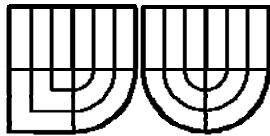


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ



FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING



NÁVRH POSUVU FOKUSAČNÍHO OBJEKTIVU UVNITŘ
INTERAKČNÍ KOMORY LIBS APARATURY
DESIGN OF TRANSLATION STAGE FOR FOCUSING OBJECTIVE INSIDE THE LIBS
INTERACTION

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. IVAN OLEJNÍK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Doc. Ing. JOZEF KAISER, PhD.

BRNO 2007

Abstrakt

Diplomová práca popisuje návrh posuvu fokusačného objektívu vo vnútri interakčnej komory LIBS. Obsahuje popis základných vlastností a funkcií LIBS spektroskopie. Opisuje prehľad použiteľných komponentov, hodnotí ich vlastnosti a vhodnosť použitia v konštrukcii posuvu do vákua. Ďalej uvádza výsledné konštrukčné riešenie lineárneho posuvu do vákua a hodnotí jeho výhody pre metódu LIBS.

Kľúčové slová

Lineárny posuv do vákua, LIBS spektroskopia, posuv objektívu, lineárne vedenie.

Abstract

This diploma thesis describes the design of a translation stage for focusing objective inside the LIBS interaction chamber. It contains a description of the fundamentals and basic functions of LIBS spectroscopy. Moreover, in the thesis an overview of different translation stages as possible LIBS components is given. Their advantages and disadvantages for use in a vacuum translation stage construction are evaluated. The thesis describes the final solution of a linear translation stage for focusing objective, and his advantages for LIBS method.

Key words

Linear translation system for vacuum, LIBS spectroscopy, translation stage for focusing objective, linear guidance system.

Bibliografická citácia

OLEJNÍK, I. *Návrh posuvu fokusačného objektívu uvnitř interakční komory LIBS aparatury*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. XY s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jozef Kaiser, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci zpracoval samostatně na základě uvedené literatury a pod vedením svého vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 22. května 2008

.....

podpis

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu diplomovej práce Doc. Ing. Jozefovi Kaiserovi, Ph.D. za odborné vedenie, ktoré mi pri spracovaní mojej diplomovej práce venoval.

Za pomoc a cenné praktické poznatky, ktoré som využil vo svojej diplomovej práci ďakujem Ing. Radomírovi Malinovi, PhD a Ing. Petrovi Tichopádkovi.

Obsah

Abstrakt	
Bibliografická citácia	
Čestné prohlášení	
Podakovanie	
Obsah.....	7
1 Úvod.....	9
1.1 OES (optical emission spetroscopy).....	10
1.2 Vynájdenie metódy LIBS	11
2 Základy LIBS.....	12
2.1 Základné princípy a výhody	12
2.2 Komponenty v LIBS aparátúre.....	15
2.2.1 Lasery.....	15
2.2.2 Spektroskopické metódy.....	16
2.2.3 Detektory	17
3 Vznik plazmy v metóde LIBS.....	18
3.1 Úvod	18
3.2 Vznik plazmy po dopade laserového pulzu.....	18
3.3 Plazma vhodná pre analýzu technológiou LIBS.....	20
3.4 Množstvo odobraného materiálu	21
3.5 Časový rozvoj plazmy	22
3.6 Kalibrácia.....	22
3.7 Formovanie plazmy v plynach a kvapalinách	23
4 Technológia LIBS na ÚFI.....	24
4.1 Laser Nd:YAG.....	25
4.2 Spektrometer.....	25
4.3 Interakčná komora	26
5 Dôvody návrhu a požiadavky na posuv	27
5.1 Rozloženie systému v interakčnej komore	27
5.2 Dôvody realizácie posuvu	27
5.3 Požiadavky na posuv	28
5.4 Vplyv ohniskovej vzdialenosti fokusačnej šošovky na plazmu	29

6	Výber vhodných komponentov	30
6.1	Valivé vedenia	30
6.1.1	Rolníčkové valivé vedenia	30
6.1.2	Jednokoľajové valčekové vedenia	31
6.1.3	Jednokoľajové guľôčkové vedenia	32
6.1.4	Tyčové lineárne guľôčkové vedenia	33
6.2	Krokové motory	35
6.3	Guľôčkové šraubys	37
6.4	Použitie šraubys s metrickým závitom ako pohybový šraub	39
7	Návrh posuvu fokusačného objektívu	42
7.1	Počiatočný návrh	42
7.2	Použité komponenty	44
7.3	Konštrukcia posuvu	46
7.3.1	Základňa	46
7.3.2	Držiak šošovky	46
7.3.3	Prvý návrh posuvu	47
7.3.4	Spojka	47
7.3.5	Konečný návrh	48
8	Záver	50
9	Použitá literatúra	51
	Zoznam použitých skratiek a symbolov	52
	Zoznam príloh	54

1 Úvod

LIBS je skratka z anglického Laser Induced Breakdown Spectroscopy, čo v preklade znamená laserom indukovaná spektroskopická analýza. Patrí medzi metódy OES (optical emission spectroscopy), teda k metódam atómovej emisnej spektroskopie. Pri analýze sa využíva laserom generovaná plazma. Keďže je plazma formovaná fokusovaným optickým žiarením, má mnoho výhod oproti konvenčnej OES technológii, ktorá využíva ako zdroj excitácie a atomizácie elektródy, prípadne cievku. Do popredia oproti konvenčnej OES vystupuje hlavne schopnosť analyzovať vzorky in situ a takmer bez akejkoľvek prípravy. V podstate metóda LIBS uskutočňuje formovanie laserom indukovanej plazmy na povrchu, alebo vo vzorke (plyn, kvapalina) a nasleduje zber a spektrálna analýza žiarenia plazmy. Kvalitatívna a kvantitatívna analýza je uskutočňovaná sledovaním pozície emisných spektrálnych čiar a ich intenzity. Metóda LIBS prakticky existuje takmer 40 rokov, od vynájdenia prvého laseru v roku 1960 a už od počiatku svojej existencie, hlavne do roku 1980, bola zameraná skôr na základné formovanie plazmy. Avšak od roku 1980 sa analytické schopnosti začali viac rozširovať, no napriek tomu tých niekoľko prístrojov využívajúcich LIBS, ktoré boli vyvinuté, nenašlo širšie použitie. Neskôr došlo k obnoveniu záujmu o túto metódu a k jej rozvoju do širokej škály použitia, čo bolo hlavne výsledkom značného technologického vývoja komponentov používaných v LIBS (lasery, spektroskopy, detektory) [2, str.3]. Od počiatku, až do dnešnej doby sa vyskytujú rozmanité oblasti aplikácií: monitorovanie kvality materiálov a zvarov v prípade kovových konštrukcií, alebo oblasť monitorovania životného prostredia (kvapalné, plynné, tuhé vzorky; skúmanie kontaminácií v priemyselných aj ťažko dostupných, alebo nebezpečných prostredí s využitím optických vlákien) LIBS aparáturu je možné vybudovať ako mobilné zariadenie a prispôbiť daným aplikáciám [14].

ÚFI FSI VUT sa metódou LIBS zaoberá takmer 10 rokov. Pracovisko disponuje laboratórnou LIBS aparáturu pozostávajúcou z dvoch vysokovýkonných Ng:YAG pulzných laserov (Quantel Brilliant B, Solar LQ 916), Ti:Sa laseru (Solar LX325), pulzného generátoru (Stanford Research System DG535), spektroskopu (monochromátor Triax 320) s ICCD kamerou (Andor iStar 734) a interakčnej komory (Vega LM). V interakčnej komore sa nachádza kompucentrický stolček riadený počítačom s posuvom vo všetkých troch osách, na ktorý sa umiestňujú skúmané vzorky. Laserový zväzok vstupujúci do komory je fokusovaný objektívom s ručným posuvom a zber žiarenia plazmy zaobstaráva zberný systém, pomocou ktorého je žiarenie prenášané do spektroskopu a následne snímané ICCD kamerou. Vyhodnocovanie prebieha v počítači.

Cieľom tejto diplomovej práce je návrh systému pre uchytenie a posuv fokusačného objektívu vo vnútri interakčnej komory LIBS. Návrh musí vychádzať zo stávajúceho experimentálneho zariadenia a mal by využiť konštrukčné prvky, ktoré už sú súčasťou komory. Posuv má byť riešený pomocou krokového motorčeku ovládaného počítačom. Celý systém by mal byť schopný pracovať vo vákuu, teda by pohybové súčasti nemali byť mazané (mazivo sa vo vákuu časom odparí) a zároveň eliminovali trenie na minimum. Zaoštrovanie sa vykonáva s presnosťou 0,1 mm, preto by posuv mal dosahovať minimálne tejto hodnoty. Krátery vzniknuté po odparení časti vzorky majú približne 50 μm , z čoho vyplýva požiadavka na radiálnu presnosť menšiu, alebo rovnú 50 μm . Rozmery posuvu samozrejme nesmú obmedzovať pohyb kompucentrického stolčeka, ale zároveň aby posuv umožnil použitie šošoviek s rozličnou ohniskovou vzdialenosťou.

Diplomová práca sa spočiatku zaoberá históriou, základným princípom a výhodami aké metóda LIBS poskytuje oproti iným spektroskopickým metódam. Tretia kapitola je venovaná stručnému popisu plazmy vznikajúcej pôsobením laserového pulzu a vlastnosťami

plazmy potrebnými k analýze. Vo štvrtej kapitole nasleduje popis metódy LIBS a komponenty laboratórnej zostavy na ÚFI. Ešte pred samotným riešením návrhu posuvu, popisuje v kapitole č. 5 stávajúci systém posuvu v komore a z neho vyplývajúce problémy. Ďalej uvádza požiadavky, ktoré by navrhovaný posuv mal spĺňať. Šiesta kapitola uvádza teoretický prehľad komponentmi vybranými ako vhodné ku konštrukcii posuvu. V poslednej kapitole sa diplomová práca zaoberá samotným návrhom posuvu, tieto kapitoly obsahujú popis komponentov posuvu a jeho postupné úpravy až k samotnému konečnému riešeniu.

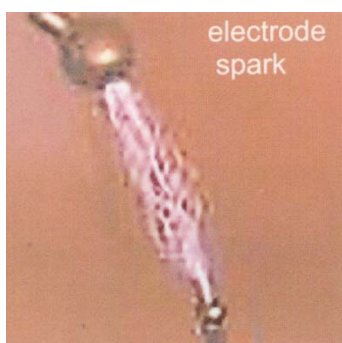
1.1 OES (optical emission spectroscopy)

Základom je spektroskopický rozbor plazmou emitovaného žiarenia, ktoré vzniká zo vzorky vonkajším pôsobením. Cieľom OES je presne určiť základné zložky skúmanej vzorky. Na analýzu je možné použiť vzorky v pevnom, kvapalnom aj plynnom skupenstve. Analýza sa môže pohybovať v rozmedzí od jednoduchej identifikácie atomárnych zložiek vzorky, až po detailnejšie určenie relatívnej koncentrácie, alebo absolútneho objemu. Základnými krokmi OES sú [2, str.2]:

- *atomizácia/odparovanie vzorky za vzniku voľných častíc (neutrálne atómy a ióny),*
- *excitácia atómov,*
- *detekcia emitovaného žiarenia,*
- *kalibrácia intenzity vo vzťahu na koncentráciu, alebo množstvo,*
- *určenie koncentrácie, objemov, prípadne iných informácií.*

Pri analýze sa využíva unikátneho emisného spektra každého prvku v skúmanej vzorke, tak ako odtlačky prstov u človeka. Pozícia emisnej čiary v prípadne správnej kalibrácie určuje prvok a intenzita spektrálnej čiary poukazuje na obsiahnuté množstvo.

Začiatky OES je možné spätne vysledovať až k experimentom Bunsena a Kirchhoffa (okolo roku 1860), kedy základné kroky atomizácia a odparovanie boli uskutočňované pomocou plameňa [4, str.3]. Na základe týchto pokusov boli následne vyvinuté kontrolovateľnejšie metódy excitácie, za použitia elektrického prúdu. Medzi dobre známe metódy patria napríklad mikrovlnami indukovaná plazma (MIP), elektrickým oblúkom medzi elektródami indukovaná plazma – obrázok č. 1a, magnetickou indukciou (ICP) – obrázok č. 1b, alebo dutou katódovou lampou indukovaná plazma. Tieto tradičné zdroje zvyčajne vyžadujú odpovedajúcu podporu laboratórnych zariadení a aspoň určitú prípravu vzoriek. Z týchto a mnohých iných dôvodov mali tieto metódy veľmi obmedzené použitie [2, str.2].



Obrázok č. 1a: Plazma indukovaná medzi elektródami [4, str.111].



Obrázok č. 1b: Plazma indukovaná magnetickou indukciou [4, str.111].

1.2 Vynájdenie metódy LIBS

Technológia dielektrického rozkladu pomocou optického žiarenia, teda proces generovania plazmy používaný v LIBS, musela čakať až do vynájdenia laseru v roku 1960. Schopnosť vytvoriť dielektrický rozklad v plynoch bol však známy už najmenej 100 rokov. Vyžarovanie môže byť pomerne jednoducho vyprodukované v nízkotlakových plynových trubiciach, či už bez, alebo za použitia elektród vo frekvenciách rádovo stoviek kilohertzov až do desiatok megahertzov. Analýza spektier z týchto zdrojov ukázala emisné charakteristiky zloženia plynu. V nasledujúcich rokoch bol demonštrovaný rozbor plynov vytváraný frekvenciami v rádoch gigahertzov, pri znížených tlakoch za použitia mikrovlnného elektromagnetického poľa. Pri atmosférickom tlaku intenzita elektrického poľa vyžaduje, aby pre rozbor, či už statickým, alebo mikrovlnným poľom, bola v rádoch desiatok kilovoltov na centimeter. Situácia v optických frekvenciách potrebuje značne silnejšie pole a to až v 10 MV/cm. Toto nebolo za stávajúcej situácie možné a preto bolo potrebné vyvinúť nový zdroj svetla [4, str.4].

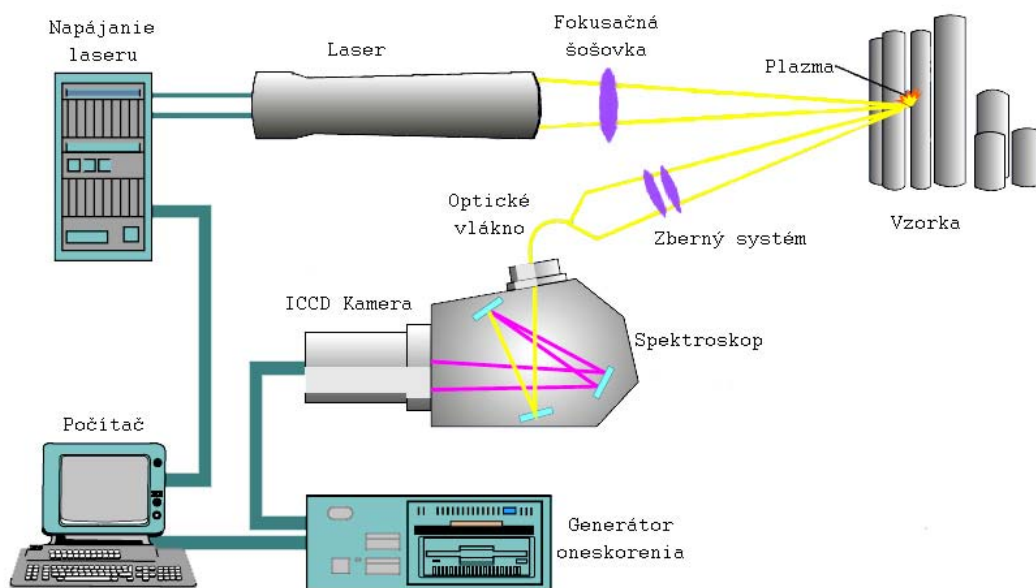
Novým zdrojom svetla bol laser. Prvý laser vyvinul 16. mája 1960 Theodor Maiman. Laserového zväzku dosiahol ožarovaním kocky syntetického rubínu obyčajným svetlom. Prvý laser však zatiaľ nebol schopný produkovať dostatočne silné pole. Zmenu prinieslo až vyvinutie takzvaného Q-switched laseru, ktorému sa budeme venovať v kapitole 2.2.1. V nasledujúcich rokoch dochádzalo k postupnému zdokonaľovaniu a technológia zaznamenala niekoľko významných míľnikov [2, str.6]:

- 1960 – *Demonštrovaný prvý laser.*
- 1962 – *Brech a Cross demonštrovali prvú laserom indukovanú plazmu na povrchu.*
- 1963 – *Prvé použitie k analýze, týkajúce sa povrchu vzorky a tým odštartovaný zdroj laserom indukovanej spektroskopickéj analýzy, teda LIBS.*
- 1963 – *Prvá správa o laserom indukovanej plazme v plynoch.*
- 1963 – *Demonštrovaná laserová, mikrospektrálna analýza.*
- 1964 – *Vykonaná spektroskopia časovo závislej plazmy.*
- 1966 – *Štúdium charakteristík laserom indukovaného výboja vo vzduchu.*
- 1966 – *Prvý krát priamo laserovým lúčom analyzovaný roztavený kov.*
- 1970 – *Prvé porovnanie výsledkov medzi Q-switched laserom a laserom bez Q-switched.*
- 1972 – *Analýza ocele vykonaná Q-switched laserom.*
- 1980 – *Vyvinutý LIBS pre analýzu nebezpečných aerosólov.*
- 1980 – *LIBS prvý krát použitý na diagnostiku v nukleárnom priemysle.*
- 1984 – *Demonštrovaná prvá analýza kvapalnej vzorky.*
- 1989 – *Prvá detekcia kovu v pôde pomocou metódy laserom vytvorenej plazmy.*
- 1992 – *Vyvinutý prenosný LIBS na monitorovanie znečisťujúcich látok.*
- 1993 – *Prvá dôveryhodná, podvodná analýza za použitia duálneho, pulzného laseru.*
- 1995 – *Demonštrácia LIBS s laserovým pulzom vypáleným pomocou optického vlákna.*
- 1997 – *Použitie LIBS na identifikáciu pigmentu v umeleckých maľbách.*
- 1998 – *Pod povrchová analýza pôdy kuželovým penetrometrom založeným na technológii LIBS.*
- 2000 – *Demonštrácia LIBS na NASA Mars rover.*

2 Základy LIBS

2.1 Základné princípy a výhody

Princíp fungovania metódy LIBS je schematicky zobrazený na obrázku č.2. Laserový pulz so stálou frekvenciou pulzov a intenzitou v MW/cm^2 je vypálený z laseru a následne fokusovaný šošovkou na vzorku. Dĺžka trvania pulzu sa pohybuje približne okolo 10 ns. Po dopade laserového zväzku na vzorku dôjde k odpareniu malého množstva materiálu (1-100 ng) a k vzniku plazmy. Procesu vzniku plazmy sa budeme venovať neskôr v kapitole 3.2. Následne je žiarenie plazmy zberným optickým systémom prenášané do optického vlákna. Prostredníctvom neho sa dostáva do spektroskopu. V spektroskope je pomocou optických členov žiarenie rozložené na spektrum, v ktorom môžeme nájsť spektrálne čiary prvkov. Na vyhodnocovanie sa používa počítač, do ktorého sa spektrálne čiary dostávajú pomocou ICCD kamery, pripojenej ku spektroskopu. Ku spektroskopu je zároveň pripojený generátor oneskorenia, ktorý spôsobuje posunutie začiatku analýzy voči začiatku laserového pulzu. Časovému rozvoju plazmy a signálu oneskorenia sa budeme podrobnejšie venovať v kapitole 3.5.



Obrázok č. 2 : Schéma technológie LIBS [5].

LIBS, ako aj iné metódy založené na princípe OES majú oproti ostatným metódam značné výhody [4, str.17]:

- schopnosť detekovať takmer všetky prvky,
- možnosť simultánne detekovať viacero prvkov.

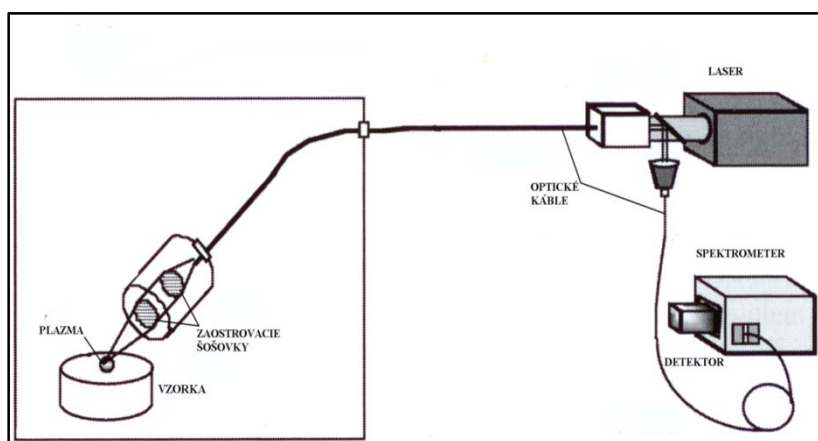
Pretože plazma vzniká použitím fokusovaného optického žiarenia, má LIBS oproti fyzikálnym zariadeniam využívajúcim na vznik plazmy napríklad elektródy, ďalšie značné výhody [4, str.17]:

- jednoduchosť,
- analýza je rýchla a dalo by sa povedať v reálnom čase,
- žiadna, prípadne malá príprava vzoriek,
- umožnenie analýzy in situ, vyžadujúcej len optický prístup k vzorke,
- možnosť porovnateľne dobre skúmať vzorky v plynnom, kvapalnom aj pevnom skupenstve,
- dobrá citlivosť na určité prvky (napr. Cl, F), ktoré sú ťažko detekovateľné konvenčnými OES metódami,
- prispôsobivosť širokej škále možností merania,
- schopnosť vytvoriť masívnu plazmu v podmienkach nevýhodných pre konvenčné metódy.

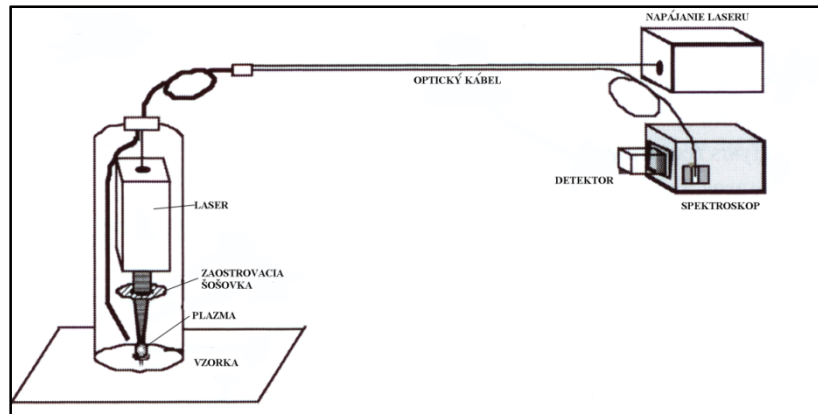
Prispôsobivosť širokej škále možností merania

Priama analýza. V najčastejších základných konfiguráciách technológie LIBS, tak ako na obrázku č.3a, je použitím šošoviek s krátkou ohniskovou vzdialenosťou, laserový pulz fokusovaný na povrch vzorky (kvapaliny, tuhé látky), alebo do vzorky (plyny aj kvapaliny) k sformovaniu plazmy. Žiarenie plazmy je zbierané optickým káblom a prenášané k analýze do spektroskopu. Alternatívne je však možné svetlo zbierať šošovkami a fokusovať priamo do monochromátoru, alebo na mriežku spektroskopu, prípadne kolimované na prechod priamo, či už pásmovým filtrom, alebo iným frekvenčne selektívnym zariadením [4, str.17].

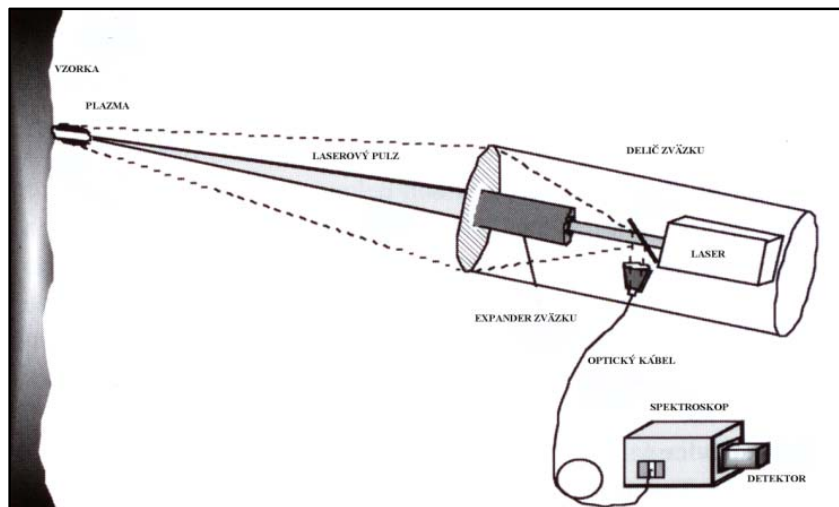
Prenos optickým vláknom. Transport svetla optickým káblom na dlhú vzdialenosť je dobre známy. Od nedávna, ako preukázali výsledky materiálov optických vlákien, je možné fokusovať intenzitu v rádoch MW/cm^2 do optického vlákna bez jeho poškodenia a transportovať energiu v desiatkach mJ. Vďaka týmto schopnostiam materiálov bolo možné demonštrovať prenos laserového pulzu na viac ako 100 m. Žiarenie plazmy je možné zbierať a transportovať naspäť na detekciu pomocou toho istého vlákna, prípadne je možné použiť iné vlákno. Prípady prenosu laserového zväzku a spätného transportu žiarenia plazmy je vidieť na obrázkoch č. 3a, b, c. Obrázok č. 3a schematicky zobrazuje klasický prípad prenosu optickým vláknom, obrázok č. 3b zobrazuje prípad zvaný kompaktná sonda a č. 3c predstavuje tzv. „stand-off“ analýzu. Posledný menovaný systém pracuje na základe fokusovania laserového pulzu na vzorku z určitej vzdialenosti s použitím optického systému s veľkou ohniskovou vzdialenosťou [4, str.17].



Obrázok č.3a: Schéma klasickej zostavy LIBS [4, str.18].



Obrázok č. 3b: Schéma zostavy LIBS využívajúca kompaktnú sondu [4, str.18].



Obrázok č. 3c: Schéma LIBS zvanej „stand-off“ [4, str.18].

Žiadna, prípadne malá príprava vzoriek

LIBS nevyžaduje žiadnu prípravu vzoriek oproti konvenčným metódam OES, pretože ablácia a excitácia sa deje na tom istom mieste (ohnisko). Napríklad pri použití metódy vytvárania plazmy elektrickým oblúkom medzi elektródami, je nutné vzorku najprv chemicky spopolniť a to kvôli vzniku roztoku, ktorý je rozprášený do plazmy spôsobenej elektrickým oblúkom [4, str.19].

Chemická príprava je časovo náročná a niekedy proces vyžaduje laboratórne podmienky. Niekedy je však potrebné vypáliť na jedno miesto takzvaný ošetrovací pulz, ktorým sa povrch očistí od povrchových nečistôt a oxidov, ešte pred vypálením analyticky použiteľného pulzu [4, str. 19].

In situ analýza. Pre metódy OES je typické, že skúmaná vzorka musí byť prinesená k prístroju. Pretože laserom indukovaná plazma je generovaná fokusovaným svetlom, materiály môžu byť analyzované priamo, často in situ (na mieste). Je potrebné „iba“ zamerať laserový pulz na cieľový materiál. Naopak technológia LIBS umožňuje reverzný postup a teda priniesť zdroj k skúmanej vzorke. Typicky je vzdialenosť medzi vzorkou a prístrojom LIBS len niekoľko centimetrov (prípadne desiatok centimetrov), ale v niektorých prípadoch (obrázok č. 3c) môže byť vzdialenosť niekoľko metrov [4, str.20].

Rýchlosť analýzy. Z dôvodu žiadnej prípravy vzoriek a jednoduchosti technológie ju je možné považovať za meranie v reálnom čase. Kvôli krátkemu životu plazmy (niekoľko desiatok mikrosekúnd), vysokej rýchlosti akou je spektrum možné nahráť a minimálny čas na spracovanie spektra, vytvára meranie pomocou LIBS takmer okamžité [4, str.20].

2.2 Komponenty v LIBS aparátúre

Na schematickom obrázku č.2 je možné vidieť základné komponenty aparátúry. To zahŕňa laser, spektrálne selektívne zariadenia na sledovanie spektrálnych čiar a na detekciu spektrálne selektovaného svetla. Špecifikácia komponentov v aparátúre závisí na použití technológie a skúmaných vzorkách. Faktory na zváženie zahŕňajú [1, str.30]:

1. testované prvky (počet a druh)
2. charakter vzoriek (homogenitu, komplikovanosť zloženia)
3. typ analýzy (kvalitatívna verzus kvantitatívna)
4. skupenstvo vzorky (plyn, kvapalina, tuhá látka)

2.2.1 Lasery

Parametre dôležité k špecifikácii laserového zariadenia v LIBS sú [4, str.30]:

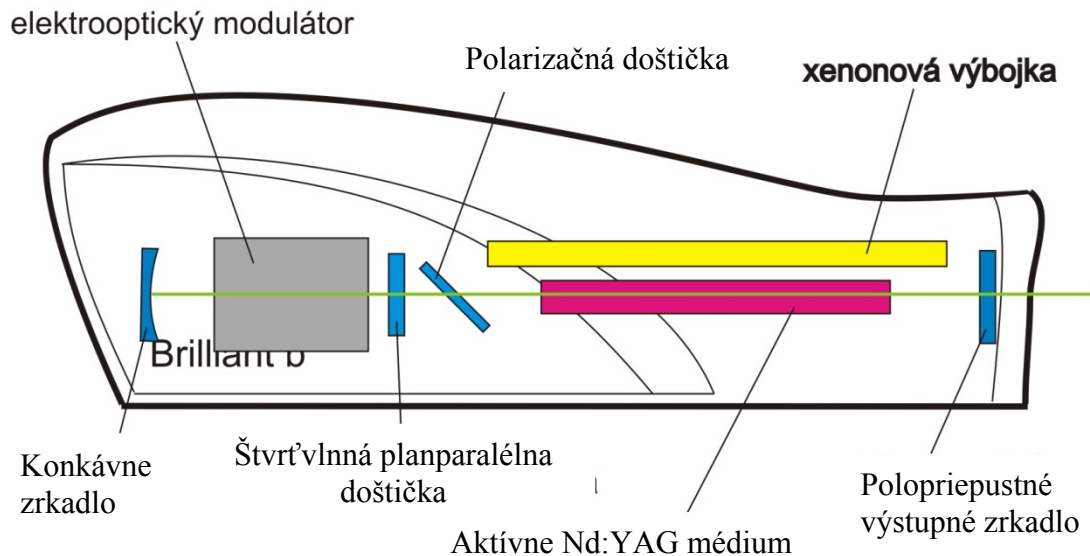
1. energia pulzu
2. rýchlosť opakovania pulzov
3. kvalita módu zväzku
4. veľkosť/váha
5. chladenie a spôsob elektrického napájania

Vo väčšine prípadov nie je vlnová dĺžka laserového zväzku dôležitým faktorom. Je však na zvážení, ak sú faktory bezpečnosti očí, spoľahlivosti a vlnovej dĺžky izolovaného svetla kritické. Na druhej strane konkrétna vlnová dĺžka môže znásobiť výkonnosť na špecifickej vzorke, respektíve každá vlnová dĺžka vytvára rozdielnu veľkosť stopy v ohnisku. Špecifikácia vlnovej dĺžky teda úzko súvisí s materiálom skúmanej vzorky [4, str.31].

Medzi najčastejšie používané lasery patrí Nd:YAG laser, ktoré sú spoľahlivým a veľmi vhodným zdrojom silných pulzov na vytváranie laserom generovanej plazmy. Jedná sa o laser z radu pevno-látkových. Aktívnou látkou je kryštál ytrium alumínium granátu, ($Y_3Al_5O_{12}$) obohatený o neodym (Nd^{3+}). Čerpanie kryštálu je zabezpečované xenónovou výbojkou. V najnovších prístrojoch je čerpanie uskutočňované poľom polovodičových diód. V závislosti na budení môže tento laser pracovať v pulznom aj kontinuálnom režime. Jeho najobvyklejšou vlnovou dĺžkou je 1064 nm. Je ju zároveň možné veľmi jednoducho konvertovať na kratšie vlnové dĺžky (532, 355, 266 nm), použitím pasívneho kryštálu, čo umožňuje určité výhody v navýšení energie v spojení s určitým typom vzorky [2, str.32].

V technológii LIBS sa používajú Nd:YAG lasery s možnosťou Q-switched režimu. Tento režim umožňuje sformovanie krátkych pulzov s veľkou intenzitou. Princíp je založený na vložení kryštálu (elektro-optického modulátoru), ktorý pôsobí ako uzávierka, do optického rezonátoru laseru, schematicky na obrázku č. 4. Dôležitou vlastnosťou Q-switch modulu je takzvaný „Q“ faktor (quality factor). Pri laserovaní pôsobuje pozdržanie laserového pulzu a tým zvýšenie prahu pre laserovú akciu. Následne umožňuje zosilniť populačnú inverziu nad

jej normálnu prahovú hodnotu. Keď je uzávierka uvoľnená dôjde k vypáleniu jediného krátkeho laserového pulzu [1, str.1930].



