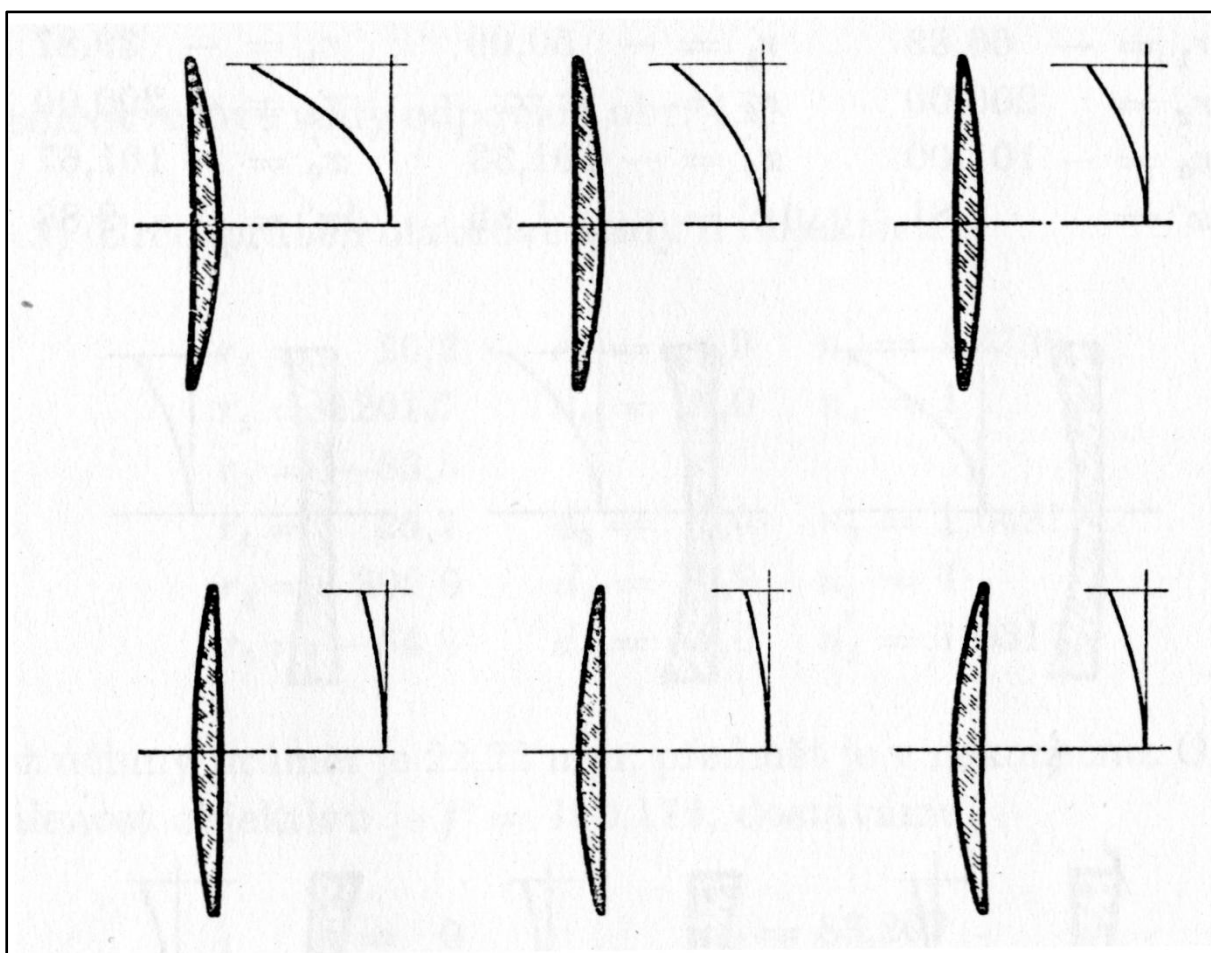
Hodnota pozdĺžnej sférickej vady je teda:

$$xm = f' - xH \quad (21)$$

a priečnej sférickej vady (priemer spotu v ohniskovej rovine):

$$ym = 2 \cdot xm \cdot \tan(\varepsilon_2) \quad (22)$$

Z uvedených vzorcov vyplýva, že rovnobežné lúče sa po prechode spojkou lámu pred ohnisko. Závislosť veľkosti sférickej vady na výške dopadu lúča má typický priebeh pre všetky spojky, rozdiely sú spôsobené tvarom konkrétnej šošovky (obr. 3.4). Výpočet je pre nízke dopadové výšky numericky pomerne nestabilný, čo je spôsobené počítaním s veľmi malými číslami a vznikom zaokrúhľovacích chýb. Pre malé dopadové výšky už ale dobre platí Gaußova aproximácia a veľkosť sférickej vady sa blíži k nule.



Obr. 3.4: Priebeh sférickej vady pre rôzne spojky [24]

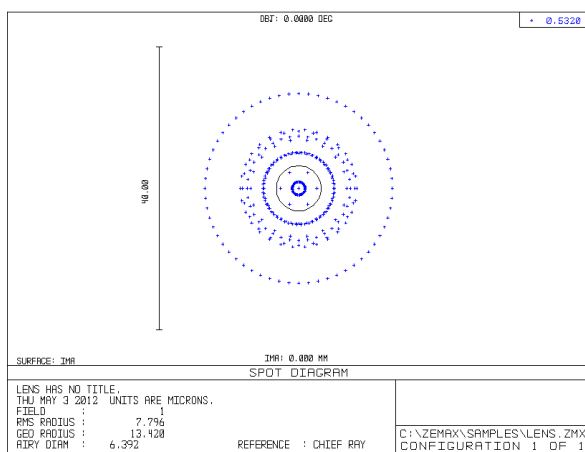
Na základe odvodených vzťahov bolo možné spočítať otvorovú vadu pre konkrétne šošovky z katalógu a zistiť, či sú pre danú aplikáciu vyhovujúce. Šošovky boli vybrané z katalógu firmy Thorlabs [25] z časti „Best Form Lenses“, kde sa nachádzajú šošovky zo skla BK7, optimalizované pre minimálnu sférickú vadu. Základný priemer bol zvolený ako 1'', čo je 25,4 mm. Z rozmerových obmedzení vo vnútri interakčnej komory bolo nutné voliť šošovky s pracovnou vzdialenosťou 30 – 70 mm. Aby bola splnená požiadavka umožnenia

práce v 4. harmonickom móde laseru (266 nm), boli z katalógu vybrané aj plankonvexné šošovky z kremenného skla, pre ktoré bola tiež vypočítaná sférická vada¹⁸. Pri týchto výpočtoch (tab. 1) bolo treba zobrať do úvahy aj to, že index lomu je hodnota špecifická pre daný materiál a konkrétnu vlnovú dĺžku, a teda pre výpočty na 1064, resp. 266 nm, bolo treba počítať s odlišnou hodnotou indexu lomu, než ako je uvádzaná v katalógu (pre 532, resp. 550 nm). Veľkosť spotu vytvoreného šošovkou LBF254-040 pri vlnovej dĺžke laseru 532 nm na povrchu vzorky pre 8 mm zväzok je zobrazená na obrázku 3.5 a priebeh pozdĺžnej sférickej vady pre plnú apertúru (25,4 mm) pri zachovanej fokusačnej rovine na obrázku 3.6.

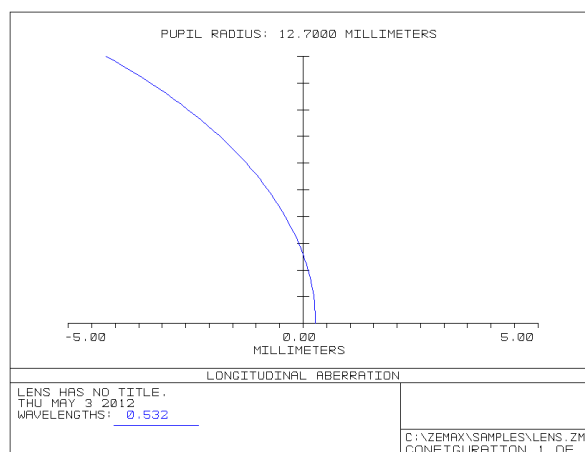
Výrobca	Kat. číslo	Typ	Sklo	Priemer šošovky [mm]	Ohnisková vzdialenosť [mm]	Vlnová dĺžka svetla [nm]	Index lomu	Dopadová výška [mm]	Minimálny priemer spotu [μm]	Cena [€]
Thorlabs	LBF254-040	Best Form	BK7	25,4	40	1064	1,507	4	15,4	34,80
Thorlabs	LBF254-040	Best Form	BK7	25,4	40	532	1,519	4	15,6	34,80
Thorlabs	LBF254-050	Best Form	BK7	25,4	50	1064	1,507	4	9,6	34,80
Thorlabs	LBF254-050	Best Form	BK7	25,4	50	532	1,519	4	9,6	34,80
Thorlabs	LA4052	Plano-Convex	UV - FS	25,4	35	266	1,505	4	28,1	112,06
Thorlabs	LA4306	Plano-Convex	UV - FS	25,4	40	266	1,505	4	21,5	87,44
Thorlabs	LA4148	Plano-Convex	UV - FS	25,4	50	266	1,505	4	13,9	83,00

Tab. 1: Priemery spotov sférických singletov [26,27]

Druhou požiadavkou kladenou na fokusačnú šošovku bolo, aby obraz vzorky na čipe kamery po prechode cez celú optickú sústavu bol dostatočne dobrý na to, aby umožňoval orientáciu na vzorke. Použitelnosť jednoduchého singletu bola vyskúšaná na aparátúre LIBS a kvalita zobrazenia je diskutovaná v časti 4.1 (Zväčšenie zorného poľa) a zobrazená na obrázku 4.2.