Obrázok č.4: Schematický obrázok laseru elektro-optickým modulátorom (Q-switched) [5].

Ďalšími najpoužívanejšími lasermi v technológii LIBS sú pulzné, plynné CO₂ lasery s vlnovou dĺžkou 10,6 μm a farbivové lasery s typickými vlnovými dĺžkami 193, 248 a 308 nm. V porovnaní s pevno-látkovými, tieto lasery vyžadujú väčšiu údržbu (napr. výmena plynu) a špeciálne optické materiály, pretože ich vlnové dĺžky ležia ďaleko v oblasti infračerveného a ultrafialového spektra. Z týchto dôvodov sú menej používané [4, str.31].

Nd:YAG lasery sú komerčne dostupné v širokej škále veľkosti, od laboratórne používaných s výstupom 1 J a viac na pulz s frekvenciou medzi 10 až 50 Hz, až po ručné lasery s energiou na pulz 17 mJ a frekvenciou 1 Hz. Laboratórne lasery často vyžadujú vodné chladenie prípadne výmenník tepla, zatiaľ čo ručné prístroje sú vzduchom chladené a napájané batériami [4, str.31].

2.2.2 Spektroskopické metódy

Základom LIBS analýzy je zber a rozbor laserom vytvorenej mikroplazmy. Rozloženie žiarenia plazmy na emisné spektrum je vykonávané pomocou spektroskopov. Najdôležitejšími vlastnosťami spektroskopu sú [4, str.31]:

1. rozlíšenie, teda rozdiel vlnových dĺžok, aby bolo možné rozoznať dva susedné spektrálne prvky, ako dve odlišné čiary
2. šírka spektra, ktoré môže byť pozorované

Ďalej uvediem niekoľko príkladov rôznych spektrálnych komponentov v LIBS [4, str.31].

- Úzko-priepustný filter s pevnou vlnovou dĺžkou ($< 1 \text{ nm}$).
- Laditeľný akusto-optický filter zložený z kryštalického materiálu (napr. TeO₂) s aplikáciou rádio-frekvenčnej vlny. Zmenou frekvencie vlny môže byť priepustný filter kontinuálne ladený v určitom rozsahu.

- Monochromátor je spektrometer, ktorý je naladený na sledovanie vybranej vlnovej dĺžky. Tá je následne na výstupnej štrbine zariadenia dostupná k detekcii. Najrozšírenejšou konfiguráciou je Czerny-Turner.
- Spektrograf má v základe podobnú konfiguráciu ako monochromátor. Rozdiel je v tom, že rozsah vlnových dĺžok je dostupný k detekcii za použitia detektorov s poľom fotodiód (CCD, CID). Prípadne séria jedno-vlnovodízkových detektorov umiestnených za individuálnou štrbinou pre každý detektor a vlnovú dĺžku.
- Echelle-Spektrograf umožňuje pokrytie rozsahu vlnových dĺžok. Najčastejšie v rozpätí od 190 do 800 nm, ktoré je pre LIBS najpoužiteľnejšie. Najsilnejšie emisné čiary väčšiny prvkov sa nachádzajú v tomto rozpätí.

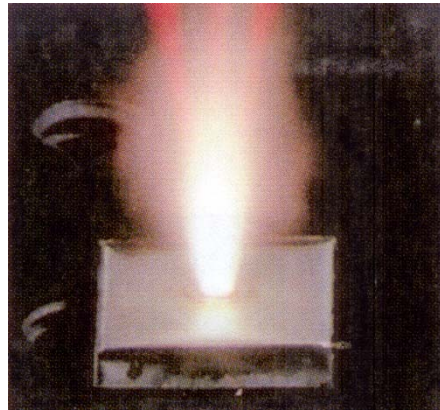
2.2.3 Detektory

Typy detektorov používaných v technológii LIBS sú určené požitou spektroskopickou metódou. Najjednoduchšími fotodetektormi je fotonásobičová trubica a fotodiódy. Tieto fotodetektory sú používané prevažne so spektrálne selektívnymi metódami ako filtre s pevnou vlnovou dĺžkou, akusto-optické, laditeľné filtre a monochromátory. V konfigurácii so spektrografom a echelle-spektrografom sú najpoužívanéjšie detektory s poľom fotodiód (PDA- photodiode detector array), CCD – charged-coupled device, CID – charge-injection device, ICCD- intensified charged-coupled device. Ich výhodou sú rozmery a rýchlosť čítania zapisovaných informácií. Typickým PDA rozmiestnením je rozstup fotodiód 25 μm , teda pole o 1024 pixeloch má dĺžku približne 25 mm. Na druhú stranu CCD a CID sú dvojrozmerné polia pixlov a môžu zaznamenávať informácie o intenzite v dvoch osách. Typickým rozsahom poľa pixlov je od 9 x 9 μm do 24 x 24 μm a formát poľa v rozsahu od 576 x 384 pixlov do 3072 x 2048 s vysokým rozsahom polí medzi týmito extrémami [4, str.34-35].

3 Vznik plazmy v metóde LIBS

3.1 Úvod

Plazma vytvorená laserovým žiarením sa intenzívne skúma už od objavenia laseru, tj. 1960. V tejto kapitole priblížim morfológiu plaziem a ich vzťahu k analýze metódou LIBS. Budem sa zaoberať prevažne plazmami vznikajúcimi pôsobením laserového pulzu (obrázok č.5). Objasním spôsob vzniku, vhodnosť pre analýzu z hľadiska zloženia a teploty, ale taktiež z hľadiska časového rozvoja od dopadu laserového zväzku na vzorku, až po vychladnutie.



Obrázok č.5: Plazma vytvorená laserom na vzorke v tuhom skupenstve [2, str. 111].

Plazma je lokálne zoskupenie atómov, iónov a voľných elektrónov, súhrnne elektricky neutrálne, v ktorom nabité častice fungujú kolektívne. Plazmu je možné charakterizovať mnohými parametrami, z ktorých najzákladnejším je stupeň ionizácie. Ak sa jedná o slabo ionizovanú plazmu, je pomer elektrónov ku ostatným časticiam menej ako 10%. Druhým extrémom je vysoko ionizovaná plazma. Môže obsahovať množstvo atómov zbavených ich elektrónov a výsledkom je vysoký pomer elektrónov v pomere ku atómom/iónom. Plazmy v LIBS spadajú zväčša do kategórie slabo ionizovaných [2, str. 21].

3.2 Vznik plazmy po dopade laserového pulzu

Pôsobenie laserového pulzu na vzorku je možné rozdeliť do nasledujúcich fáz [6, str. 123]:



Kvantitatívna analýza je založená na znalosti funkcie $S_x=f(c_x)$, ktorá vyjadruje závislosť intenzity zobrazovaného signálu pre danú vlnovú dĺžku, na ktorej prvok vyžaruje, na koncentrácii skúmaného prvku X. Táto závislosť je zobrazená v nasledujúcej schéme [6, str. 123]:

$$c_x \rightarrow N_x \rightarrow N_x^* \rightarrow J \rightarrow Q \rightarrow I_x \rightarrow S_x,$$

kde je:

c_x koncentrácia skúmaného prvku X vo vzorke (napr. Cr vo vzorke oceli),

N_x počet atómov prvku X v plazme,

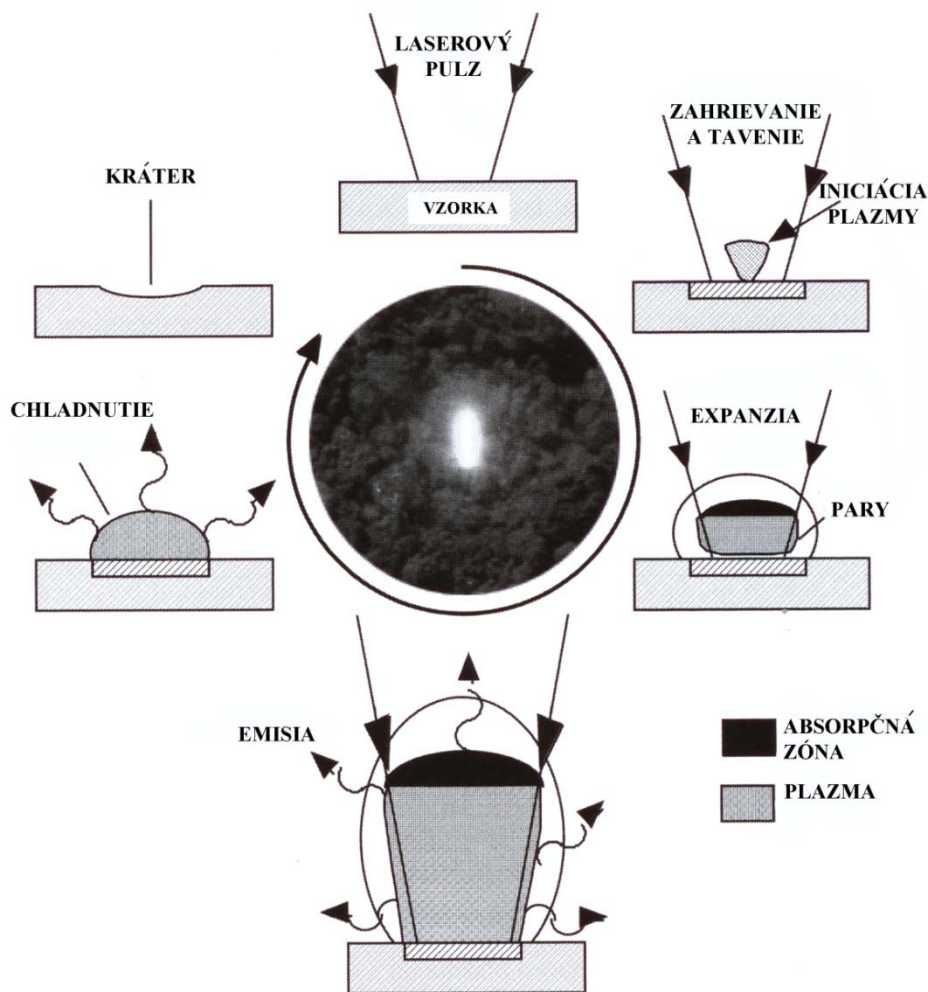
N_x^* počet atómov prvku X v excitovanom stave,

J celková intenzita od týchto spektrálnych čiar,

Q časť tejto intenzity vstupujúcej do spektroskopu,

I_x intenzita spektrálnej čiary prvku X na určitej vlnovej dĺžke,

S_x intenzita signálu registrovaného na detektore spektroskope.



Obrázok č.6: Diagram životného cyklu plazmy [4, str.10].

Zaostrenie vysoko energetického laserového pulzu na vzorku iniciuje postupnosť udalostí závislých na jeho dĺžke trvania, vlnovej dĺžke a samozrejme na fyzikálnych a chemických vlastnostiach vzorky. Takzvaný cyklus „života“ plazmy od inicializácie dopadajúcim laserovým pulzom, až po vychladnutie a zanechaný kráter po odparení materiálu je schematicky zobrazený na obrázku č. 6 [4, str.9-10].

Zahrievanie, tavenie

Počiatočným javom po dopade laserového pulzu je „absorpcia“ dopadajúcich fotónov, atómami danej vzorky. Fotóny spôsobujú kolízie (časovo porovnateľné s dĺžkou trvania pulzu) s atómami. To vedie k ohrievaniu materiálu v mieste dopadu pulzu. Dochádza k odvodu tepla z tejto oblasti hlbšie do materiálu a okolia. Ďalším postupom pulzu však materiál stráca schopnosť teplo odvádzať. Teplota v obmedzenej oblasti okolo dopadu pulzu rapídne stúpa (10^{10} Ks^{-1}), čo vedie k vzniku tenkej roztavenej vrstvičky materiálu [6, str. 123-124].

Odparovanie

Po vytvorení roztavenej vrstvičky materiálu tepelná energia na povrchu neustále narastá a po určitom čase je dosiahnuté stavu, kedy je prekročené skupenské teplo varu pre daný materiál. Teplo nemôže byť odvádzané z miesta dopadu laserového dostatočne rýchlo a dochádza k odparovaniu. Teplota povrchu je v tomto procese regulovaná odparovacím procesom [6, str. 124].

Hustota energie na danom povrchu pri intenzite ožarovania I je teda It_1 , pričom t_1 je dĺžka trvania laserového pulzu. Z toho následne vyplýva, že stredná žiarivá energia na jednotku hmotnosti E_s , ktorú je potrebné na vytvorenie tenkej roztavenej vrstvičky, je daná vzťahom [6, str. 124]

$$E_s = \frac{It_1}{\rho(Dt_1)^{1/2}}, \quad (1)$$

kde ρ je hustota látky a D je koeficient termodifúzie. K odpareniu je potrebné, aby teplo presiahlo hodnotu merného skupenského tepla vyparovania l_v danej vzorky. Tento stav je možno dosiahnuť dodaním takzvanej minimálnej intenzity I_{min} , ktorá je potrebná na dosiahnutie prahu vyparovania. Pre túto intenzitu platí [6, str. 124]

$$I_{min} = \rho l_v \left(\frac{D}{t_1} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

kde l_v je merné skupenské teplo vyparovania. Odtiaľ je zrejmé, že I_{min} je závislá na dĺžke trvania laserového pulzu. Preto je potrebné rozlišovať medzi laserom operujúcim v normálnom móde, ktoré majú výstupný pulz s dĺžkou od 150 do 300 μs a takzvanými Q-switched lasermi už spomínanými v kapitole 2.2.1 s dĺžkou jediného pulzu menšou ako 100 ns [6, str. 124]

3.3 Plazma vhodná pre analýzu technológiou LIBS

Pre intenzitu nad spodnou prahovou hodnotou (od 10 do 100 GWm^{-2}), odparovanie z tenkej roztavenej vrstvičky prebieha za normálnej teploty varu daného materiálu. Takto nízka hustota pár je pre laserový zväzok prakticky transparentná. Dochádza k veľmi malému ohrevu, kedy teplota rozpinania plazmy závisí iba na vlastnostiach vzorky a na intenzite I . matematické modely pre tento druh plazmy predpovedajú expanznú rýchlosť okolo 900 ms^{-1}

a teploty asi 3200 K pre vzorku železa. Uvedený druh plazmy je pre LIBS spektroskopiu iba veľmi málo použiteľný [6, str. 124].

Pre horné prahové hodnoty s veľmi vysokou I (väčšie ako 1 PWm^{-2}) je vzniknutá plazma príliš hustá a má vysokú teplotu. Plazma s týmito vlastnosťami sa používa v experimentoch, zaoberajúcich sa termojadrovou syntézou iniciovanou laserom. Všeobecne je pre LIBS spektroskopiu použiteľná len plazma medzi zmienenými prahovými hodnotami (od 100 GWm^{-2} do 1 PWm^{-2}). Pre I v rozsahu hodnôt špecifikovaných v predchádzajúcich odstavcoch, môže byť tlak pár príliš vysoký, takže dochádza k absorpcii dopadajúceho laserového žiarenia. Dochádza k nej v tenkej, čiastočne ionizovanej vrstve (obrázok č.5), ktorá existuje medzi pevnou látkou a oblakom pary [6, str. 124].

Hustota elektrónov N_e v tejto vrstve dosahuje kritickej elektrónovej hustoty N_c , čo spôsobí zamedzeniu dopadu laserového žiarenia na vzorku. Laserový pulz je odrážaný od plazmy, pokiaľ jej hodnota neklesne pod kritickú hodnotu [6, str. 124]

$$N_c = 1,09 \cdot 10^{15} \lambda^{-2}. \quad (3)$$

V dôsledku interakcie žiarenia laserového pulzu a plazmy dochádza k nárastu elektrónovej hustoty plazmy. Ak je dosiahnutá kritická hustota N_c , laserový pulz je odrážaný a nepreniká až k povrchu vzorky. Pretože sa žiarenie laseru nemôže šíriť plazmou s hustotou väčšou ako je kritická, je zrejmé, že N_c môže hrať významnú úlohu. Žiarenie z laseru je absorbované v parách mechanizmom inverzného brzdného žiarenia, čo má za následok ohrev a expanziu plazmy a tým aj zníženie jej hustoty. Laserové svetlo môže opäť dopadnúť na povrch vzorky a odpariť ďalšie malé množstvo materiálu, ktoré opäť zvýši hustotu plazmy. Tento takzvaný „samoregulačný“ režim sa opakuje a dochádza k rozpinaniu plazmy rýchlosťou až 10 kms^{-1} po dobu trvania laserového pulzu. Po skončení pulzu plazma chladne a slabne [1, str. 1919].

Uvedený popis odparovania materiálu z povrchu vzorky je fenomenologický. Avšak je jasné, že fyzikálne vlastnosti materiálu – ich závislosť na teplote a tlaku – ako napríklad tepelná vodivosť, merné teplo, bod varu a tlak pár môžu mať veľký vplyv na parametre výslednej plazmy [6].

3.4 Množstvo odobraného materiálu

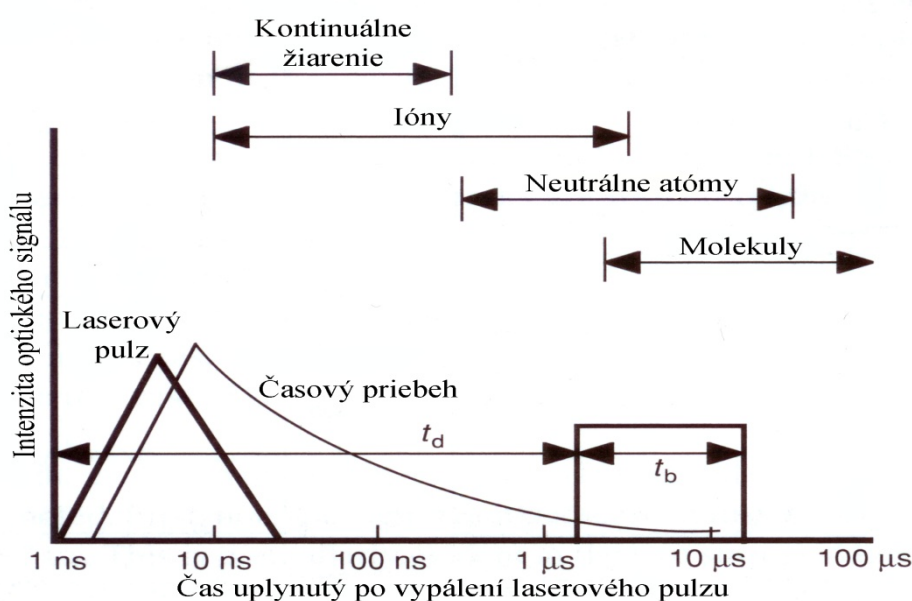
Množstvo odobraného materiálu úzko súvisí s odparovacím procesom a už vyššie spomenutými fyzikálnymi vlastnosťami materiálu. V tabuľke č. 1 sú uvedené vybrané hodnoty množstva odobraného materiálu, jedným laserovým pulzom, pre rôzne materiály. Pokus bol uskutočňovaný za podmienok : Použitý laser je Nd:YAG s vlnovou dĺžkou 1064 nm, dĺžka trvania pulzu $\tau = 8 \text{ ns}$, energia pulzu $E_p = 13 \text{ mJ}$ [6].

Skúmaná vzorka	Odstránená hmotnosť [ng]
Hliník	170
Meď	84
Oceľ	30
Boraxové sklo ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$)	3
Keramika (Al_2O_3)	4
Mosadz (Cu 65,5%, Zn 34,1%)	90

Tabuľka č. 1: Množstvo odobraného materiálu pre rôzne materiály [6].

3.5 Časový rozvoj plazmy

Pre techniku LIBS je dôležitá znalosť časového rozvoja plazmy. Z počiatku nie je možné uskutočňovať spektroskopické meranie, pretože v prvých desiatkach nanosekúnd je v plazme emitované kontinuálne brzdné žiarenie ako výsledok interakcií elektrón-ión a ión-ión. V niekoľkých prvých stovkách nanosekúnd sa plazma ochladzuje, kontinuálne pozadie sa znižuje a začínajú byť znateľné ostré spektrálne čiary, ktoré sú spôsobené prechodmi ionizovaných atómov. Po čase, rádovo tisícov nanosekúnd väčšinou zostávajú viditeľné iba ostré emisné čiary raz ionizovaných atómov, ktoré sú hlavne využívané metódou LIBS [6]. Časový rozvoj plazmy je schematicky zobrazený na obrázku č. 8. Vzhľadom na časový rozvoj plazmy je potrebné nastaviť oneskorenie signálu, ktorý oneskorí počiatok spektroskopickej analýzy voči vypálenému laserovému pulzu. Oneskorenie signálu je zobrazené na obrázku č. 8 ako t_d a čas snímania žiarenia plazmy vhodnej k analýze ako t_b [4, str. 7], [6].



Obrázok č. 8: Časový rozvoj plazmy [2, str. 7].

3.6 Kalibrácia

LIBS nie je absolútna metóda, tak ako aj mnoho iných ďalších analyticko-optických metód. Vyžaduje štandardné vzorky so známym zložením pre porovnanie a neskoršiu analýzu „neznámej vzorky“. Emisné čiary z týchto štandardov sú použité k zostrojeniu kalibračných kriviek. K zostrojeniu týchto kriviek sa spravidla využíva intenzity starostlivo vybranej spektrálnej čiary prvku s najväčším percentuálnym zastúpením (referenčná čiara) a jej pomeru k intenzite spektrálnej čiary prvku (kalibračná čiara) s hľadaným percentuálnym zastúpením.

Podľa kalibračných kriviek je možné nájsť obsah prvku v neznámej vzorke. Celý proces vyhodnocovania je extrémne rýchly a automatizuje sa počítačom. Z týchto dôvodov metódu LIBS môžeme považovať za metódu reálneho času. Ak poznáme kalibračné krivky aj pre iné prvky, potom môže byť uskutočnená kompletná materiálová analýza vzorky [6].

3.7 Formovanie plazmy v plynoch a kvapalinách

Spočiatku sa analýza metódou LIBS zameriavala prevažne na tuhé látky, ale tak ako sa špecifické vzorkovacie schopnosti laserového výboja viac realizovali, metóda sa rozšírila na široké spektrum iných vzoriek. Dnes sa LIBS bez akýchkoľvek problémov používa na analýzu plynov, kvapalín častíc obsiahnutých v plynoch, kvapalinách a častice alebo vrstvy pevných látok.

Minimum energie k dosiahnutiu vzniku plazmy vo vzduchu pre 7 ns dlhý laserový pulz s vlnovou dĺžkou 532 nm, ktorý je fokusovaný šošovkou s ohniskovou vzdialenosťou 12,7 mm, je 15,5 mJ. Pri rovnakom usporiadaní stačí ku vzniku plazmy vo vzorke stojatej vody iba 5,4 mJ. Všeobecne teda platí, že najmenšiu intenzitu k vytvoreniu plazmy vyžadujú pevné látky, kvapaliny vyžadujú viac a plynné prostredie najviac intenzity [6].

Formovanie plazmy v plynoch

V plynoch sa na vytvorenie plazmy použije menej energie na atomizáciu, a tak viac energie zostáva na proces excitácie. V zásade je väčšia hustota žiarenia a väčší je aj iniciačný pomer medzi iónmi a neutrálnymi atómami. Prah rozpadu je mierne vyšší v plynoch ako na povrchu vzorky v pevnom skupenstve. Objem plazmy závisí na energii pulzu a jeho vlnovej dĺžke. Pre nominálnu energiu pulzu 200 mJ bude dĺžka plazmy väčšia pre vysoko energické CO₂ laserové pulzy (5-8 mm dĺžka) a menšie pre 266 nm Nd:YAG pulz (1-5 mm). Teplota plazmy v plynoch sa pohybuje okolo 20000 K a viac [4, str.14].

Formovanie plazmy v kvapalinách

Kvapaliny môžu byť analyzované formovaním plazmy na povrchu kvapaliny, kvapke kvapaliny, prípadne na povrchu tečúcej kvapaliny. Ak je kvapalina pre laserový pulz transparentná, plazma môže byť utvorená v objeme kvapaliny pod povrchom. V porovnaní s LIBS vo vzduchu sa plazma v kvapalinách rozkladá značne rýchlejšie, emisné čiary sú širšie a teplota je nižšia, väčšinou začína okolo 7000 – 12000 K. Detekčné limity pre vybrané prvky v kvapalnom médiu môžu byť zvýšené použitím dvoj pulzného systému (RSP), kde dva za sebou nasledujúce pulzy typicky oneskorené o mikrosekundy, analyzujú ten istý objem vzorky. Prvý pulz spôsobí odparenie a druhý pulz následne reaguje s odpareným objemom. Samotná analýza sa potom uskutočňuje vo vzduchu [4, str.14].

Formovanie plazmy v časticiach

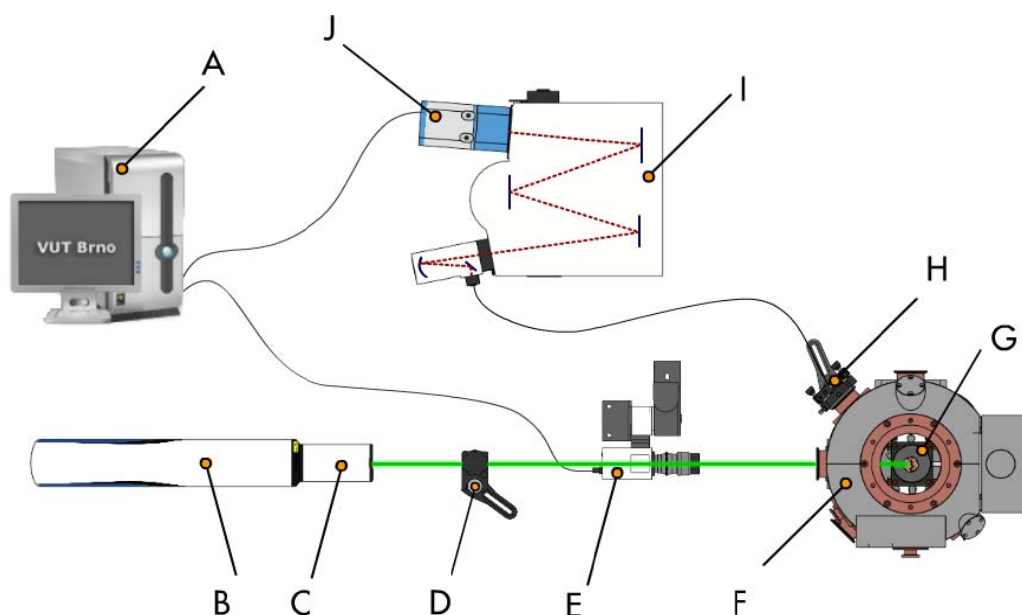
Jedná sa o analýzu častíc obsiahnutých v kvapalinách (hydrosól) a v plynoch (aerosól), ktorá má v súčasnosti veľký význam pre monitorovanie životného prostredia. Využívajú sa dve základné stratégie získavania informácií, priame monitorovanie v okolitom prostredí a zachytávanie častíc vo filtroch a ich analýza na povrchu filtra. Prvý prípad sa používa na analýzu aerosólov a druhý prípad na analýzu zemín [4, str.14].

4 Technológia LIBS na ÚFI

V laboratóriu ÚFI FSI sa nachádza zostava technológie LIBS v laboratórnom zložení, ako je možné vidieť na obrázku č.9a, b.



Obrázok č.9a: Laboratórna zostava LIBS na ÚFI [14].



Obrázok č.9b: Laboratórna zostava LIBS na ÚFI [5].

Zostava obsahuje počítač (A), pomocou ktorého sa vyhodnocujú výsledky analýzy a zároveň sa pomocou neho ovláda komponentný posuv stolčeku so vzorkou. Ďalším komponentom je Nd:YAG laser (B), 2ω modul (C), zostava optických prvkov (D) na prevod laserového zväzku z laseru do komory, kamera (E), interakčná komora (F) s komponentným stolčekom (G), systém (H) na zber a prenos žiarenia plazmy do spektrometru (I) s ICCD detektorom (J).

4.1 Laser Nd:YAG

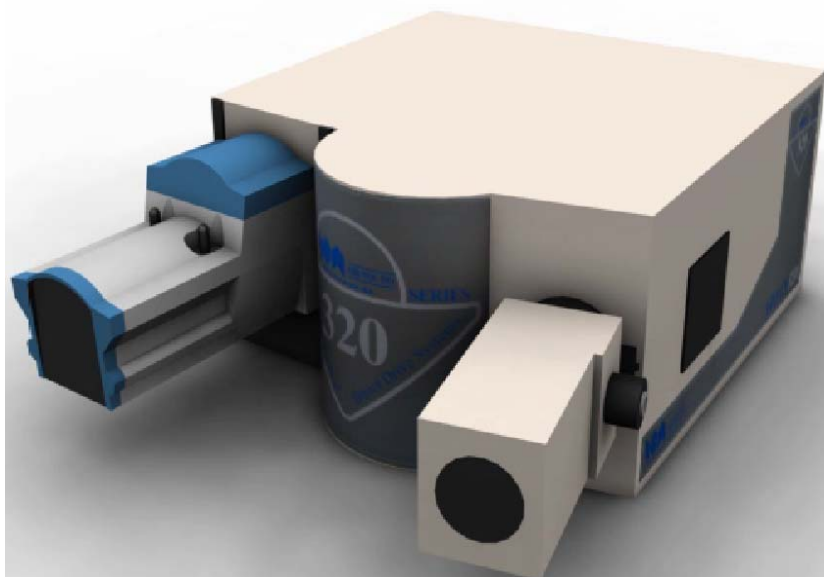
- Nd:YAG laser s označením Brilliant B (obrázok č.10) dodaný firmou Quantel.
- Obsahuje Nd:YAG kryštál s priemerom 9,5 mm, externe budený xenónovou výbojkou.
- Štandardná vlnová dĺžka 1064 nm s možnosťou skrátenia modulom (harmonický oscilátor) na 532, 355, 266, 213 nm. V laboratóriu použitý 2ω modul, ktorý skracuje vlnovú dĺžku na 532 nm.
- Pri analýze je používaný Q-switched režim.



Obrázok č. 10: Nd:YAG laser z laboratória ÚFI s 2ω modulom.

4.2 Spektrometer

Monochromátor TRIAX 320 od firmy Jojin Yvon Horiba (obrázok č. 11) s ICCD (Intensified Charged Couple Device) kamerou Andor iStar 734.

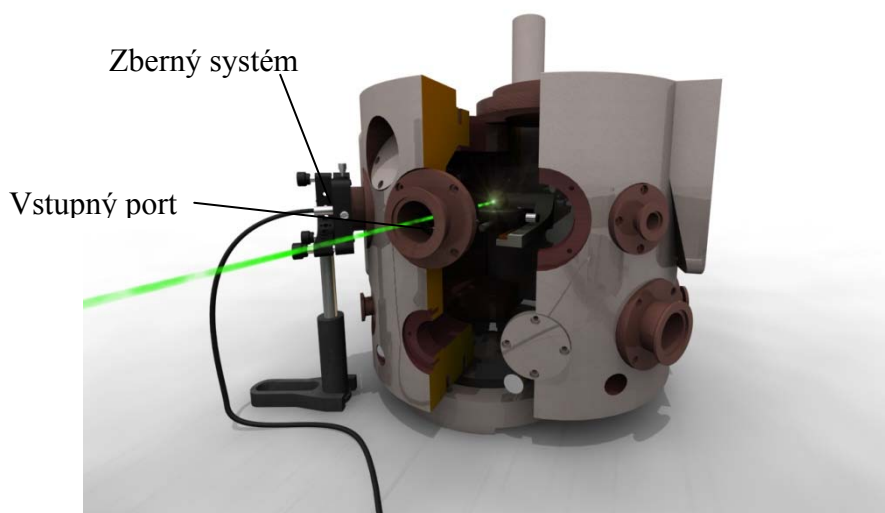


Obrázok č.11: Monochromátor TRIAX 320 s ICCD kamerou.

4.3 Interakčná komora

Vlastnosti komory [13]:

- Modifikovaná LM komora z mikroskopu rady VEGA od firmy TESCAN (obrázok č. 12).
- Komora obsahuje kompucentrický stolček umožňujúci motorizovaný posuv v osách x , y , z , rotáciu o 360° a ručný náklon od -75° do $+50^\circ$.
- Komora obsahuje 11 vstupných portov.
- Ovládanie je zabezpečené softwarom Vega.