Obr. 3.5: Spot diagram



Obr. 3.6: Pozdĺžna vada

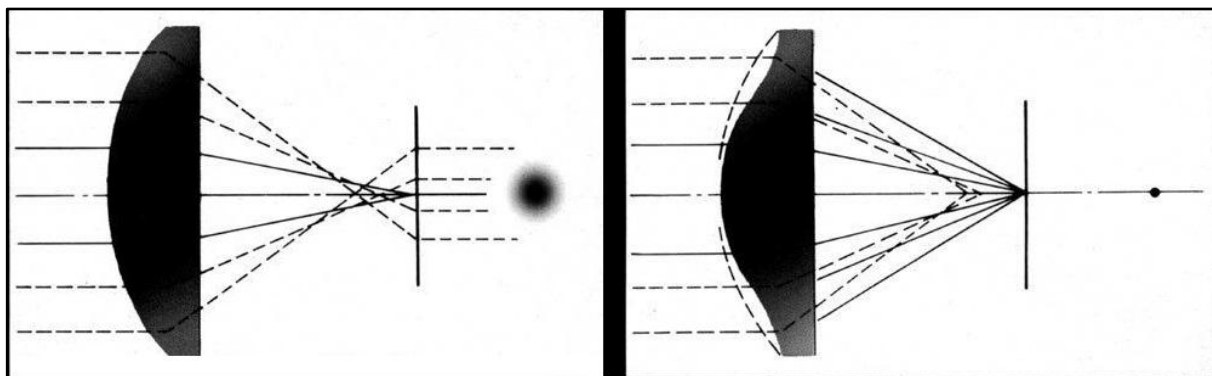
¹⁸Hodnoty v tabuľke, počítané v ZEMAXe, sa mierne líšia od hodnôt počítaných pomocou odvodených vzorcov. Tento rozdiel vzniká v dôsledku výpočtovej metódy, pri ktorej ZEMAX udáva ako veľkosť spotu hodnotu RMS (root mean square), čiže hodnotu strednej kvadratickej odchýlky lúčov od lúča, na ktorého priesečníku s optickou osou leží obrazová rovina. ZEMAX týmto spôsobom zohľadňuje rozloženie intenzity svetla v spote v obrazovej rovine.

3.2.2 Asférický singlet

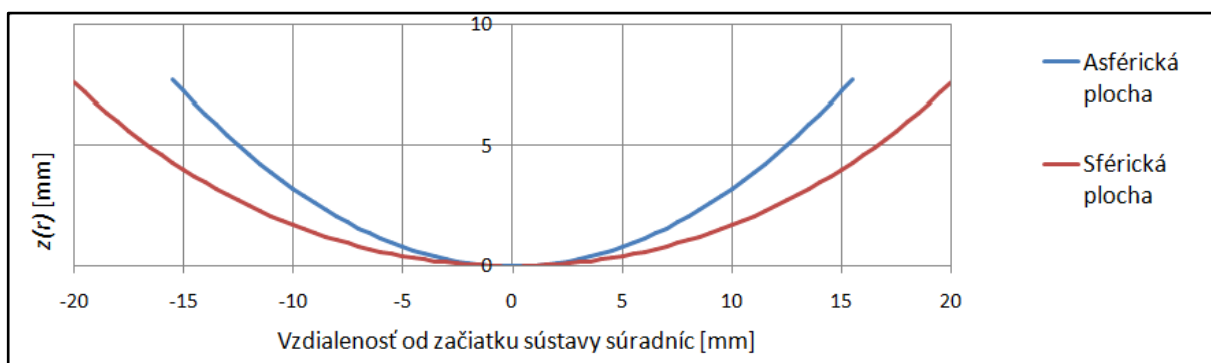
Najjednoduchším riešením ako minimalizovať sférickú vadu jednoduchého singletu je použiť asférickú plochu, ktorej tvar je optimalizovaný tak, aby sa rovnobežné lúče svetla po prechode šošovkou lámali do ohniska (obr. 3.7). Asférická plocha vznikne rotáciou krivky popísanej rovnicou (23) okolo jej osi súmernosti [28]. Porovnanie rezu sférickou a asférickou šošovkou je na obrázku 3.8.

$$z(r) = \frac{r^2}{R \left(1 + \sqrt{1 - (1 + k) \frac{r^2}{R^2}} \right)} + A_4 r^4 + A_6 r^6 + \dots, \quad (23)$$

kde: $z(r)$ je hodnota funkcie pre konkrétne r ,
 r horizontálna vzdialenosť od počiatku sústavy súradníc,
 R parameter kužeľosečky (polomer),
 k parameter kužeľosečky ($k < -1$ – hyperbola, $k = -1$ – parabola, $-1 < k < 0$ – elipsa, $k = 0$ – kružnica),
 $A_4, A_6, \dots$ koeficienty odchýlky krivky od kužeľosečky.



Obr. 3.7: Trasovanie lúčov cez sférickú a asférickú šošovku. Prevzaté z [29], upravené.



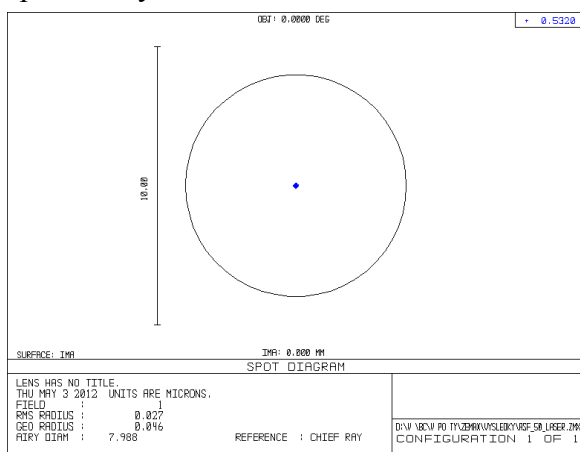
Obr. 3.8: Rez asférickou ($R = 15,1$ mm, $k = -1$, $A_4, A_6, \dots = 0$) a sférickou ($R = 30$ mm) plochou

Výpočet veľkosti spotu fokusovaného laserového zväzku pre šošovku od fy Thorlabs [25] prebehol v programe ZEMAX. Výsledky sú uvedené v tabuľke 2. V katalógu sa nenachádzajú asférické šošovky z materiálu, ktorý by plnil fungoval aj v UV oblasti. Použitie asférickej šošovky pre prácu v 4. harmonickom móde laseru by teda vyžadovalo hľadanie u iných výrobcov alebo výrobu šošovky na objednávku. Veľkosť spotu vytvoreného šošovkou AL2550 pri vlnovej dĺžke laseru 266 nm na povrchu vzorky pre 8 mm zväzok je zobrazený na obrázku 3.9 a priebeh pozdĺžnej sférickej vady pre plnú apertúru (25,4 mm) pri zachovanej fokusačnej rovine na obrázku 3.10.

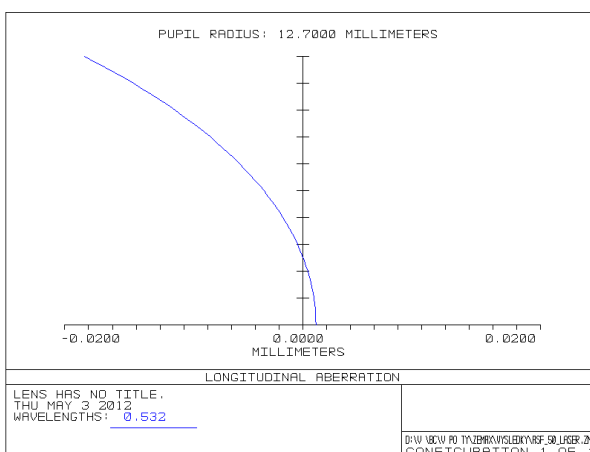
Výrobca	Kat. číslo	Typ	Sko	Priemer šošovky [mm]	Ohnisková vzdialenosť [mm]	Vlnová dĺžka svetla [nm]	Index lomu	Dopadová výška [mm]	Minimálny priemer spotu [μm]	Cena [€]
Thorlabs	AL2550	Aspheric	BK7	25	50	1064	1,507	4	0,03	139,14
Thorlabs	AL2550	Aspheric	BK7	25	50	532	1,519	4	0,05	139,14

Tab. 2: Priemery spotov asférického singletu [26]

V porovnaní s tabuľkou 1 je zrejmé, že asférická šošovka výrazne minimalizuje priemer spotu na povrchu vzorky a tým umožňuje vytvorenie plazmy vhodnejšej na spektroskopické meranie a zároveň odparenie menšieho množstva materiálu, a tým lepšie rozlíšenie pri mapovaní povrchu vzorky. Otázkou je prejavenie sa difrakčného limitu na CCD čipe kamery.