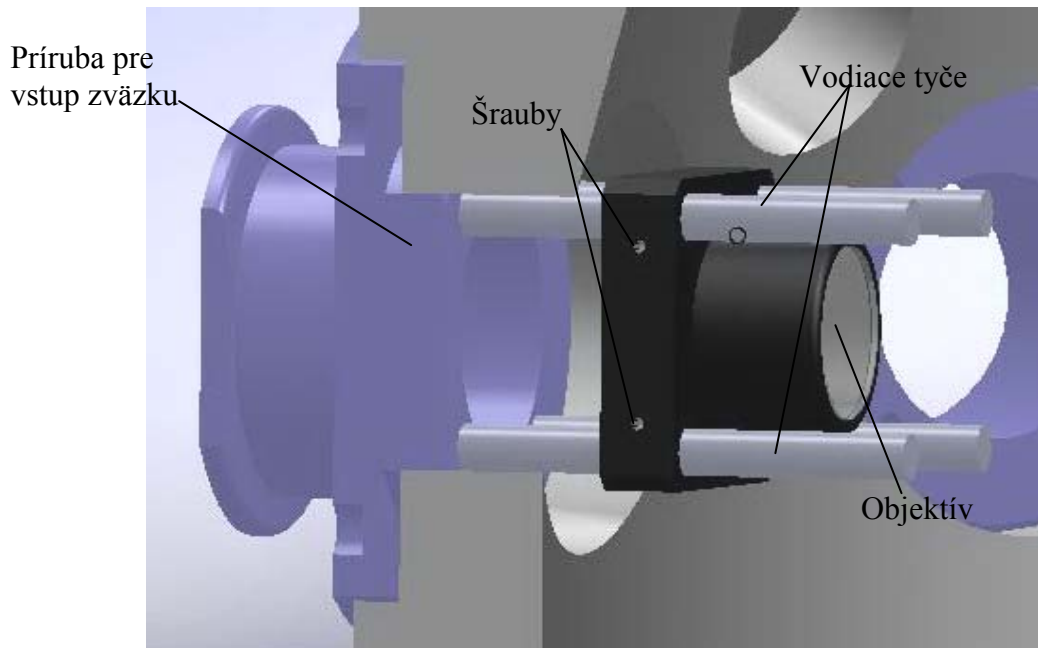
Obrázok č.12: Interakčná komora LM [5].

Laserový zväzok vstupuje do komory portom (prírubou) v prednej stene (obrázok č.12), interaguje so vzorkou a žiarenie plazmy je prenášané z komory zberným systémom a optickým káblom do spektrometru.

5 Dôvody návrhu a požiadavky na posuv

5.1 Rozloženie systému v interakčnej komore

Obrázok č. 12 znázorňuje laserový zväzok vstupujúci do komory portom v prednej stene komory a fokusovaný objektívom, ktorý je umiestnený za týmto portom na vodiacich tyčiach (obrázok č. 13).



Obrázok č. 13: Fokusačná šošovka s ručným posuvom.

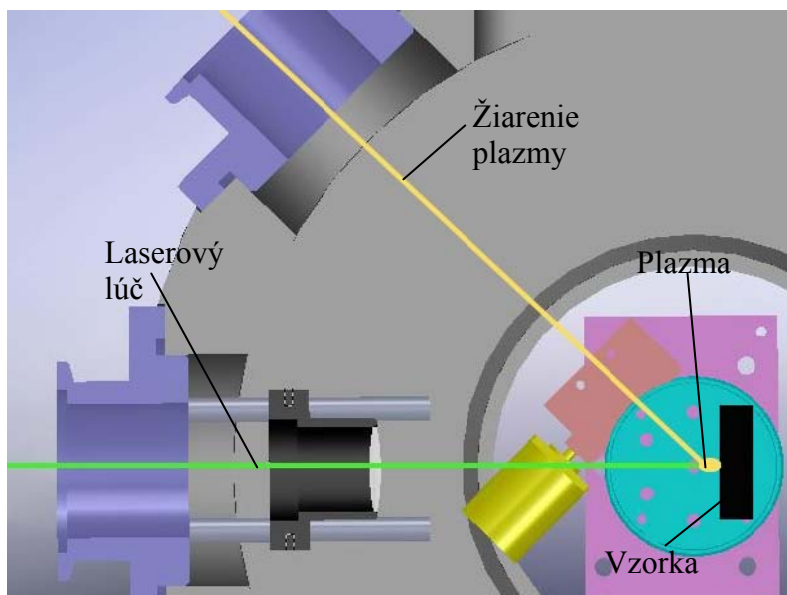
Skúmaná vzorka je umiestnená na posuvnom stolčeku uprostred komory. Žiarenie z plazmy je prenášané zberným systémom a optickým káblom do spektrometru. V hornej časti komory je umiestnená výveva, ktorá z komory odsáva vzduch. Pri špecifických prípadoch analýzy sa vákuum nahrádza argónom, ktorý zvyšuje ostrosť niektorých spektrálnych čiar analyzovaných prvkov.

5.2 Dôvody realizácie posuvu

Doposiaľ sa fokusovanie uskutočňovalo pomocou posuvu kompucentrického stolčeka. Vzorka bola umiestnená na stolček. Pomocou ručného posuvu šošovky po vodiacich tyčiach sa laserový zväzok zaostřil na vzorku len približne a úplné doostrenie obstaral počítačom riadený posuv stolčeka. Presnosť stolčeka dovoľovala dokonalé zaostrenie vzorky do ohniskovej roviny šošovky. Do tejto ohniskovej roviny, kvôli zberu žiarenia z plazmy, musí byť zaostřený aj zberný systém (obrázok č. 14). Pri doostrovaní posuvom stolčeka sa vzorka dostávala z ohniskovej roviny zberného systému a celé nastavenie sa muselo nanovo modifikovať. Toto rozostrovanie bolo hlavným dôvodom návrhu posuvu fokusačnej šošovky. Ďalším dôvodom bol už spomínaný ručný posuv šošovky. Šošovka je umiestnená v držiaku a ten je možné posúvať na štyroch vodiacich tyčiach.

K posuvu šošovky bolo nutné otvoriť komoru a povoliť sériu šraubov umiestnených na držiaku šošovky, na každej z tyčí. Po nastavení šošovky do predpokladanej správnej polohy sa tieto šraubov opäť utiahli a tým zabezpečili udržanie polohy počas chodu aparatury

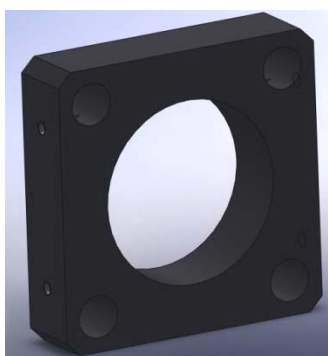
(obrázok č. 13). Požiadavkou bolo, aby tento posuv bolo možné obsluhovať počítačom za chodu bez toho, aby bolo nutné otvárať komoru.



Obrázok č. 14: Schéma chodu lúčov v komore.

Všetky komponenty stávajúceho posuvu sú dodané firmou Thorlabs, obrázky č. 15a,

b.



Obrázok č. 15a: Držiak šošovky Thorlabs.



Obrázok č. 15b: Vodiaca tyč.

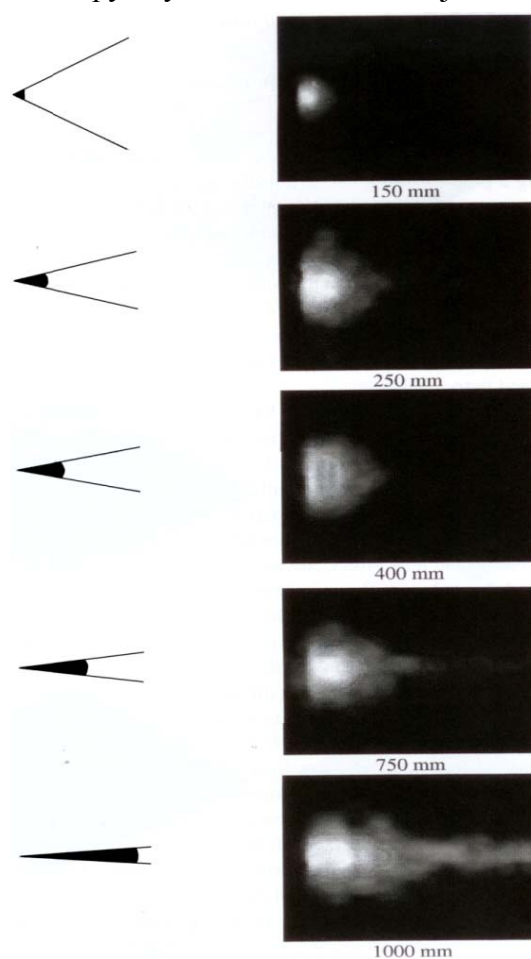
5.3 Požiadavky na posuv

Pri návrhu posuvu bolo potrebné zväžiť všetky požiadavky, ktoré boli súčasťou zadania. Najhlavnejšou požiadavkou, respektíve nutnosťou, ktorú posuv musel spĺňať, bolo, aby celý systém mohol pracovať vo vákuu. To znamená, aby medzi všetkými trecími plochami bolo trenie eliminované na minimum, nebolo potrebné mazanie, keďže vo vákuu sa mazivo časom odparí. Zároveň som mal použiť komponenty zo stávajúceho posuvu. Medzi ďalšie požiadavky, ktoré som pri návrhu posuvu musel brať do úvahy, patrí napríklad celková cena posuvu. Z toho vyplýva, že väčšina komponentov by mala byť buď použitá z predošlého posuvu, alebo ich bolo možné vyrobiť svojpomocne v dielni na ÚFI. Presnosť v smere posuvu je určená presnosťou s akou je možné zaostriť na vzorku. Je teda potrebné, aby bol minimálny krok posuvu menší prípadne rovný 0,1 mm. Keďže krátery vznikajúce pri analýze majú priemer približne 50 μm , radiálna vôľa by mala dosahovať tejto hodnoty, prípadne presnejšej. Posuv by mal byť čo najmenších rozmerov, aby nevadil v posuve kompucentrického stolčeka

uprostred komory a zároveň umožňoval použitie šošoviek s rozličnou ohniskovou vzdialenosťou.

5.4 Vplyv ohniskovej vzdialenosti fokusačnej šošovky na plazmu

Účinok na hustotu výkonu laserového pulzu je možné skúmať aj z hľadiska zmeny fokusačných podmienok. Z výskumov vyplýva, že priestorové rozloženie plazmy je seriózne ovplyvnené stupňom fokusácie. V niektorých prípadoch za defokusovaných podmienok je generovaná intenzívnejšia plazma, než pri presnej fokusácii. Napriek tomu vo väčšine prípadov pri defokusácii, intenzita a oblasť emisivity značne klesá. Z toho dôvodu bolo usúdené, že správna úprava fokusačných podmienok môže zlepšiť pomer medzi signálom a pozadím v analýze LIBS. Každá šošovka s rozličnou ohniskovou vzdialenosťou vytvára iné priestorové rozloženie hustoty energie. Ako je možné vidieť na obrázku č. 16, vo väčšine prípadov šošovky s malou ohniskovou vzdialenosťou neprinášajú dobré výsledky. Na druhej strane šošovky s väčšou ohniskovou vzdialenosťou sú preferovanejšie a poskytujú väčšie rozloženie hustoty energie v priestore [4]. Svoj vplyv na vznikajúcu plazmu aj druh použitej šošovky. Ak je použitá obyčajná šošovka, optické vady spôsobia zväčšenie stopy v ohnisku a tým aj zväčšenie kráteru. Použitie dubletu s korigovanými vadami zmenší stopu v ohnisku. Použitie šošovky samozrejme súvisí aj so skúmanou vzorkou. V niektorých prípadoch analýzy vzoriek veľkosť stopy nehrá až takú dôležitú úlohu, avšak pri analýze tenkých vzoriek je nutné, aby veľkosť stopy a tým kráteru bola čo najmenšia (napr. listy rastlín).



Obrázok č. 16: Vplyv ohniskovej vzdialenosti fokusačnej šošovky na plazmu [4, str.69].

6 Výber vhodných komponentov

Kvôli dosiahnutiu požiadaviek uvedených v kapitole 5.3, bolo potrebné zvážiť, akým spôsobom by sa posuv mal pohybovať. Do úvahy prichádzalo niekoľko riešení, avšak každé z nich prinášalo určité problémy. Väčšina variantov bola zamietnutá z finančného (napr. metóda posuvu využívajúca slip-stick efekt piezokryštálov, zároveň zbytočne presné), alebo z rozmerového hľadiska (zakúpenie lineárneho posuvu s pohonom). Nakoniec som po konzultácii s konštruktérom z firmy Tescan a hľadaní vhodného spôsobu pohybu, dospel k názoru, že najvhodnejším komponentom je valivé vedenie.

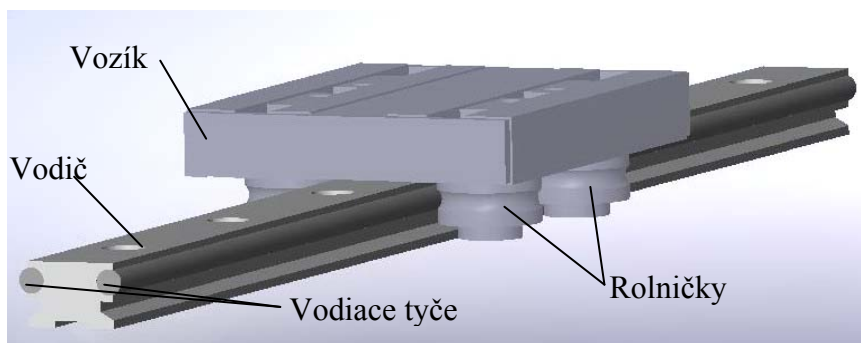
6.1 Valivé vedenia

Firma Tescan vo väčšine prípadov používa vedenia od firmy INA, priklonil som sa aj ja k tejto firme, avšak len na hľadanie vhodného vedenia. Firma má jeden z najväčších sortimentov vedení, a preto som chcel využiť ich katalóg. Po výbere najvhodnejšieho variantu som chcel nájsť ten istý variant v lacnejšom prevedení a s kratšou dobou dodania

Valivé vedenie pozostáva z vodiacej tyče a jazdca (stolíku), ktorý sa po guľôčkach, alebo valčekoch odvaľuje po vodiacej tyči. Táto konštrukcia poskytuje minimálny súčiniteľ valivého odporu v rozmedzí od 0,001-0,005. Bolo potrebné prebrať veľké množstvo kombinácií vodiacich tyčí a k nim prislúchajúcich jazdcov. Na nasledujúcich stránkach uvediem niekoľko typov vedení.

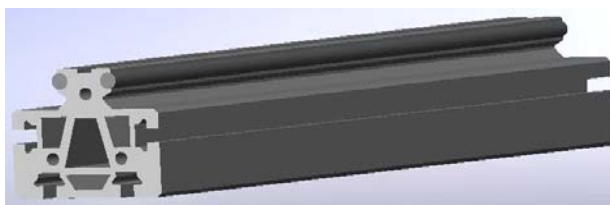
6.1.1 Rolničkové valivé vedenia

Rolničkový typ vedenia (obrázok. 17) pozostáva z vodiča umožňujúceho montáž, na ktorom sú umiestnené vodiace tyče. Po týchto vodiacich tyčiach sa odvaľujú rolničky vozíka. Rolničky sú osadené na ložiskách pre zníženie valivého odporu.

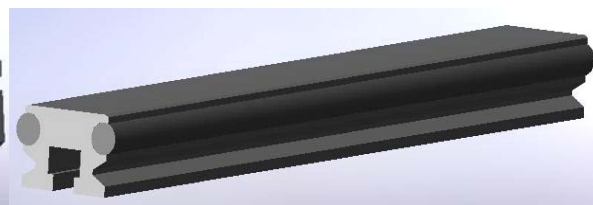


Obrázok č. 17: Príklad rolničkového valivého vedenia INA (typ LFS 20-300) [11].

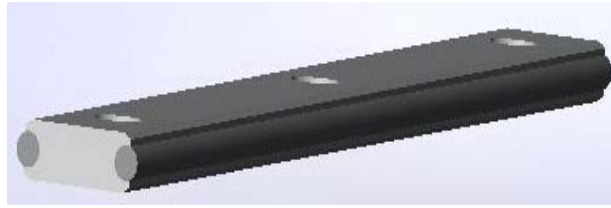
Je možné vybrať z veľkého sortimentu vodičov podľa nosnosti, variantov upevnenia a váhy celého vedenia. Na obrázkoch č. 18a, b, c je možné vidieť niekoľko vybraných vodičov.



Obrázok č. 18a: Vodič INA typu LFS25-m [11].

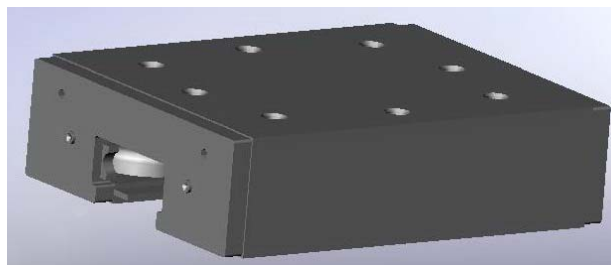


Obrázok č. 18b: Vodič typu INA LFS25-n [11].



Obrázok č. 18c: Vodič INA typu LFS52-fe [11].