Obr. 3.9: Spot diagram

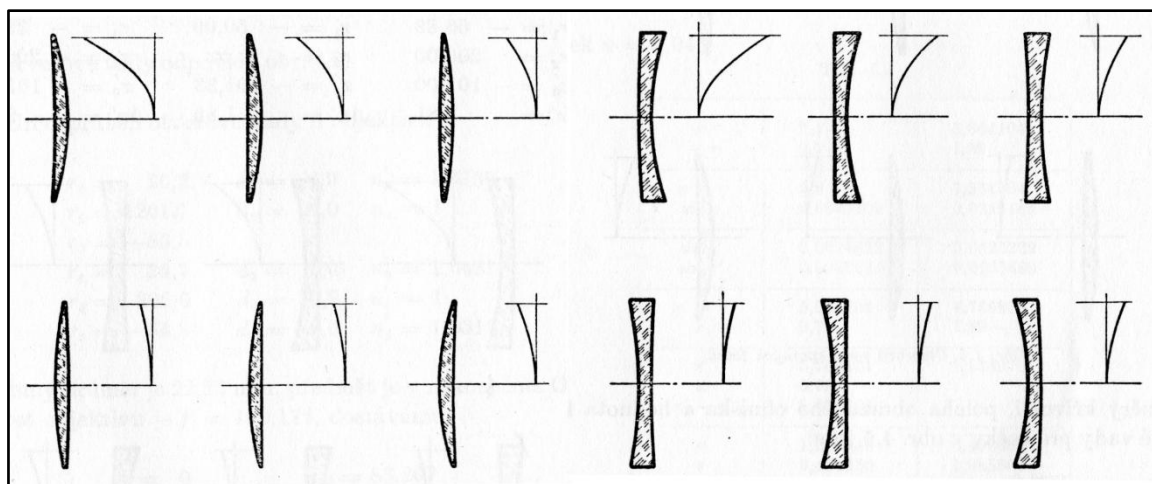


Obr. 3.10: Pozdĺžna vada

Z konfigurácie optického stojana plynie, že vadami ovplyvňujúcimi zobrazenie vzorky na CCD čipe je hlavne koma vznikajúca pri zobrazení mimoosových bodov a farebná vada spôsobená zmenou indexu lomu pre rôzne vlnové dĺžky svetla. Potlačenie komy je možné dosiahnuť zaclonením alebo použitím aplanatického objektívu [30]. Pri snahe zvýšiť svetelnosť a zväčšiť zorné pole sústavy je zaclonenie nevhodným riešením. Využitie viacšošovkových objektívov bude analyzované v nasledujúcich odstavcoch. Korekciu farebnej vady je možné realizovať použitím achromatického (apochromatického) objektívu (tiež viacšošovkového). Druhým riešením je vhodná voľba osvetlenia vzorky, ktorá bude podrobne rozpísaná v časti 3.3.7 (Osvetlenie vzorky).

3.2.3 Asférický dublet

Odstránenie sférickej vady je možné vyriešiť návrhom jednoduchého dubletu (objektívu zloženého z dvoch šošoviek). Korekcia sférickej vady je možná vďaka opačnému priebehu sférických vád pre spojku a rozptylku (obr. 3.11). Pokiaľ nie je potrebné korigovať aj farebnú vadu, je možné takýto dublet navrhnuť z dvoch šošoviek z rovnakého skla [24]. Jednopalcové šošovky pre tento návrh boli vyberané z katalógu fy Thorlabs [25]. Návrh spočíval v nájdení optimálnej kombinácie šošoviek, určení ich vzdialenosti, a tiež pracovnej vzdialenosti – vzdialenosti medzi minimálnym spotom a prvou lámavou plochou. Parametre najoptimálnejších návrhov sú uvedené v tabuľke 3.



Obr. 3.11: Priebeh sférickej vady pre spojky a rozptylky. Prevzaté z [24], upravené.

1. šošovka	Sklo	2. šošovka	Sklo	Vlnová dĺžka svetla [nm]	Vzdialenosť šošoviek [mm]	Ohnisková vzdialenosť [mm]	Pracovná vzdialenosť [mm]	Dopadová výška [mm]	Minimálny priemer spotu [μm]	Cena (vrátane montáže) [€]
LBF254-050	BK7	LC1120	BK7	1064	4,50	88,44	71,57	4	0,03	74,79
LBF254-050	BK7	LC1120	BK7	532	4,67	85,78	68,78	4	0,03	74,79
LA4148	UV - FS	LC4513	UV - FS	266	7,72	91,84	66,38	4	0,19	173,28

Tab. 3: Priemery spotov asférických dubletov

Pomocou vhodne zostaveného dubletu je možné výrazne minimalizovať vplyv sférickej vady na priemer spotu v obrazovej rovine šošovky. Zobrazenie povrchu vzorky pomocou kamery sa bude musieť vyrovnávať s rovnakými vadami zobrazenia, aké vznikli pri použití asférickej šošovky. Riešenia sú teda tiež rovnaké. Pri použití asférického dubletu stojí za pozornosť aj fakt, že optimálne korigovaný objektív z dostupných šošoviek v katalógu Thorlabs má v pomere so singletmi veľkú ohniskovú vzdialenosť, čo v prípade tohto typu zostavy (bod – rovnobežný zväzok – bod), kde je zväčšenie približne dané pomerom ohniskových vzdialeností jednotlivých objektívov, znamená obmedzenie možnosti zväčšenia povrchu vzorky. Pri súčasnom pomere 120 mm : 35 mm by výmena za sústavu 120 mm : 88 mm znížila možnosť priblíženia viac ako 2,5krát.

3.2.4 Viacšošovkový objektív

Komplexným riešením fokusačného objektívu by bol teda návrh a zostavenie viacšošovkového objektívu, ktorý by bol korigovaný okrem sférickej vady aj na vady mimoosových bodov – aplanát a farebné vady – achromát, resp. apochromát [30]. V rámci týchto požiadaviek by bolo vyhovujúcim riešením navrhnúť aplanatický objektív, čiže objektív, ktorý sa skladá vo svojej najjednoduchšej podobe z dvoch achromatických dubletov (Petzvalov objektív). Tento objektív má dobre korigovanú sféricú vadu a komu a kvôli použitiu achromátov aj farebnú vadu. Hlavnou nevýhodou tohto objektívu je používanie tmelených dubletov, ktoré sú nepoužiteľné na fokusovanie laserového lúča s takou energiou, aký sa používa pri analýze LIBS na ÚFI. Energia laserového lúča spôsobuje poškodenie tmeliacej vrstvy, a tým znehodnotenie objektívu. Navyše aj návrh takéhoto objektívu by bol pomerne zložitý a veľmi náročný na presnú montáž. Preto bolo ako riešenie zvolené vyhľadanie hotových korigovaných objektívov a ich porovnanie. Boli vybrané objektívy z katalógov Sill Optics [33, 34]. Porovnanie ich parametrov je v tabuľke 4.

Objektív	Pracovná vlnová dĺžka [nm]	Materiál	Ohnisková vzdialenosť [mm]	Pracovná vzdialenosť [mm]	Apertúra [mm]	Cena [€]
S6ASS0159/126	1064	Optické sklo	56,0	42,7	35,0	735,00
S6ASS0177/121	532	Optické sklo	76,5	64,1	35,0	490,00
S6ASS2550/121	532	Kremenné sklo	49,7	45,9	25,0	600,00
S6ASS2060/199	266	Kremenné sklo	57,0	43,9	34,0	1120,00

Tab. 4: Parametre vhodných objektívov od fy Sill Optics

Tieto objektívy sú podľa výrobcu navrhnuté konkrétne na použitie s lasermi alebo na zobrazovacie účely. Je teda možné predpokladať, že použitie takéhoto objektívu bude zaťažené optickými vadami len minimálne a tieto vady teda nepokazia obraz natoľko, aby nebola plne využitá rozlišovacia schopnosť kamery.

3.3 Konštrukčné riešenie

Použitie nových prvkov v optickom stojane, ktoré sú nevyhnutné pre dosiahnutie väčšieho zorného poľa a ostatných požiadaviek, potrebných pre zlepšenie funkčnosti celej aparatury LIBS, vyžaduje isté zmeny v konštrukčnom návrhu optického stojana, ktorý sa v súčasnosti používa v laboratóriu ÚFI. Tieto zmeny boli navrhnuté tak, aby sa maximálne využili už používané časti stojana, prípadne aby sa dali použiť len s minimálnymi úpravami. Ostatné časti boli v najväčšej možnej miere vyberané z normalizovaných dielov z katalógov a diely, ktoré bolo treba vytvoriť nové, boli navrhnuté tak, aby umožňovali maximálnu variabilitu použitia s rôznymi prvkami v rámci potrieb konkrétnej aplikácie, resp. konkrétneho merania. Jednotlivé odseky popisujú konkrétne zmeny, prípadne princípy, ktoré viedli k použitiu daných konštrukčných riešení. Kompletná výkresová dokumentácia je súčasťou prílohy k tejto práci.

3.3.1 Príruba

Vákuová príruha tvorí základnú časť celého optického stojana. Je to časť, ktorá ho priamo spája s vákuovou komorou a tiež slúži ako základňa pre všetky tri konštrukčné komponenty optického stojana, ktorými sú zariadenie na posuv fokusačného objektívu vo vnútri komory, vákuový priezor¹⁹ a držiak zrkadla, zoom objektívu a kamery. Základ bude tvorený súčasnou prírubou z nerezovej ocele (požiadavka vákuovo kompatibilného materiálu), ktorá bude čiastočne upravená tak, aby umožňovala montáž posuvu upraveného pre použitie s objektívom s väčším priemerom, nového vákuového priezoru a upraveného držiaku zrkadla, uzávierky, objektívu a kamery. Keďže sa v komore nepredpokladá použitie UHV, ako tesnenia boli navrhnuté Viton® O – krúžky [35], ktoré sú vyrábané špeciálne pre využitie vo vákuovej technike.

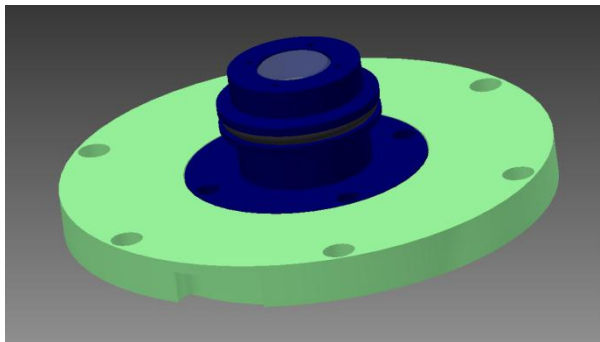
3.3.2 Vákuový priezor

Návrh nového priezoru vychádzal z požiadavky zväčšenia jeho apertúry a tiež úspory miesta tesne nad prírubou umožňujúcej zmenšiť celkovú výšku optického stojana, čo by sa malo pozitívne prejaviť na jeho stabilite. Kvôli použitiu iného typu priezoru, aký je súčasne nainštalovaný v aparátúre LIBS, bolo potrebné navrhnuť zmeny na príрубе tak, aby priezor namontovaný na prírubu zachoval vákuovú tesnosť aparatury. Návrh však počíta aj s možným použitím súčasného typu priezoru. V priezore musí byť použité okienko z kremenného skla, kvôli práci v 4. harmonickom móde laseru. Prvky pre tieto riešenia boli vybrané z katalógu fy Caburn MDC. Parametre navrhnutého priezoru sú uvedené v tabuľke 5 a porovnanie so súčasným riešením je znázornené na obrázkoch 3.12 a 3.13.

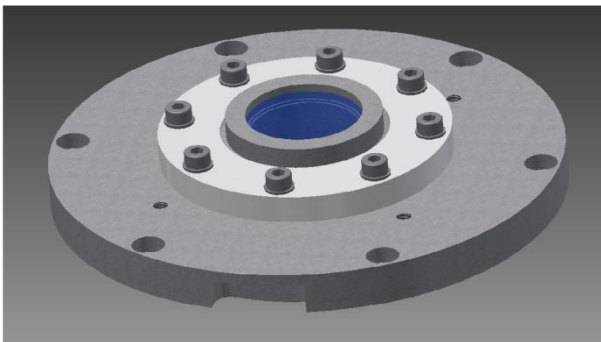
Návrh	Celková výška [mm]	Priemer okienka [mm]	Prvky	Katalógové číslo	Cena [€]	Celková cena [€]
Nový návrh (obr. 3.13)	16	35,6	Viewport DN50KF	9723002	296	354
			Bulkhead clamp	716003	35	
			Viton® O-ring	7710003	8	
			O-ring retainer	7710028	15	

Tab. 5: K návrhu novej vákuového priezoru [35, 36].

¹⁹viewport (angl.)



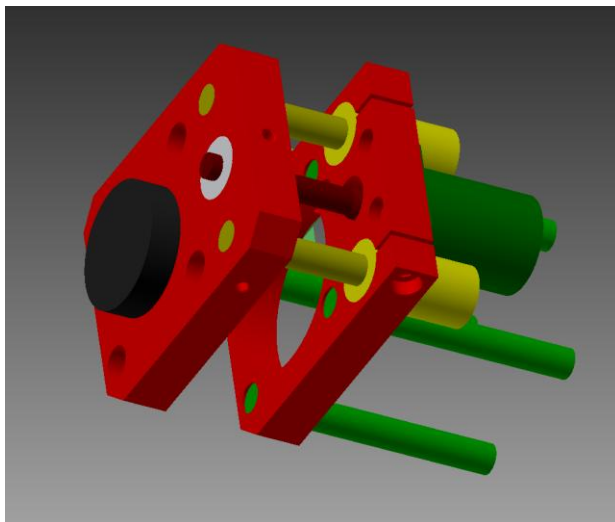
Obr. 3.12: Súčasné riešenie priezoru



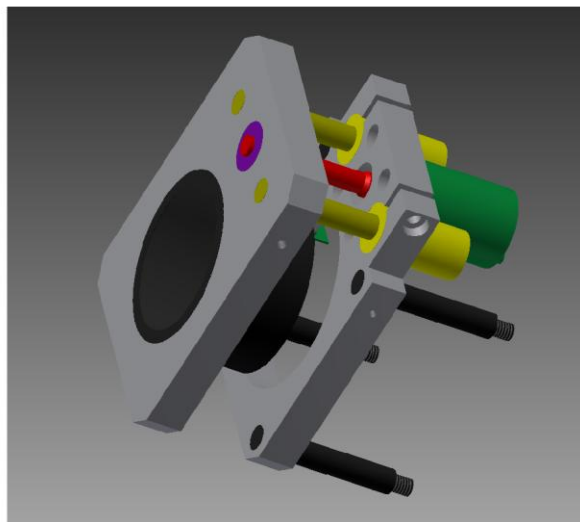
Obr. 3.13: Nový návrh priezoru

3.3.3 Posuv fokusačného objektívu v interakčnej komore

Motorizovaný posuv vo vákuovej komore slúži na nastavenie polohy ohniskovej roviny fokusačného objektívu [22]. Táto možnosť nastavenia je využívaná najmä pri nastavovaní aparatury pre meranie metódou DP LIBS a LIFS [5], kde je potrebné správne nastaviť vzájomnú polohu fokusovaných laserových lúčov. Na tejto časti stojana boli tiež nevyhnutné určité úpravy. Išlo hlavne o zväčšenie konzoly slúžiacej na upevnenie objektívu. Tá bola pôvodne navrhnutá na uchytenie 1`` držiaka od fy Thorlabs. Snaha o zväčšenie apertúry fokusačného objektívu viedla k tomu, že držiak s jednopalcovým priemerom bude nedostatočný, a teda je nutné navrhnuť novú konzolu. So zväčšením konzoly držiacej objektív súvisela aj úprava vrchnej konzoly, do ktorej sa objektív v krajnej polohe zasúva, a nový návrh uchytenia celej zostavy na prírubu. Bolo teda vytvorených niekoľko návrhov pre konkrétne vonkajšie priemery objektívov navrhovaných v časti 3.2. Porovnanie súčasného stavu a nového návrhu pre objektív S6ASS2550/121 je na obrázkoch 3.14 a 3.15.



Obr. 3.14: Súčasné riešenie posuvu²⁰

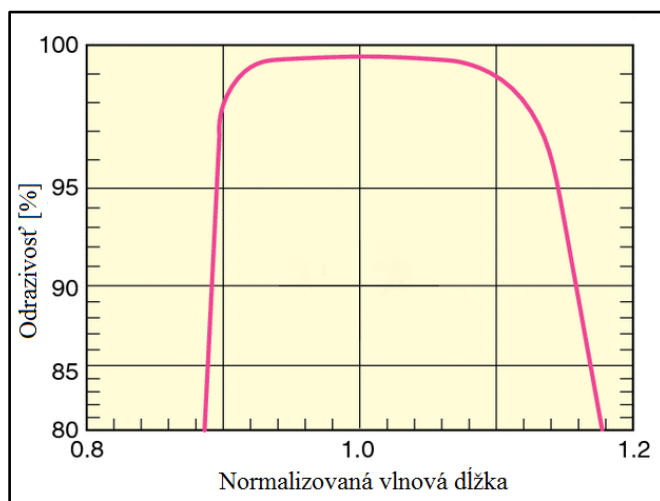


3.15: Úpravy posuvu pre väčší objektív

²⁰S láskavým dovolením Ing. Radomíra Malinu, Ph.D.

3.3.4 Dielektrické zrkadlo

Druhým prvkom, ktorý hneď po fokusačnom objektíve obmedzoval zorné pole kamery, bolo zrkadlo, ktoré umožňuje privedenie rovnobežného laserového zväzku zhora do komory a zároveň nebráni (s výnimkou určitej oblasti spektra (obr. 3.16)) prechodu svetla odrazeného na vzorke do kamery. Požiadavky na funkciu tohto zrkadla zahŕňali možnosť výškovej nastaviteľnosti, ktorá sklonom 45° umožňuje nastavenie zvislej časti laserového zväzku do osi optického stojana. Návrh musel počítať aj s jemným nastavovaním hodnoty uhla, pod ktorým sa laserový lúč odráža do komory a ktorým by bolo možné korigovať prípadné výrobné nepresnosti a optimalizovať nastavenie aparatury pre použitie systémov LIBS DP a LIFS. Významnou požiadavkou bolo aj umožnenie operatívnej výmeny dielektrického zrkadla v prípade zmeny vlnovej dĺžky laseru. Všetky tieto požiadavky vyústili do konštrukčného návrhu zrkadla (obr. 3.17), ktorý je uchytený v optickom stojane. Návrh počíta s výrobou dielektrického zrkadla v Ústave prístrojovej techniky AV ČR a konštrukčných prvkov v dielni ÚFI.