Všetky typy vodičov je možné kombinovať s vozíkmi (obrázok č. 17, obrázok č. 19). Vozíky sú dostupné v rôznych variantoch vhodných do rozličných prostredí (napr. prašné prostredie – rolničky sú kryté), váhy, nosnosti, rozmerov, možnosti upnutia. Rolničkové vedenie poskytuje široký sortiment možností a kombinácií podľa požiadaviek. Je možné nastaviť vôľu medzi rolničkami a vedením pomocou excentrických čapov. Vodiace systémy dokážu zachytiť zaťaženie a momenty vo všetkých smeroch. Materiály použité na výrobu sú z nehrdzavejúcej ocele. K vedeniu je možné dokúpiť veľké množstvo príslušenstva, či už doplnky na mazanie, alebo s možnosťou odmeriavania dráhy posuvu.

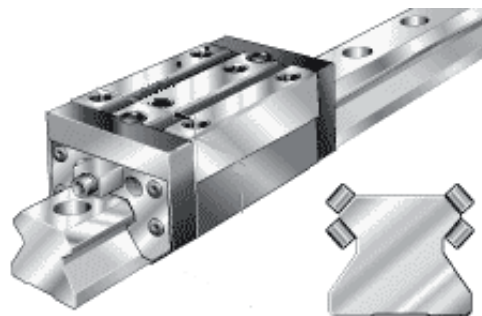


Obrázok č. 19: Kompaktný vozík INA typu LFKL52-EE-SF [11].

Variant kompaktného stolíka, obrázok č. 19, je vyrobený bez excentrických čapov a jeho radiálna vôľa je 20 μm . Pre použitie v posuve šošovky sú však nevhodné napriek tejto presnosti. Minimálne rozmery vozíkov sa pohybujú od 80 mm, čo je pre priestorové podmienky v komore neprijateľné. Ďalšou nevýhodou je rozteč upevňovacích otvorov vodičov, ktoré sa taktiež pohybujú v desiatkach milimetrov [11].

6.1.2 Jednokolažové valčekové vedenia

Vedenia tohto druhu od firmy INA sú len v jednej variante vodičov a niekoľko rozmerových variantov vozíkov. Vodiace koľajnice majú štyri hladké plochy, po ktorých sa odvalujú štyri rady valčekov (obrázok č. 20).



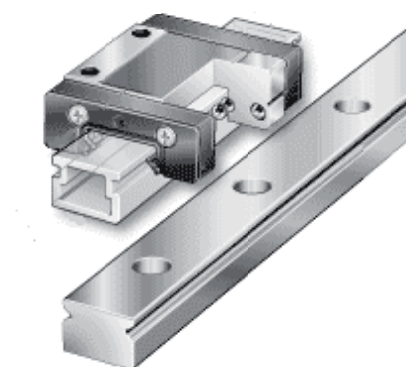
Obrázok č. 20: Jednokolažové valčekové vedenie INA typu RUE25-D-H-OE [11].

Svojou konštrukciou, radiálnou vôľou 20 μm [11], schopnosťou obmedziť momenty a sily pôsobiace na vozík mimo smeru pohybu, by tieto vedenia boli pomerne vhodné pre konštrukciu posuvu šošovky. Zásadným problémom je, že je nutné, aby vedenie bolo mazané.

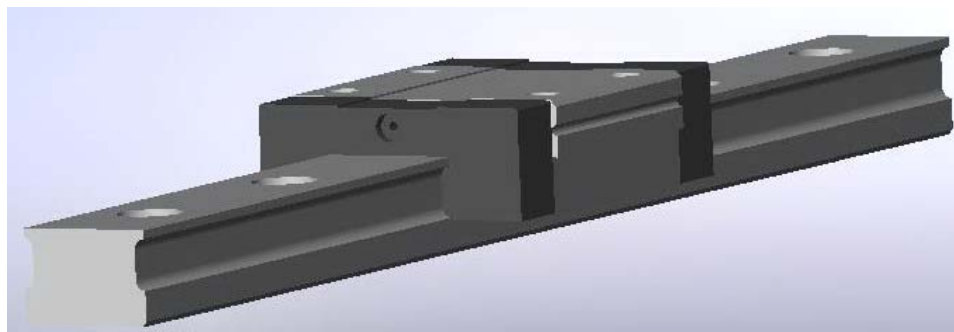
Mazanie úplne nevylučuje možnosť použitia vo vákuu, avšak rozmery vodiacich koľajníc a stolíkov nie sú dodávané vo veľkostiach ideálnych pre posuv.

6.1.3 Jednokolaťové guľôčkové vedenia

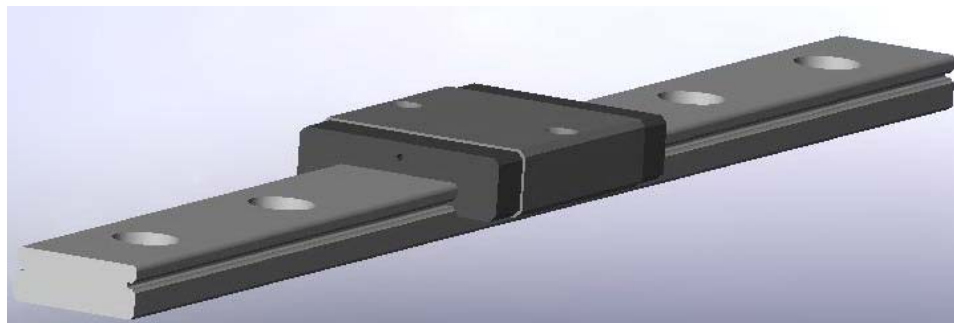
Jednokolaťové guľôčkové vedenia sú svojimi malými rozmermi vhodným výberom pre posuv šošovky. Minimálne rozmery vozíka sú 6 mm šírka a 12 mm dĺžka. Dosahovaná radiálna presnosť je 20 μm . Vo vozíku je z každej strany umiestnený rad guľôčok, ktoré sa odvaľujú v drážke vodiacej koľajnice (obrázok č. 21). Výber z týchto vedení je obmedzený na niekoľko veľkostí koľajníc a k nim prislúchajúcich vozíkov, príklady je možné vidieť na obrázkoch č. 22a, b. Jednotlivé vedenia sa odlišujú len rozmermi a rozložením dier pre šraubky, ktorými sa upína vozík k vedenému objektu [11].



Obrázok č. 21: Jednokolaťové guľôčkové vedenie INA typu KWEM/TKDEM [11].



Obrázok č. 22a: Jednokolaťové guľôčkové vedenie INA typu KUME12-c [11].



Obrázok č. 22b: Jednokolaťové guľôčkové vedenie INA typu KWEM5-w/TKDEM5-w [11].

6.1.4 Tyčové lineárne guľôčkové vedenia

Na výber je z veľkého množstva variácií a je možné ich čo sa týka tyčí veľkostne upraviť podľa daných okolností a potrieb. Navštívil som teda predajcu firmy INA v Brne, kde som sa dozvedel, že tieto vedenia nie je nutné mazať, čo je pre posuv do vákuua najlepšie riešenie. Po tejto návšteve som sa však rozhodol upustiť od použitia tyčových vedení od firmy INA, keďže dodacia lehota súčastí sa pohybuje od 6-8 týždňov. Začal som preto hľadať firmu na českom trhu. Našiel som firmu MATIS sídliacu v Brne. Firma má prijateľnú cenovú ponuku a široký sortiment. Firma dodáva vedenia s vynikajúcou presnosťou, kde vodiace tyče sú vyrobené s toleranciou h6 a ložiskové puzdrá s toleranciou H7 [9]. Na požiadanie je možné presnosť puzdra zvýšiť.

Tieto vedenia pozostávajú z vodiacej tyče a valivého puzdra, v ktorom sú uložené guľôčky. Tyčové lineárne vedenia poskytujú veľmi široký výber vodiacich tyčí a guľôčkových puzdiel. Je ich zároveň možné kombinovať s veľkým sortimentom príslušenstva.

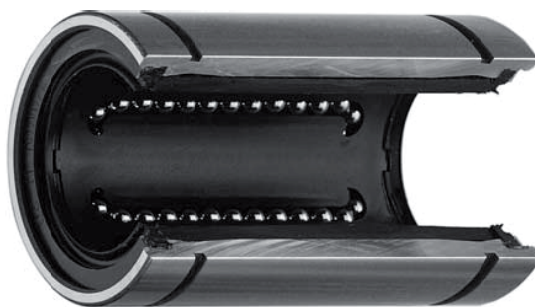
Puzdra

Z hľadiska prevedenia sú puzdrá vyrábané v troch variantoch:

- uzatvorené (obrázok č. 23a)
- uzatvorené s narezaným plášťom (možnosť nastavenia radiálnej vôle) (obrázok č. 23b)
- otvorené (obrázok č. 23c)



Obrázok č.23a: Uzavreté puzdro MATIS typu KH [9]. Obrázok č. 23b: Narezané puzdro MATIS typu KBS [9].

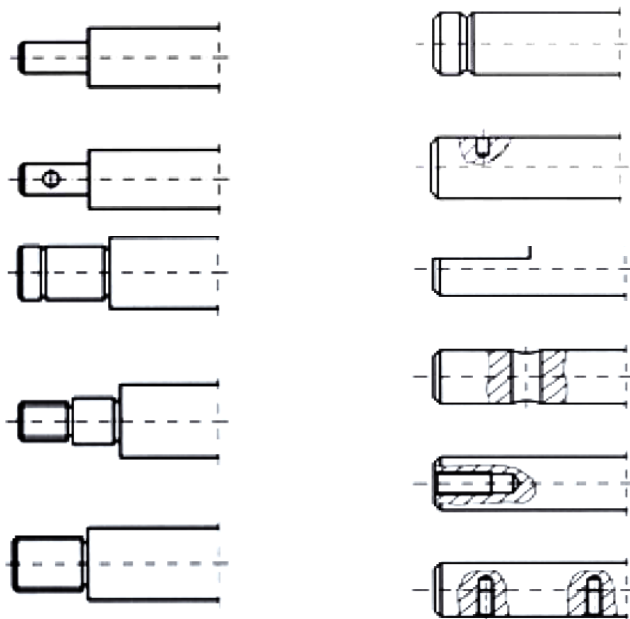


Obrázok č. 23c: Otvorené puzdro MATIS typu KBO [9].

Vodiace tyče

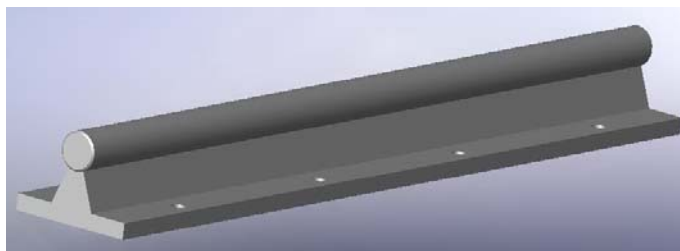
Pre prvé dva typy puzdier sa používajú buď plné tyče rôznych priemerov, zväčša začínajúce na priemere 5 mm, alebo trubky. Dĺžky tyčí sa samozrejme upravujú podľa potreby zákazníka a maximálna dĺžka sa pohybuje rádovo v metroch. Je možný výber z viacerých typov povrchových úprav tyčí, či už rôzne tvrdosti povrchu, chrómovanie a povrchov odolných voči chemikáliám a korózii.

Výber spôsobov upevnenia tyčí je veľmi veľký. Firma MATIS ponúka niekoľko základných typov ukončení ako je vidieť na obrázku č. 24. Aj ukončenie, teda spôsob upevnenia tyčí je možné zmeniť podľa požiadaviek zákazníka.

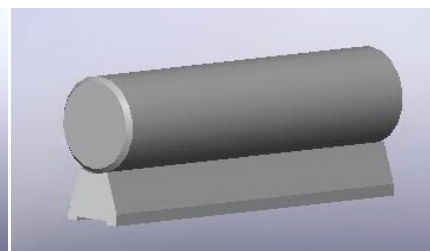


Obrázok č. 24: Príklady úprav vidiacich tyčí [9].

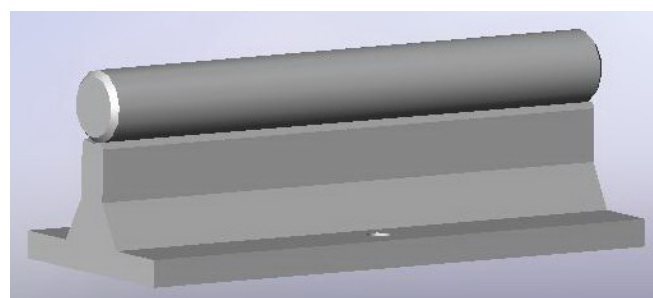
K poslednému otvorenému typu puzdier sa používajú tyče upevnené do podpier (napríklad: obrázky č.25a, b, c) a tieto sa následne upevňujú na miesto podľa potreby.



Obrázok č. 25 a: Podpera INA typu TSNW [11].

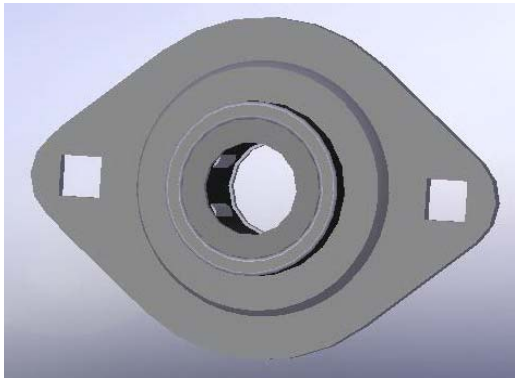


Obrázok č. 25b: Podpera INA typu TSUZ [11].

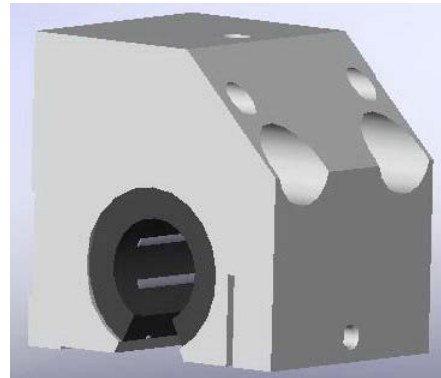


Obrázok č. 25c: Podpera INA typu TSWZ [11].

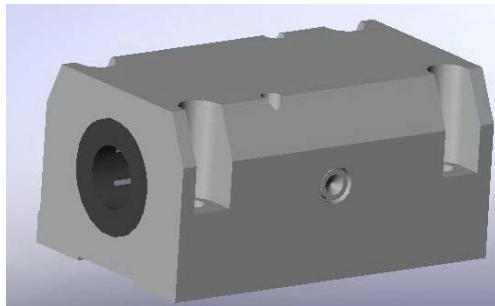
Valivé puzdrá je ďalej možné vložiť do upevňovacích puzdier, príklady sú vidieť na obrázkoch č. 26 a, b, c. Tie umožňujú rôzne spôsoby upevňovania na vodene súčasti. Presnosť osadenia valivého puzdra do upevňovacieho puzdra je H7 [9]. So všetkými typmi puzdier je možné kombinovať príslušenstvo, ktoré umožňuje napríklad priebežné mazanie, krytie proti prachu.



Obrázok č.26a: Upevňovacie puzdro INA typu KGHWT[11].



Obrázok č. 26b: Upevňovacie puzdro INA typu KGNCN [11].



Obrázok č.26c: Upevňovacie puzdro INA typu KTN [11].

6.2 Krokové motory

Krokové motory sú stroje, ktoré za pomoci elektromagnetizmu premieňajú energiu vo forme elektrických impulzov na diskretný točivý pohyb. Sú špeciálnym druhom synchronného motoru, ktorý obsahuje mnoho magnetických pólov. Majú široké využitie vo výpočtovej technike (disketové mechaniky), obrábacie stroje (CNC) a v ďalších oblastiach, kde je potrebné jednoducho a presne nastavovať polohu nejakého zariadenia [3, str. 4].

Všeobecne sa krokový motor skladá z rotoru a statoru. Stator krokového motoru je tvorený niekoľkými cievkami, ktoré plnia funkciu elektromagnetov, priťahujúcich zuby rotoru. Ten je potom zložený z vlastnej hriadele a prstenca magnetov. Princíp je veľmi jednoduchý. Prúd prechádzajúci cievkou statoru vytvorí magnetické pole, ktoré pritiahne zub rotoru, ktorý je najbližšie. Vhodným spínaním jednotlivých cievok je možné vytvoriť rotujúce magnetické pole, ktoré otáča rotorom. Rotor krokového motoru sa otáča s každým impulzom o vopred určený daný presne definovaný uhol – krok, čo je vlastne mechanická odozva rotoru, kedy sa otočí z jednej pokojovej polohy do druhej. V každej polohe je schopný udržať uhol natočenia rotoru, potrebuje teda napájanie aj v pokojovom stave, tzn. Má trvalý odber prúdu zo zdroja. Tento typ synchronného motoru ma oproti klasickým rotačným motorom výhodu

v tom, že ak poznáme počiatočnú polohu a ak nestratíme synchronizáciu, máme v každom okamžiku informáciu o aktuálnej polohe rotoru [3, str. 4].