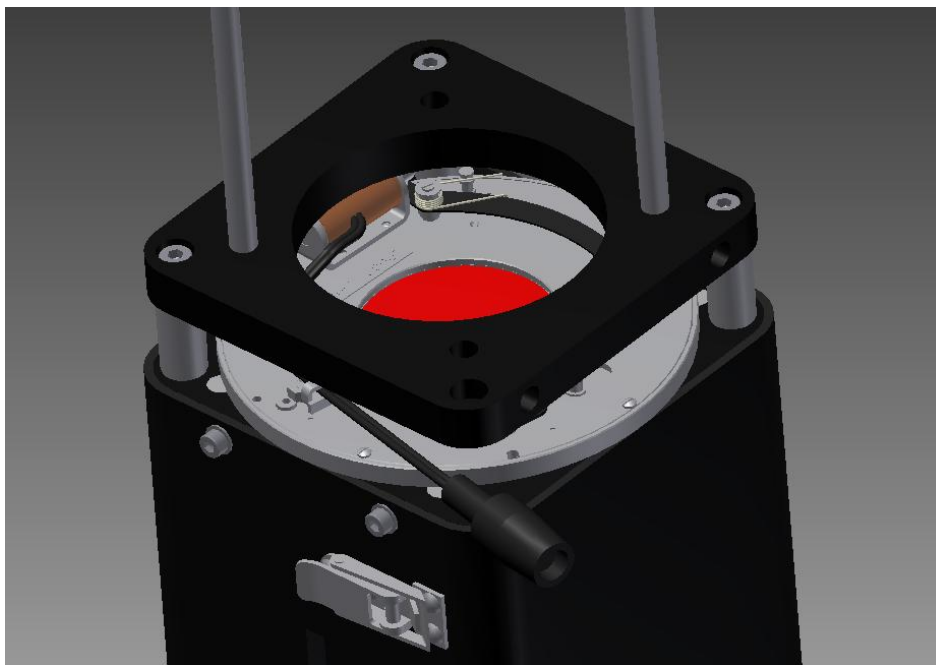
Obr. 3.16: Typický priebeh odrazivosti dielektrického zrkadla. Prevzaté z [37], upravené.



Obr. 3.17: Konštrukčný návrh dielektrického zrkadla

3.3.5 Uzávierka

Plazma vytvorená laserovým pulzom pri svojom chladnutí vyžaruje elektromagnetické žiarenie s rôznymi vlnovými dĺžkami. Obzvlášť v prvých mikrosekundách [15] plazma produkuje elektromagnetické žiarenie s vysokými energiami (RTG oblasť spektra). Toto žiarenie je potom fokusované priamo na povrch CCD čipu, na ktorom spôsobuje poškodenie jednotlivých pixelov. Ich nefunkčnosť spôsobuje problémy pri orientácii na povrchu vzorky a vytvára nevzhľadný obraz z kamery implementovaný do ovládacieho softvéru (obr. 1.6, 2.2). Preto bolo nevyhnutné vložiť do optického stojana uzávierku, ktorá by bola v čase žiarenia plazmy uzavretá, a tak chránila kameru pred poškodením. Pre túto aplikáciu bola vybraná irisová uzávierka od firmy Melles Griot s maximálnou apertúrou 42,7 mm [38]. Aby plnila svoju funkciu a zároveň zostala zachovaná funkčnosť optického stojana, bolo nutné ju umiestniť medzi dielektrické zrkadlo a zoom objektív. Pre upevnenie bol navrhnutý nový držiak a prechod medzi ním a držiakom pre zoom objektív. Umiestnenie uzávierky v optickom stojane je zobrazené na obrázku 3.18.



Obr. 3.18: Detail umiestnenia uzávierky

3.3.6 Ochranný kryt

Otvorená časť optického stojana, medzi vákuovou priechodkou a zoom objektívom vykazovala v pôvodne realizovanom návrhu isté nedostatky, ktoré boli spôsobené najmä odrazom časti žiarenia plazmy v pracovnom rozsahu zrkadla²¹ do priestoru laboratória, a tiež vstupom parazitného svetla z okolia aparatury, ktoré ovplyvňovalo zobrazenie vzorky CCD kamerou. Nový kryt bol navrhnutý tak, aby riešil dané nedostatky a zároveň umožnil plnú funkčnosť navrhovaného stojana, t.j. vstup laserového lúča do stojana a jednoduchý prístup k zrkadlu. Finálna podoba návrhu je na obrázku 3.19.

²¹Pre pôvodné zrkadlo 450 – 600 nm.

3.3.7 Osvetlenie vzorky

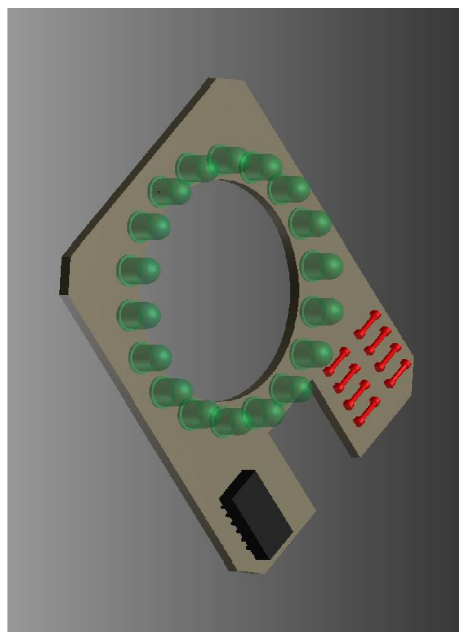
Požiadavka návrhu na nové osvetlenie vzorky vznikla z potreby rozšíriť možnosti merania²², znížiť priestorovú náročnosť aparatury²³, a tiež ako jedno možné riešenie slúžiace na odstránenie farebnej vady pri použití chromaticky nekorigovaného objektívu.

Návrh osvetlenia bol riešený formou plošného spoja umiestneného priamo na držiaku fokusačného objektívu. Plošný spoj musel mať taký tvar, aby umožňoval prípadnú výmenu fokusačného objektívu. Počítalo sa s využitím LED diód, ktoré okrem vákuovej kompatibility majú aj mnohé iné výhody, napr. možnosť voľby vlnovej dĺžky ich svetla, veľmi dlhú životnosť a malú spotrebu. Približný tvar navrhovaného plošného spoja je na obrázku 3.20. Kruhové usporiadanie umožňuje pomocou zapínania a vypínania jednotlivých diód nastaviť najvhodnejší uhol nasvietenia vzorky, a tým dosiahnuť stav, v ktorom zobrazenie CCD kamerou umožní chod autofokusačného algoritmu [21] a lepšiu orientáciu na povrchu vzorky.

Pri použití chromaticky nekorigovaného objektívu (sférický aj asférický singlet a asférický dublet) je možné zvoliť taký typ diód, ktorých svetlo bude mať vlnovú dĺžku na hranici priepustnosti dielektrického zrkadla. Toto riešenie by výrazne znížilo priemer spotu ovplyvneného chromatickou vadou pri osvetlení bielym svetlom. Nevýhodou tohto riešenia by bola strata farebnej informácie o vzorke, na druhej strane by získanie vyššieho kontrastu zabezpečilo presnejší chod autofokusačného algoritmu.