Existuje viacero variantov metód riadenia krokových motorov. Volíme ich podľa toho, aký chceme krútiaci moment motoru, presnosť nastavenia, alebo odber zo zdroja. Podľa konštrukcie rotoru môžeme krokové motory rozdeliť na aktívne a pasívne. Aktívny má rotor z permanentného magnetu. Pasívny má rotor zložený zo zväzku tvarovaných plechov z magneticky mäkkého materiálu. Motory pre zmenšenie kroku môžu byť jedno satorový, alebo viac satorový. Hlavné riadiace vinutie jednotlivých fáz môže byť jednofázové, dvojfázové, alebo viacfázové, podľa počtu vinutí zopnutých v jednom okamžiku. V každom okamžiku je zopnutá aspoň jedna fáza motoru [3, str.4].

Výhody krokových motorov [3, str.5]:

- Presnosť a opakovateľnosť natočenia rotoru.
- Citlivosť a akcelerácia – krokové motory majú malú zotrvačnosť rotoru, umožňujú teda rýchlo zvyšovať ich rýchlosť. Sú preto vhodné do mechanizmov vyžadujúcich rýchli a presný posun.
- Stabilita polohy.
- Chyba natočenia rotoru sa s počtom krokov nesčíta.
- V každom okamihu známa poloha.

Nevýhody krokových motorov [3, str. 5]:

- Malý krútiaci moment v porovnaní s klasickými jednosmernými motormi.
- Výrazne obmedzená rýchlosť rotácie – na približne desiatky otáčok za sekundu. Táto vlastnosť je daná predovšetkým prechodovými magnetickými javmi a pri prekročení tejto rýchlosti dochádza k desynchronizácii kroku s riadiacimi impulzmi.
- Vibrácie motoru v priebehu prepínania jednotlivých fáz.
- Odber prúdu zo zdroja, aj keď je motor zastavený pokojovej polohe.

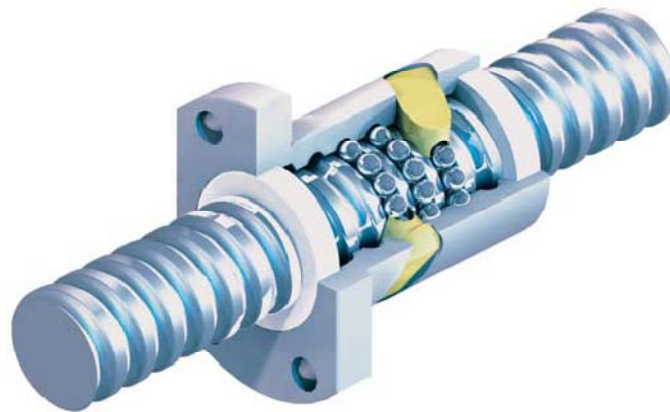
Po porade s konštruktérom firmy Tescan som sa rozhodol vyberať z krokových motorov od firmy PHYTRON (obrázok č. 27). Firma Tescan má s motormi od tejto firmy bohaté skúsenosti. Jedná sa o krokové motory, dvojfázové, hybridné, vytvárané špeciálne do vákua (až do 10^{-11} hPa). Zároveň ich je možné použiť do extrémnych prostredí, či do už teplotných (-20 - +300 °C, kryto prevedenie -270 - +40°C), alebo s vysokou radiáciou. Motory sú vyrábané s priemerom 19-125 mm a momentom od 3,4 mNm do 9,9 Nm [10].



Obrázok č. 27: Krokový motor od firmy PHYTRON typu VSS-FV [10].

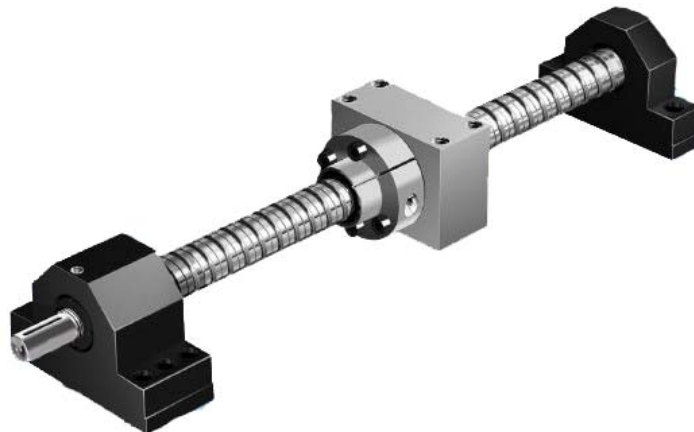
6.3 Gul'ôčkové šraubí

Gul'ôčkové šraubí sú mechanizmus, pomocou ktorého sa prevádza rotačný pohyb na lineárny, alebo naopak. Dosahujú vysokých presností, takmer úplne eliminujú trenie, majú dlhú životnosť a vynikajúcu účinnosť. Princíp fungovania je založený na príklade klasického šraubí v kombinácii s vlastnosťami ložiska. Šraubí je tvorený závitmi s určitým stúpaním a vnútro matky (orechu) namiesto závitov tvoria rady ložiskových gul'ôčok, ktoré zapadajú do drážok závitú šraubí, príklad je vidieť na obrázku č. 28. V sortimente firiem zaoberajúcich sa výrobou a predajom gul'ôčkových šraubov, je možné nájsť šraubí s minimálnym priemerom už od 1,8 mm a rôznymi variantmi stúpania.



Obrázok č. 28: Gul'ôčkový šraub [12].

Gul'ôčkové šraubí sa dodávajú v rôznych prevedeniach. Obrázok č. 29 zobrazuje variant s gul'ôčkovým šraubom upevneným napevno a to medzi dvomi ložiskami.



Obrázok č. 29: Gul'ôčkový šraub upevnený medzi ložiskami [12].

Medzi ďalšie varianty patria šraubí s jedným voľným koncom a druhým upevneným v radiálnom ložisku. K dosiahnutiu lepšej torznej tuhosti je možné aj voľný koniec osadiť do ložiska. Konštrukcia radiálneho ložiska dovoľuje rôzne spôsoby montáže, obrázky č.30a, b.



Obrázok č. 30a: Prírubové radiálne ložisko Steinmeyer [12]. Obrázok č. 30b: Stojaté radiálne ložisko Steinmeyer [12].

Rôzne druhy matiek (orechov) kombinovateľných s guľôčkovými šraubami umožňujú rozličné varianty upínania. Na obrázkoch č. 31 a, b, c, d sú štyri vybrané druhy matiek.



Obrázok č. 31a: Prírubová matka Steinmeyer [12]. Obrázok č. 31b: Prírubová matka Steinmeyer [12].



Obrázok č. 31c: Cylindrická matka Steinmeyer [12]. Obrázok č. 31d: Závitová matka Steinmeyer [12].

Na trhu je množstvo firiem s širokým sortimentom šraubov, matiek, ložísk, spôsobov montáže, technológií výroby a povrchových úprav. Vo väčšine prípadov firiem je možné dať si šraub aj s matkou vyrobiť na zákazku podľa dodaného výkresu súčasti. Firma Tescan pri konštrukcii posuvov využíva guľôčkové šraubky prevažne od firmy Steinmeyer, teda som aj ja pri návrhu využíval katalóg komponentov od tejto firmy. V kombinácii s krokovým motorom je ideálnym pohonom pre posuv fokusačnej šošovky.

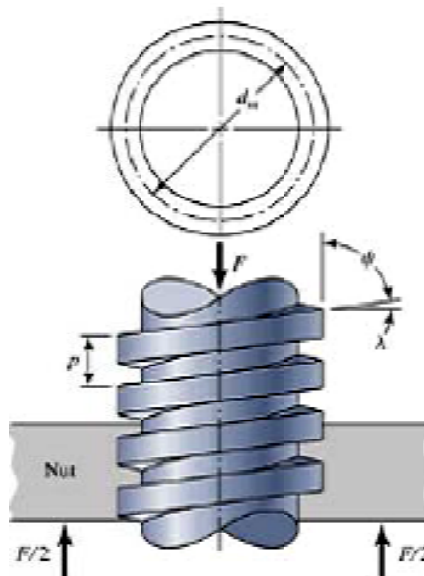
6.4 Použitie šraubu s metrickým závitom ako pohybový šraub

Guľôčkový šraub má veľké výhody pri použití v posuve fokusačnej šošovky. Jeho použitie by však posuv zdražilo, preto som sa snažil nájsť vhodnejší, resp. lacnejší variant. Pri použití vhodných materiálov je možné nahradiť guľôčkový šraub, šraubom s lichobežníkovým, štvorcovým, prípadne v niektorých málo prípadoch metrickým závitom. Kvôli čo najväčšej eliminácii šmykového trenia medzi matkou a šraubom, je vhodné skombinovať materiály tak, aby čo najviac vyhovovali konštrukcii. Koeficient šmykového trenia, kombináciou rôznych materiálov je možné vidieť v tabuľke č.2.

Koeficient šmykového trenia pre rôzne kombinácie materiálov - μ					
		Statické namáhanie		Dynamické namáhanie	
Materiál 1	Materiál 2	Suchý povrch	Mazaný povrch	Suchý povrch	Mazaný povrch
Uhlíková oceľ	Uhlíková oceľ	0,74	-	0,57	-
Uhlíková oceľ	Hliník	0,61	-	0,47	-
Uhlíková oceľ	Mosadz	0,51	-	0,44	-
Tvrdá oceľ	Tvrdá oceľ	0,78	0,11-0,23	0,42	0,03-0,19
Oceľ	Teflón	0,04	-	0,04	0,02
Teflón	Teflón	0,04	-	-	0,04
Liatina	Bronz	-	-	0,22	0,077
Hliník	Hliník	1,05	-	1,4	-

Tabuľka č.2: Koeficient šmykového trenia pre rôzne kombinácie materiálov [7].

V prvom rade je potrebné určiť uhol stúpania, obrázok č. 32 [8]:



Obrázok č. 32: Uhol stúpania [8].

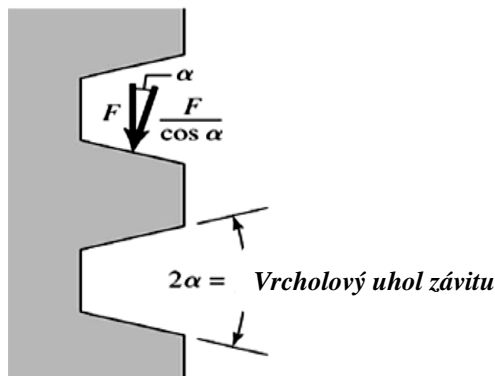
$$tg \lambda = \frac{p}{\pi d_m}, \tag{5}$$

kde p je rozteč závitu a d_m je stredný priemer závitu.

Následne je potrebné určiť podmienku samosvornosti. To znamená, že v prípade veľkého uhla stúpania λ , alebo súčiniteľ šmykového trenia je malý, môže sa šraub pôsobením sily F samovoľne roztočiť. Vzťah pre podmienku samosvornosti je [8]:

$$\mu > \operatorname{tg} \lambda \cdot \cos \alpha, \tag{6}$$

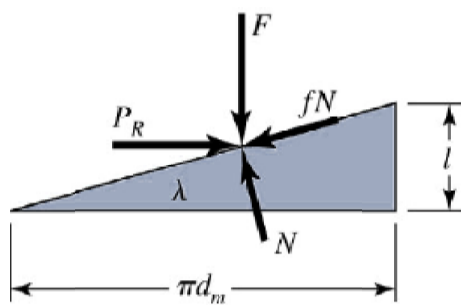
kde α je polovica vrcholového uhla závitu, obrázok č. 33.



Obrázok č. 33: Vrcholový uhol [8].

Pri výpočte momentu je samozrejme potrebné poznať zaťažovaciu silu, pôsobiacu na závit prostredníctvom matky. Odvodenie výpočtu pre štvorcový závit je nasledovné [8]:

Zdvíhanie bremena



$$\sum F_x = -P_L - N \sin \lambda + \mu N \cos \lambda = 0$$

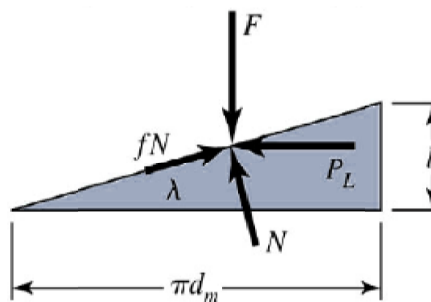
$$\sum F_y = F + \mu N \sin \lambda - N \cos \lambda = 0$$

$$P_R = \frac{F(\sin \lambda + \mu \cos \lambda)}{\cos \lambda - \mu \sin \lambda}$$

$$P_R = \frac{F(l + \pi \mu d_m)}{\pi d_m - \mu l}$$

$$M_R = P_R \frac{d_m}{2} = \frac{F d_m}{2} \frac{l + \pi \mu d_m}{\pi d_m - \mu l}$$

Spúšťanie bremena



$$\sum F_x = P_R - N \sin \lambda - \mu N \cos \lambda = 0$$

$$\sum F_y = F - \mu N \sin \lambda - N \cos \lambda = 0$$

$$P_L = \frac{F(\mu \cos \lambda - \sin \lambda)}{\cos \lambda + \mu \sin \lambda}$$

$$P_R = \frac{F(\pi \mu d_m - l)}{\pi d_m + \mu l}$$

$$M_L = P_L \frac{d_m}{2} = \frac{F d_m}{2} \frac{\pi \mu d_m - l}{\pi d_m + \mu l}$$

Keďže záťažová sila pri použití metrického závitu nie je kolmá k profilu závitu, ale sklonená o uhol α , je potrebné tieto vzťahy mierne upraviť. Výsledné vzťahy pre výpočet momentu pôsobiaceho v metrickom závite sú [8]:

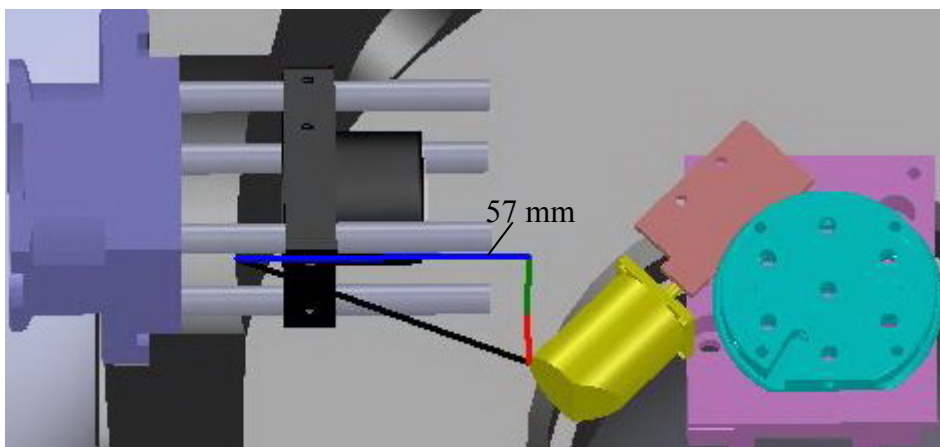
$$\text{Zdvíhanie bremena } M_R = \frac{Fd_m}{2} \frac{l\cos\alpha + \pi\mu d_m}{\pi d_m \cos\alpha - \mu l} \quad (7)$$

$$\text{Spúšťanie bremena } M_L = \frac{Fd_m}{2} \frac{\pi\mu d_m - l\cos\alpha}{\pi d_m \cos\alpha + \mu l} \quad (8)$$

7 Návrh posuvu fokusačného objektívu

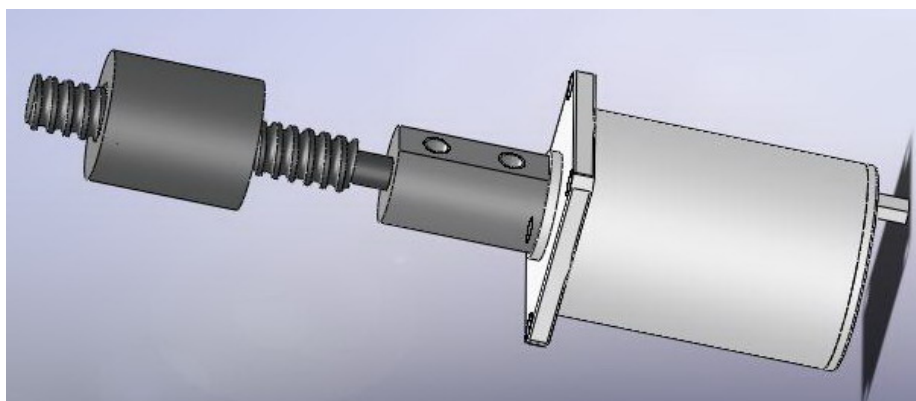
7.1 Počiatočný návrh

Pri vytváraní návrhu som sa spočiatku potýkal s mnohými problémami. Keďže vstup laserového zväzku bol v prednej stene ako som už popisoval v predchádzajúcich kapitolách, vyplýval z tohto umiestnenia značný priestorový problém (obrázok č. 34- modrá čiara, merané pomocou programu SolidWorks). Ovládanie posuvu by mal zabezpečovať krokový motorček. Predbežne vybraný motorček mal dĺžku 26,5 mm. Ak bol kompucentrický stolček v maximálnej polohe smerom k vstupnému otvoru, nebol v komore dostatočný priestor na vloženie posuvu šošovky, čo dokazuje porovnanie rozmerov motorčeka s priestorom vymedzeným v komore. Zároveň skosenie steny komory v okolí vstupného otvoru neposkytovalo priestor na umiestnenie komponentov posuvu.