Obr. 3.19: Návrh krytu stojana

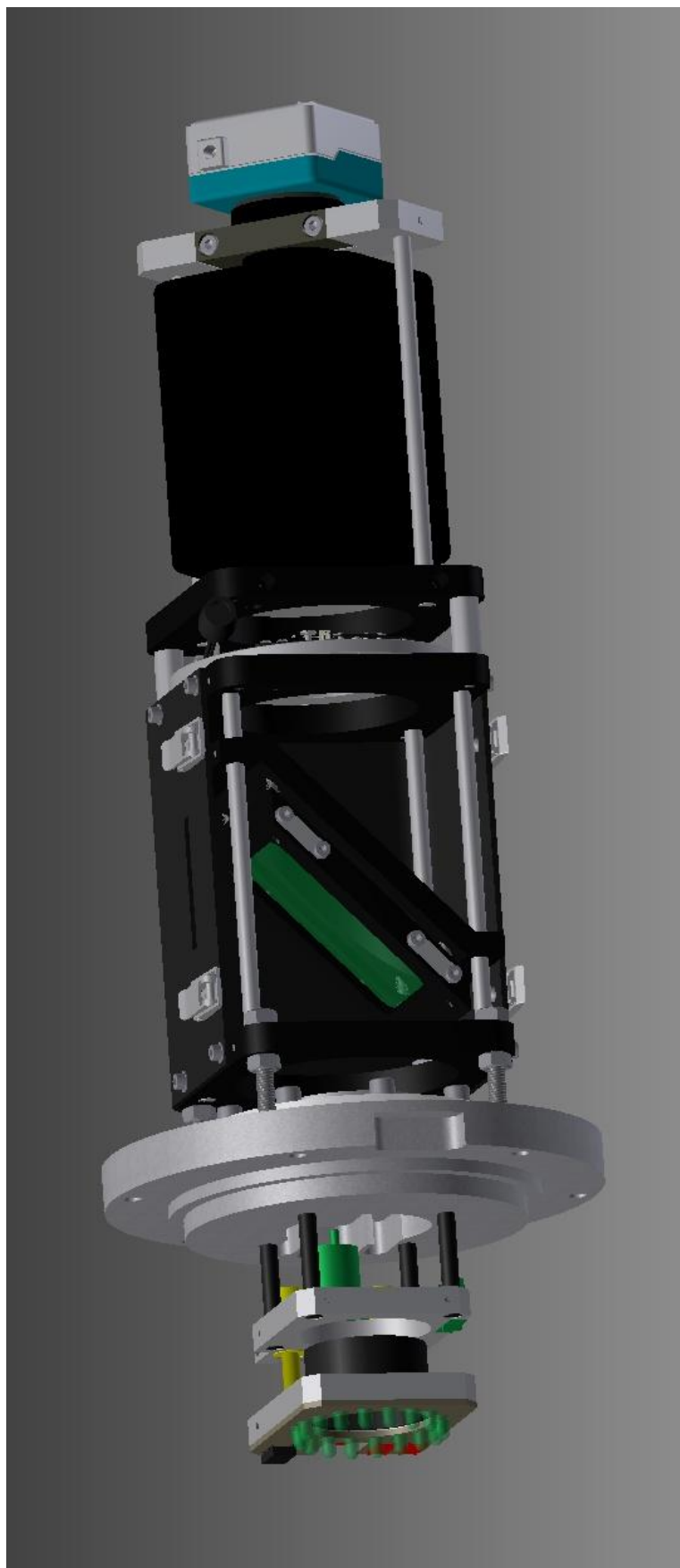


Obr. 3.20 Návrh osvetlenia

Zložením vyššie popísaných častí do celku vznikne finálna podoba optického stojana, ktorá z konštrukčného hľadiska spĺňa parametre uvedené v časti 2.2.2 (Ciele optimalizácie a návrhu). Model celého stojana je na obrázku 3.21.

²² Odlesk od kovových vzoriek znemožňoval pri pôvodnom osvetlení zaostrenie do ohniskovej roviny fokusačného objektívu.

²³ Pôvodné riešenie využívalo externý zdroj bieleho svetla umiestnený vedľa interakčnej komory, z ktorého bolo svetlo do komory privádzané tzv. „husími krkmi“.



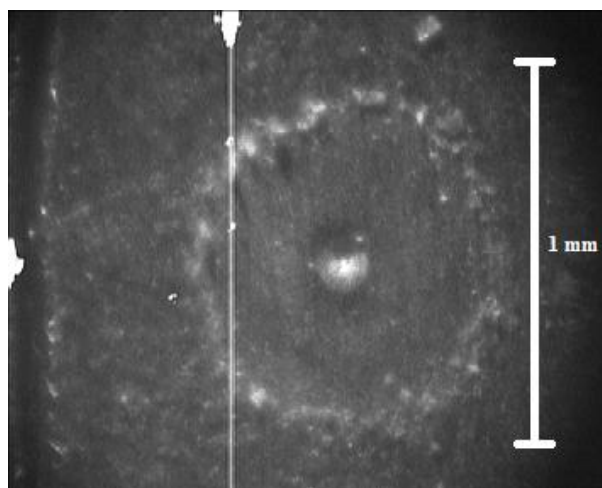
Obr. 3.21: Finálny návrh stojana

4 Meranie

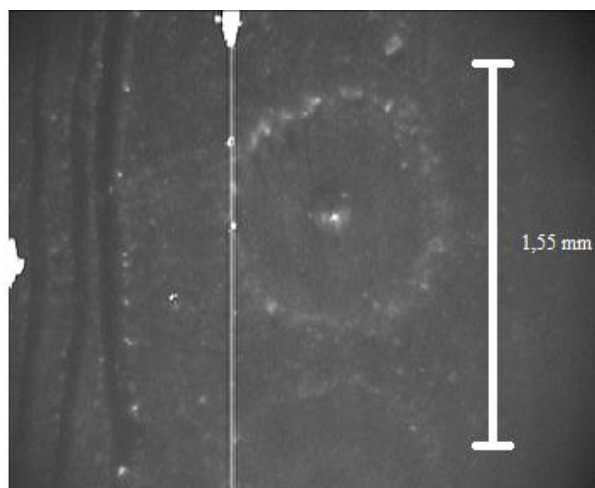
Testovanie teoretických výsledkov získaných z trasovania optickým stojanom prebehlo pre pôvodný fokusačný objektív s čistou apertúrou 14 mm a 1^o objektív s čistou apertúrou 22 mm. Pôvodný objektív bol triplet od firmy Sill Optics s ohniskovou vzdialenosťou 29,8 mm a ako nový testovací objektív slúžila plankonvexný singlet od firmy Thorlabs s ohniskovou vzdialenosťou 35 mm.

4.1 Zväčšenie zorného poľa

Teoretický výpočet veľkosti zorného poľa vyplýva z trasovania lúčov cez optickú sústavu. Výpočet bol robený pre nastavenie zoom objektívu na maximálnu ohniskovú vzdialenosť²⁴. Pre triplet bolo vypočítané, že zorné pole by malo mať rozmery 1,87 x 1,41 mm (obr. 3.2). Rovnakým výpočtom boli zistené očakávané rozmery zorného poľa s použitím väčšieho singletu, a to 2,64 x 1,98 mm. Výsledky z merania sú na obrázkoch 4.1 a 4.2. Veľkosť merítka bola zistená odčítaním súradníc v programe L3D [15].



Obr. 4.1: Zorné pole s použitím tripletu



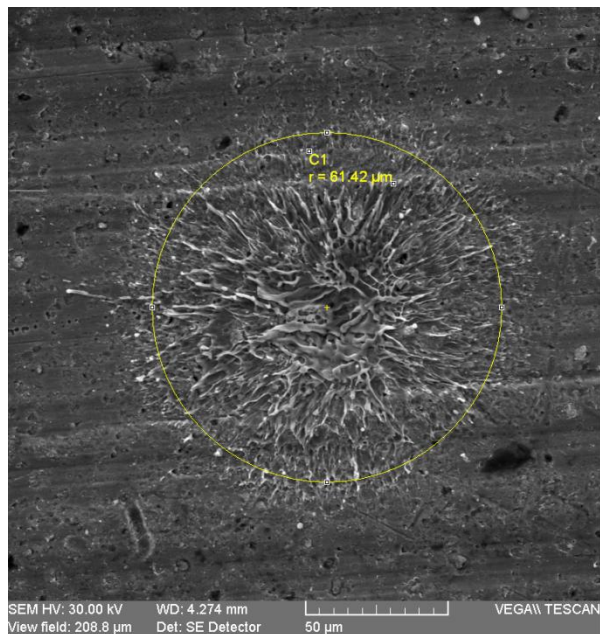
Obr. 4.2: Zorné pole s použitím singletu

Z obrázku 4.2 je zreteľne vidieť zväčšenie zorného poľa, pričom vypočítané a namerané rozmery sa pomerovo zhodujú. Zmizlo aj orezanie zorného poľa v rohoch obrázku. Na obrázkoch sa jasne prejavuje aj fakt, že zväčšenie optickej sústavy v tejto konfigurácii je priamo úmerná pomeru ohniskových vzdialeností zoom objektívu a fokusačného objektívu. Kým na obrázku 4.1 je povrch vzorky zväčšený 4-krát, na obrázku 4.2 je to len 3,4-krát.

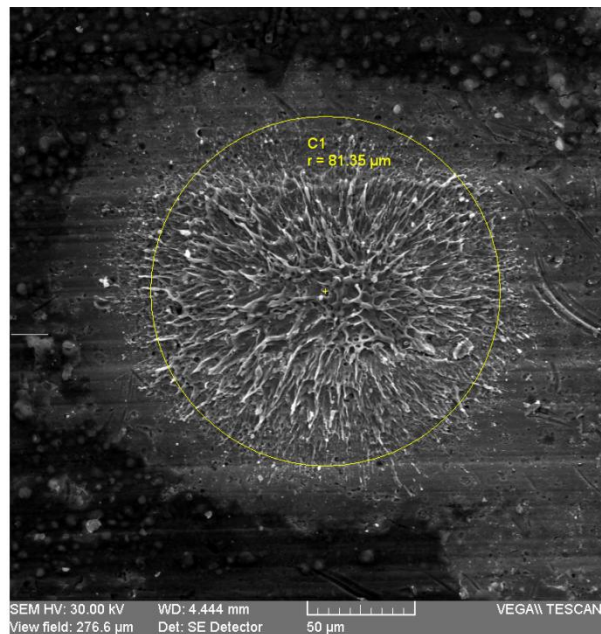
²⁴120 mm, maximálny zoom

4.2 Vplyv objektívu na ablačný kráter

Meranie s jednoduchou plankonvexnou šošovkou namiesto korigovaného tripletu by malo priniesť v dôsledku sférickej vady singletu väčší priemer spotu fokusovaného laserového lúča na povrchu vzorky, a tým pádom vznik ablačného krátera s väčším priemerom. Meranie pre triplet aj singlet prebehli s rovnakým nastavením celej aparatury²⁵ na mosadznej vzorke. Vzniknuté ablačné krátery (obr. 4.3 a 4.4) boli zmerané na elektrónovom mikroskope Tescan VEGA.



Obr. 4.3: Abláčny kráter – triplet



Obr. 4.4: Abláčny kráter – singlet

Na obrázkoch je viditeľný väčší priemer krátera vytvorený laserovým zväzkom fokusovaným obyčajným singletom. Presné meranie výrazne sťažoval tvar krátera, ktorý nemá ostré hrany, ktoré sú prekryté vzniknutými štruktúrami na povrchu, čo mohlo byť spôsobené voľbou nevhodného materiálu pre meranie. Na druhej strane je zrejmé, že kov pri zohrievaní laserovým pulzom prechádza kvapalnou fázou, čo dokumentuje prítomnosť stuhnutých „rozprsknutých“ kvapiek, a meranie potvrdzuje predpoklad, že fokusácia singletom dáva vo výsledku väčší priemer stopy. Pomerne veľká stopa na povrchu vzorky aj pri použití korigovaného objektívu môže byť spôsobená tým, že skutočný ablačný kráter je prekrytý stuhnutou kvapalnou fázou vzniknutou v okolí samotného krátera, alebo nie úplne presným umiestnením povrchu vzorky do ohniskovej roviny objektívu.

²⁵LIBS SP, 532 nm, energia pulzu 88 mJ

ZÁVER

Cieľom tejto bakalárskej práce bolo navrhnúť novú optickú časť stolnej zostavy aparatury LIBS. Požiadavky kladené na nový návrh mali predovšetkým zlepšiť jeho funkčnosť a čiastočne aj rozšíriť možnosti merania na aparátúre. Najdôležitejším zlepšením malo byť zväčšenie zorného poľa z pohľadu navigačnej kamery, ktoré by zlepšilo orientáciu na povrchu vzorky a umožnilo jednoduchšie nájdenie miesta vhodného na analýzu.

Vytvorený návrh pozostáva z čiastočnej úpravy príruby na vrchu vákuovej komory. Príruba tvorí základňu pre všetky ostatné časti optického stojana. Priamo na nej je umiestnené nové riešenie vákuového priezoru, ktoré oproti pôvodnému riešeniu nižšie asi o 40 mm, čo zaisť vyššiu stabilitu externej časti stojana.

Do vákuovej komory bolo navrhnutých niekoľko riešení väčšieho fokusačného objektívu, ktoré sa odlišujú hlavne v korekcii optických vád a s tým súvisiacou cenou. Nakoľko je minimálne korekcia sférickej vady nevyhnutná pre vznik plazmy vhodnej na spektroskopickú analýzu, nebolo možné použiť bežnú bikonvexnú šošovku. Preto boli navrhnuté štyri možné riešenia, začínajúc plankonvexnou spojkou a končiac trojšošovkovým objektívom. Pri meraní bolo zistené, že už použitie palcovej optiky pri maximálnom zoome umožní rozšírenie zorného poľa z 1,87 mm na 2,64 mm v horizontálnom smere. Podstatnými kritériami pre výber objektívu teda bude prijateľná veľkosť ablačného krátera, kvalita zobrazenia na navigačnej kamere a v neposlednom rade cena, ktorá sa pri diskutovaných návrhoch pohybuje od 34,80,-€ do 1120,-€. Pri návrhu sa počíta aj s úpravou vertikálneho posuvu fokusačného objektívu aby bolo možné použiť objektív s väčšou apertúrou.

Zásadnou zmenou v návrhu externej časti prešlo dielektrické zrkadlo, pre ktoré bol vytvorený úplne nový návrh spĺňajúci všetky požiadavky kladené na zrkadlo v aktuálnom zostavení aparatury LIBS (veľkosť, výškova a uhlová nastaviteľnosť, výmena zrkadla). Návrh bol postavený tak, aby ho bolo možné vyrobiť v dielňach ÚFI. Nanosenie dielektrickej vrstvy by sa uskutočnilo v spolupráci s ÚPT Akademie vied České republiky. Konštrukčné riešenie príruby umožňuje aj použitie zrkadla s upevnením z laboratorného programu firmy Thorlabs, ktoré ale vychádza rádoovo cenovo náročnejšie.

Ďalšími novo navrhnutými časťami sú uzávierka, kryt stojana a osvetlenie vzorky. Uzávierka umiestnená medzi zrkadlo a zoom objektív mechanicky bráni poškodzovaniu CCD čipu kamery intenzívnym žiarením plazmy tesne po jej excitácii. Kým návrh krytovania bol podrobne rozpracovaný a je pripravený ísť do výroby, návrh osvetlenia zostal v oblasti teoretických úvah, ktoré by mohli aj pri voľbe lacnejšieho fokusačného objektívu, alebo analýze vzoriek s lesklým povrchom skvalitniť obraz natoľko aby autofokusačný algoritmus mohol fungovať bez problémov.

Celé konštrukčné riešenie aj s prevzatými prvkami od Ing. Radomíra Malinu, Ph.D. bolo spracované v programe Autodesk Inventor, ktorý umožňuje 3D modelovanie a výstupom z neho je podrobná výkresová dokumentácia všetkých upravovaných aj nových častí návrhu vrátane zoznamov položiek a výkresov zostáv. Tieto výkresy sú súčasťou tejto práce a sú umiestnené v prílohe.

Úprava fokusačnej časti stolnej zostavy pre laserovú spektroskopiu LIBS bola navrhnutá tak, aby spĺňala všetky parametre, ktoré od nej vyžadujú potreby pri spektroskopickú analýzu. Meraním s dostupnými objektívmi bolo potvrdené zväčšenie zorného poľa pri

použití fokusačného objektívu s väčším priemerom a tiež predpokladaný vplyv sférickej vady objektívu na veľkosť ablačného krátera. Problémom zostalo konkrétne vyriešenie osvetlenia vzorky a tiež správanie sa zoom objektívu, ktorý, ako bolo zistené, čiastočne ovplyvňuje presný chod autofokusačného programu.

Konštrukčné riešenie optickej časti aparatury, návrhy fokusačných objektívov a analýza obmedzení spôsobených stojanom budú použité v nových návrhoch rôznych cenovo a funkčne rozdielnych interakčných LIBS SP & DP a LIFS komôr, na ktorých sa v súčasnosti spolupracuje s firmou Tescan.

ZOZNAM POUŽITÝCH VELIČÍN, JEDNOTIEK A SKRATIEK

LIBS	Laser Induced Breakdown Spectroscopy
SP	Single Pulse
DP	Double Pulse
LIFS	Laser Induced Fluorescence Spectroscopy
m	hmnotnosť [kg]
Q	náboj [C]
E	energia [J]
h	Planckova konštanta
c	rýchlosť svetla
λ	vlnová dĺžka [m]
USB	Universal Serial Bus
CCD	Charge Coupled Detector
fy	firmy
mJ	milijoule
s	sekunda
ν	frekvencia [s^{-1}]
P	pravdepodobnosť
e	exponenciálna funkcia
k	Boltzmannova konštanta
T	termodynamická teplota [K]
ÚFI	Ústav fyzikálního inženýrství
FSI	Fakulta strojního inženýrství
VUT	Vysoké učení technické
Nd:YAG	Neodym: Yttrium Aluminium Granát
Ti:Sa	Titán: Zafír
μg	mikrogram
mm	milimeter
nm	nanometer
ICCD	Intensive CCD
UHV	Ultra High Vacuum
UV – FS	Ultraviolet-Fused Silica
€	Euro
AV ČR	Akademie věd České republiky
ÚPT	Ústav přístrojové techniky
LED	Light-emitting Diode

ZOZNAM OBRÁZKOV A TABULIEK

- Obr. 1.1 – Typické usporiadanie zostavy LIBS
Obr. 1.2 – Absorbancia, emisia a stimulovaná emisia fotónu
Obr. 1.3 – Hlavné časti laseru
Obr. 1.4 – Schéma spektrometra
Obr. 1.5 – Zostava LIBS (SP & DP) a LIFS na ÚFI FSI VUT
Obr. 1.6 – Užívateľské rozhranie programu L3D
- Obr. 2.1 – Optický stojan
Obr. 2.2 – Zorné pole kamery pri maximálnom priblížení zoom objektívom
- Obr. 3.1 – Model pôvodného stojana
Obr. 3.2 – Trasovanie optického systému s vyznačenými apertúrami
Obr. 3.3 – Trasovanie prechodu lúča cez šošovku – výpočet sférickej vady
Obr. 3.4 – Priebeh sférickej vady pre rôzne spojky
Obr. 3.5 – Spot diagram
Obr. 3.6 – Pozdĺžna vada
Obr. 3.7 – Trasovanie lúčov cez sférickú a asférickú šošovku
Obr. 3.8 – Rez asférickou plochou
Obr. 3.9 – Spot diagram
Obr. 3.10 – Pozdĺžna vada
Obr. 3.11 – Priebeh sférickej vady pre spojky a rozptylky
Obr. 3.12 – Súčasné riešenie priezoru
Obr. 3.13 – Nový návrh priezoru
Obr. 3.14 – Súčasné riešenie posuvu
Obr. 3.15 – Úpravy posuvu pre väčší objektív
Obr. 3.16 – Typický priebeh odrazivosti dielektrického zrkadla
Obr. 3.17 – Konštrukčný návrh dielektrického zrkadla
Obr. 3.18 – Detail umiestnenia uzávierky
Obr. 3.19 – Návrh krytu stojana
Obr. 3.20 – Návrh osvetlenia
Obr. 3.21 – Finálny návrh stojana
- Obr. 4.1 – Zorné pole s použitím tripletu
Obr. 4.2 – Zorné pole s použitím singletu
Obr. 4.3 – Abláčny kráter – triplet
Obr. 4.4 – Abláčny kráter – singlet

- Tab. 1 – Priemery spotov sférických singletov
- Tab. 2 – Priemery spotov asférického singletu
- Tab. 3 – Priemery spotov asférických dubletov
- Tab. 4 – Parametre vhodných objektívov od fy. Sill Optics
- Tab. 5 – K návrhu nového vákuového priezoru

ZOZNAM PRÍLOH – VÝKRESOVÁ DOKUMENTÁCIA

BC_12_1 – Stojan – zoznam položiek
BC_12_1 – Stojan
BC_12_1_1 – Príruba
BC_12_1_9 – Držiak
BC_12_1_13 – Zrkadlo – zoznam položiek
BC_12_1_13 – Zrkadlo
BC_12_1_13_1 – Držiak zrkadla
BC_12_1_13_3 – Rám zrkadla
BC_12_1_13_4 – Rám zrkadla – dolný
BC_12_1_13_5 – Rám zrkadla – horný
BC_12_1_13_6 – Spojka
BC_12_1_14 – Držiak
BC_12_1_15_1 – Držiak horný
BC_12_1_16 – Medzerník
BC_12_1_13_1 – Držiak zrkadla
BC_12_1_17 – Kryt 3-4 – zoznam položiek
BC_12_1_17 – Kryt 3-4
BC_12_1_17_1 – Kryt 3-4
BC_12_1_18 – Kryt 1-4 – zoznam položiek
BC_12_1_18 – Kryt 1-4
BC_12_1_18_1 – Kryt 1-4
BC_12_1_18_4 – Doraz
BC_12_1_19 – CCD – zoznam položiek
BC_12_1_19 – CCD
BC_12_1_22 – Posuv objektívu – zoznam položiek
BC_12_1_22 – Posuv objektívu
BC_12_1_22_1 – Konzola 1
BC_12_1_22_2 – Konzola 2

POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] BARLOW, B. *Northeast Astronomy Forum* (Spectroscopy History) [online]. 2004 [cit. 2012-03-03]. Dostupné z: <http://www.neafsolar.com/bb/spectroscopy.html>.
- [2] *Mass spectrometry* [online]. 2012 [cit. 2012-02-26], Wikipedia. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Mass_spectrometry.
- [3] PARTINGTON, J.R. *A History of Chemistry*. London: Macimillian & Co. Ltd., 1970. 370 s.
- [4] TYLECOTE, R.F. *A History of Metallurgy*. 2. vyd. London: Institute of Materials, 1992. 205 s. ISBN 0901462888.
- [5] VÉMOLA, T. *Navázání svazku Ti:Sa laseru do interakční komory v sestavě LIBS+LIFS*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 41 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jozef Kaiser, Ph.D.
- [6] LABUTIN, T.A. a kol. Correlation between properties of a solid sample and laser-induced plasma parameters. *Spectrochimica Acta Part B*. 2009, č. 64, s. 938 – 949.
- [7] BABUSHOK, V.I. a kol. Double pulse lased ablation and plasma: Laser induced breakdown spectroscopy signal enhancement. *Spectrochimica Acta Part B*. 2006, č. 61, s. 999 – 1014.
- [8] SIMEONSSON, J.B., WILLIAMSON, L.J. Characterization of laser induced breakdown plasmas used for measurements of arsenic, antimony and selenium hydrides. *Spectrochimica acta Part B*. 2011, č. 66, s. 754 – 760.
- [9] ARAGÓN, C., AGUILERA, L.J. Characterization of laser induced plasmas by optical emission spectroscopy: A review of experiments and methods. *Spectrochimica Acta Part B*. 2008, č. 63, s. 893 – 916.
- [10] CAPITELLI, M. a kol. Laser-induced plasma expansion: theoretical and experimental aspects. *Spectrochimica Acta Part B*. 2004, č. 59, s. 271 – 289.
- [11] COLONNA, G., CASAVOLA, A., CAPITELLI, M. Modelling of LIBS plasma expansion. *Spectrochimica Acta Part B*. 2001, č. 56, s. 567 – 586.
- [12] CAPITELLI, M. a kol. On the relaxation of electron energy distribution function in LIBS plasmas. *Chemical Physics Letters*. 2001, č. 316, s. 517 – 523.
- [13] AGULIERA, J.A., ARAGÓN, C., PENALBA, F. Plasma shielding effect in laser ablation of metallic samples and its influence on LIBS analysis. *Applied Surface Science*. 1998, č. 127 – 129, s. 309 – 314.
- [14] AGUILERA, J.A. a kol. Study of matrix effects in laser induced breakdown spectroscopy on metallic samples using plasma characterization by emission spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part B*. 2009, č. 64, s. 993 – 998.

- [15] PROCHAZKA, D. *Stanovení optimálních experimentálních parametrů pro laserovou spektrometrii (LIBS) vybraných vzorků rostlin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 45 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jozef Kaiser, Ph.D.
- [16] MIROV, S., PITT, B. Novel laser breakdown spectrometer provides multi-element analysis for environmental monitoring. *OE Reports* [online]. 1999, roč. 16, č. 189 [cit. 2008-04-20], s. 1-20. Dostupné z: www.phy.uab.edu.
- [17] *Datový standard MZ ČR* [online]. [cit. 13-05-09]. Dostupné z: http://ciselniky.dasta.mzcr.cz/CD/hypertext/JVABW_soubory/image001.jpg.
- [18] KACHTÍK, L. *Laser: Součásti* [online]. 2011 [cit. 2012-02-26]. Dostupné z: <http://www.lasery.wz.cz/soucasti.html>.
- [19] *Spectrometry* [online]. 2011 [cit. 2012-02-26], Wikipedia. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Spectrometer_schematic.gif.
- [20] NOVOTNÝ, J. *Metody LIBS na VUT v Brně (LIBS + LIFS aparatura)* [online]. 2011 [cit. 2012-03-05]. Dostupné z: <http://libs.fme.vutbr.cz/index.php/cs/laborato/stolni-libsdb-libs-aparatura>.
- [21] NOVOTNÝ, J. *Návrh systému pro automatické nastavení vzorku do ohniskové vzdálenosti objektivu v sestavě laserové spektroskopie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007. 53 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jozef Kaiser, Ph.D.
- [22] OLEJNÍK, I. *Návrh posuvu fokusačního objektivu uvnitř interakční komory LIBS aparatury*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 44 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jozef Kaiser, Ph.D.
- [23] *Laser Solar LQ529A* [online]. Minsk (Belarus): SOLAR laser systems, 2005 [cit. 2012-03-15]. Dostupné z: <http://www.solarls.eu/lq.html>.
- [24] HAVELKA, B. *Geometrická optika*. 1. díl. Praha: Vydavatelství Československé akademie věd, 1955. 344 s.
- [25] *Optical Elements* [online]. Newton, NJ (USA): Optics, 2011 [cit. 2012-03-15]. Dostupné z: http://www.thorlabs.com/images/Catalog/V21/V21_3_Optics.pdf.
- [26] *N-BK7 Index of Refraction* [online]. 2011 [cit. 2012-04-12], Thorlabs. Dostupné z: <http://thorlabs.com/images/TabImages/BK7index.txt>
- [27] *Fused Silica* [online]. 2011 [cit. 2012-04-12], Sciner. Dostupné z: <http://www.sciner.com/Opticsland/FS.htm>
- [28] *Aspheric Lens* [online]. 2012 [cit. 2012-04-12], Wikipedia. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Aspheric_lens.
- [29] *Aspheric Lens* [online]. 2012 [cit. 2012-04-12], Risee Optical. Dostupné z: http://riseeoptical.en.alibaba.com/product/290393708-201574001/1_56_ASPHERIC_LENS_eyeglass_lens_.html

- [30] HAVELKA, B. *Geometrická optika*. 2. díl. Praha: Vydavatelství Československé akademie věd, 1956. 289 s.
- [31] *Petzval Lens* [online]. 2012 [cit. 2012-04-17], Wikipedia. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Petzval_lens.
- [32] *Airspaced focussing lenses- fused silica* [online]. Wendelstein (Germany): Laser Optics: Focussing Lenses, 2010 [cit. 2012-04-17]. Dostupné z: <http://www.siloptics.de/english/downloads/34.pdf>.
- [33] *Airspaced focussing lenses - optical glass* [online]. Wendelstein (Germany): Laser Optics: Focussing Lenses, 2010 [cit. 2012-04-17]. Dostupné z: <http://www.siloptics.de/english/downloads/35.pdf>.
- [34] *KF Flanges* [online]. Uckfield (UK): Flanges & Fittings, 2012 [cit. 2012-04-17]. Dostupné z: <http://caburn.co.uk/resources/downloads/pdfs/sec1.2.1.pdf>.
- [35] *Fused Silica Viewports* [online]. Uckfield (UK): Viewports, 2012 [cit. 2012-04-17]. Dostupné z: <http://caburn.co.uk/resources/downloads/pdfs/sec5.1.4.pdf>.
- [36] VÉMOLA, T. *Navázání svazku Ti:Sa laseru do interakční komory v sestavě LIBS+LIFS*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 41 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jozef Kaiser, Ph.D.
- [37] *High-Energy Nd:YAG Laser Mirrors* [online]. 2012 [cit. 2012-05-07], Newport. Dostupné z: http://www.newport.com/High-Energy-Nd-YAG-Laser-Mirrors/542311/1033/info.aspx#tab_Specifications.
- [38] *U4UTS204* [online]. Albuquerque, NM (USA): Ultra Thin Shutters, 2012 [cit. 2012-04-17]. Dostupné z: <https://www.cvimellesgriot.com/Products/Documents/Downloads/24220A-S.pdf>.