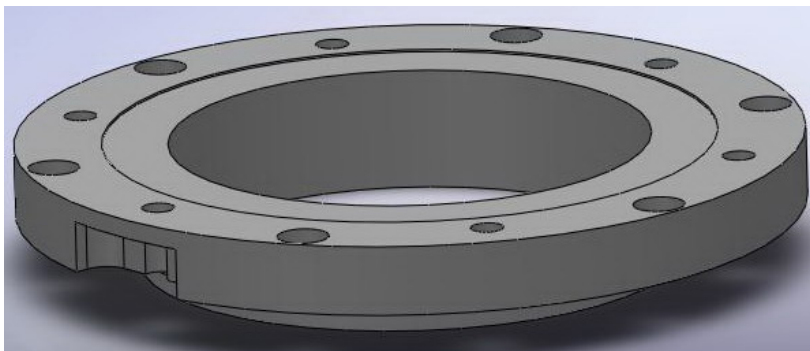
Obrázok č. 34: Priestor medzi stenou a kompucentrickým stolčekom.

Posuv by mal byť realizovaný krokovým motorčekom a guľôčkovým šraubom na prevod rotačného pohybu na lineárny ako na obrázku č. 35. Dĺžka celého posuvu by značne prekročila priestorové možnosti v komore. Medzi motorček a šraub je zároveň potrebné umiestniť spojku a to by posuv ešte predĺžilo.



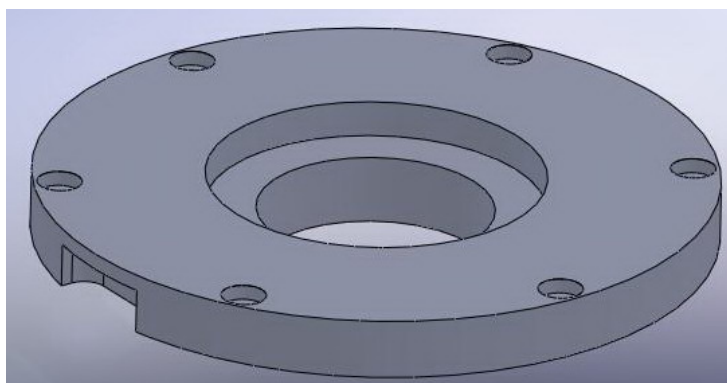
Obrázok č. 35: Pohon posuvu (guľôčkový šraub s matkou, spojka a krokový motorček).

V priebehu návrhu však došlo k zmene. Zmena mala nastať v celkovej koncepcii aparatury. Výveva sa z hornej časti komory presunula do spodnej časti. Vstup pre laserový zväzok sa z prednej steny presunul na miesto vývevy. Pre tento krok bolo potrebné upraviť prírubu vo vrchnej časti komory, obrázok č. 36.

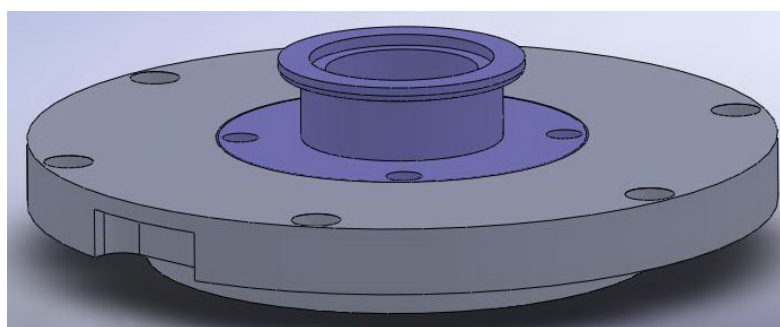


Obrázok č. 36: Pôvodná príruha v hornej časti komory.

Túto prírubu bolo potrebné upraviť tak, aby umožnila montáž rovnakému portu pre vstup zväzku ako v prednej časti komory, obrázok č. 37a, b.



Obrázok č. 37a: Nová príruha umožňujúca montáž vstupného portu.



Obrázok č. 37b: Príruha s portom pre vstup laserového zväzku.

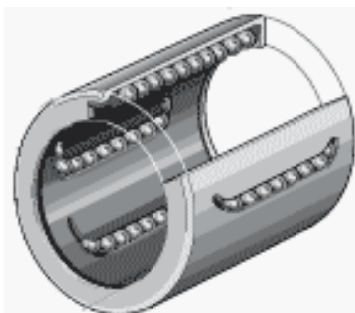
Táto zmena sčasti zjednodušila podmienky návrhu. Týkalo sa to hlavne zväčšenia priestorových možností pre umiestnenie posuvu. Ďalej by vďaka tejto zmene bolo možné podložením príruby priestor pre posuv ešte zväčšiť.

7.2 Použité komponenty

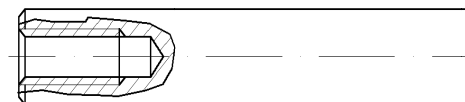
Lineárne vedenie

Najvhodnejším vedením pre posuv je vybrané tyčové lineárne vedenie od firmy MATIS. Použitá tyč s priemerom 6 mm má označenie WRB06- nerezová, plná, indukčne kalená (hrúbka kalenej vrstvy 0,7 mm), tvrdosť HRC 51-55, brúsená, vyrobená z materiálu X-46Cr13. Tolerancia vybranej tyče je h6. Spôsob upnutia tyče je na obrázku č. 39.

Do kombinácie s uvedenou tyčou som vybral guľôčkové puzdro s označením KH-0622, obrázok č. 38. Vnútorňý priemer puzdra je 6 mm, vonkajší priemer je 12 mm, dĺžka je 22 mm, hmotnosť 7 g. Puzdro je vyrobené s presnosťou H7. Celková radiálna presnosť vedenia je 25 µm.



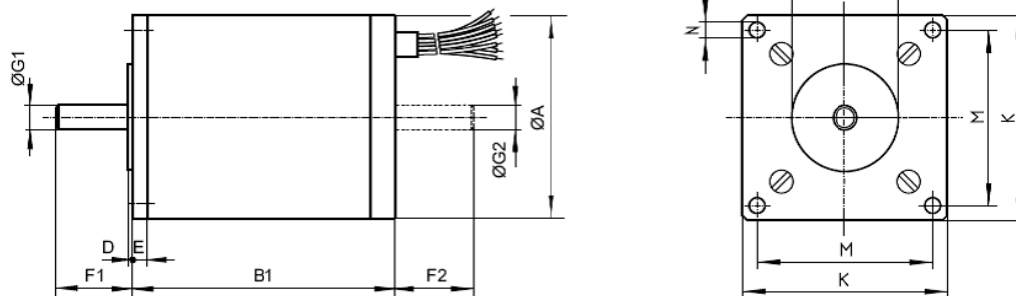
Obrázok č.38: Guľôčkové puzdro KH-0622[9].



Obrázok č. 39: Spôsob upnutia tyče [9].

Krokový motorček

Pohon posuvu zabezpečuje vybraný krokový motorček od firmy PHYRON s označením VSS 19. Na obrázku č. 40 a v tabuľke č. 3 sú rozmery motorčeku v mm.



Obrázok č. 40: Krokový motorček VSS 19 [10].

Typ	A	B1	D	E	F1	F2	G1	G2	K	L	M	N	Krútiaci moment
VSS19	19	26,5	1	2	7,5	6,5	2,5	2,5	19	10	16	M2,5	3,4 [mNm]

Tabuľka č. 3: Rozmery krokového motorčeku [10].

Pohybový šraub

Rozmerovo je posuv navrhnutý tak, aby bolo možné použiť aj guľôčkový šraub od firmy Steinmeyer, aj pohybový šraub vyrobený na ÚFI. Rozmery guľôčkového šraubu aj s matkou sú uvedené v tabuľke č. 4.

Rozmery šraubu					Rozmery matky	
Priemer [mm]	Stúpanie [mm]	Priemer guľôčok [mm]	Max. prenášaný moment [Nm]	Základný krok [°]	Dĺžka [mm]	Priemer [mm]
5	0.5	0.6	0,004	1,8	22	12

Tabuľka č. 4: Rozmery guľôčkového šraubu a matky [12].

Kvôli zlacneniu posuvu som sa rozhodol použiť šraub s metrickým závitom, ktorý by bol vyrobený na ÚFI. Je nutné vypočítať smerodajné hodnoty a na ich základe posúdiť vhodnosť šraubu. Podľa tabuľky č. 2 som vybral na výrobu pohybového šraubu kombináciu materiálov teflón (matka) – oceľ (šraub), čím som docielil zníženie koeficientu šmykového trenia na $\mu=0,04$, oproti kombinácii oceľ-ocel.

Po dosadení do vzťahov 5, 6, 7, 8 som dostal nasledujúce hodnoty, pričom pre M5x0,5 je $d_m=4,675\text{ mm}$, pre M5x1 je $d_m=4,5\text{ mm}$ a uhol $\alpha=30^\circ$. Váha komponentov posuvu, ktoré sú upevnené na matke šraubu a teda spôsobujú zaťažovaciu silu je $m=0,05646\text{ kg}$ a teda sila $F=0,554\text{ N}$ (hmotnosť po zadaní hustôt vygeneroval program SolidWorks). Váha spôsobujúca zaťažovaciu silu vychádza až z posledného, konečného návrhu posuvu.

M5x0,5

$$tg\lambda = \frac{0,5}{\pi \cdot 4,675 \cdot 10^{-3}} = \underline{0,034}$$

Podmienka samosvornosti

$$0,04 > 0,029 \quad \text{SPLNENÁ}$$

M5x1

$$tg\lambda = \frac{1}{\pi \cdot 4,5 \cdot 10^{-3}} = \underline{0,0707}$$

Podmienka samosvornosti

$$0,04 > 0,061 \quad \text{NESPLNENÁ}$$

$$M_R = \frac{0,554 \cdot 4,675 \cdot 10^{-3}}{2} \frac{0,5 \cdot 10^{-3} \cdot \cos 30 + \pi \cdot 4,675 \cdot 10^{-3} \cdot 0,04}{\pi \cdot 4,675 \cdot 10^{-3} \cdot \cos 30 - 0,04 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}} = 1,041 \cdot 10^{-3} \text{ Nm}$$

$$M_L = \frac{0,554 \cdot 4,675 \cdot 10^{-3}}{2} \frac{\pi \cdot 4,675 \cdot 10^{-3} \cdot 0,04 - 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot \cos 30}{\pi \cdot 4,675 \cdot 10^{-3} \cdot \cos 30 + 0,04 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}} = 1,571 \cdot 10^{-4} \text{ Nm}$$

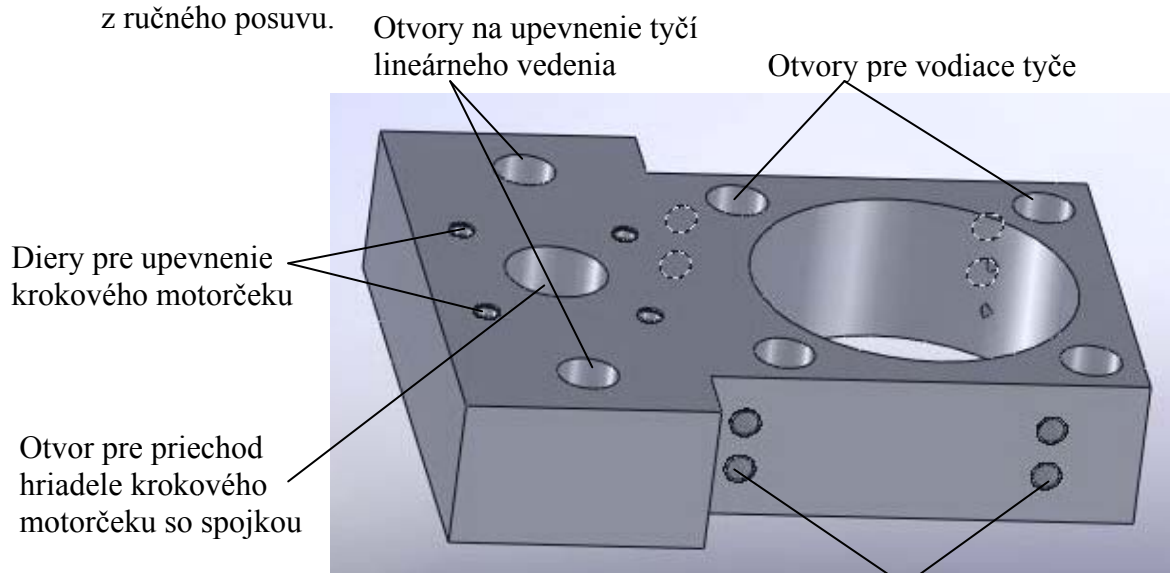
Krútiaci moment použitého krokového motora je $3,4 \cdot 10^{-3} \text{ Nm}$, to znamená, že použitie pohybového šraubu s metrickým závitom je možné. V prípade šraubu M5x1 nie je splnená podmienka samosvornosti. Napriek tomu, že by krokový motorček svojím zádržným momentom posuv udržal stabilný, po odpojení motorčeka od napájania, mohlo by dôjsť k samovoľnému vytočeniu matky zo závitov. Pri použití šraubu so stúpaním 0,5 je presnosť v smere posuvu väčšia ako požadovaných 0,1 mm. Len pre ilustráciu, ak má motorček krok $1,8^\circ$, teda má 200 krokov na otáčku. To znamená presnosť približne $2,5\ \mu\text{m}$.

Rozmery navrhnutého pohybového šraubu spolu s matkou sú uvedené vo výkresovej dokumentácii, príloha č.5 a príloha č.6.

7.3 Konštrukcia posuvu

7.3.1 Základňa

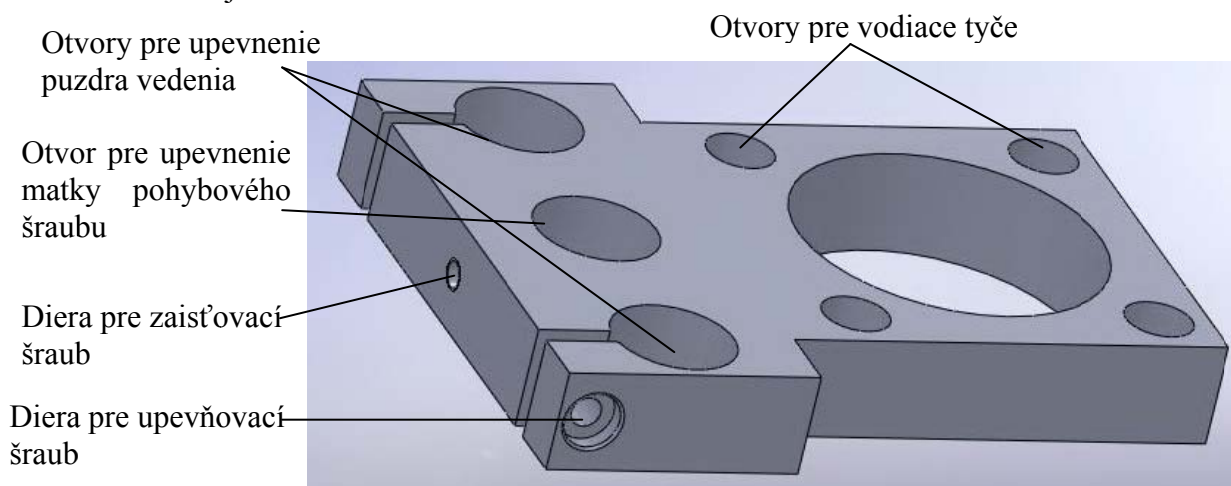
Následne po výbere vhodných komponentov som pristúpil k návrhu celkového posuvu. Prvým krokom bolo navrhnutie základnej dosky, na ktorú sú pripevnené vybrané komponenty. Na obrázku č. 41 je vidieť prvý návrh tejto základnej dosky. Konštrukcia dosky zároveň umožňuje posunutie celého posuvu, vďaka čomu je možné použitie šošoviek s rozličnou ohniskovou vzdialenosťou. Pri návrhu som vychádzal z rozmerov držiaku šošovky z ručného posuvu.



Obrázok č.41: Základná doska posuvu. Diery pre zaisťovacie šraubky M2

7.3.2 Držiak šošovky

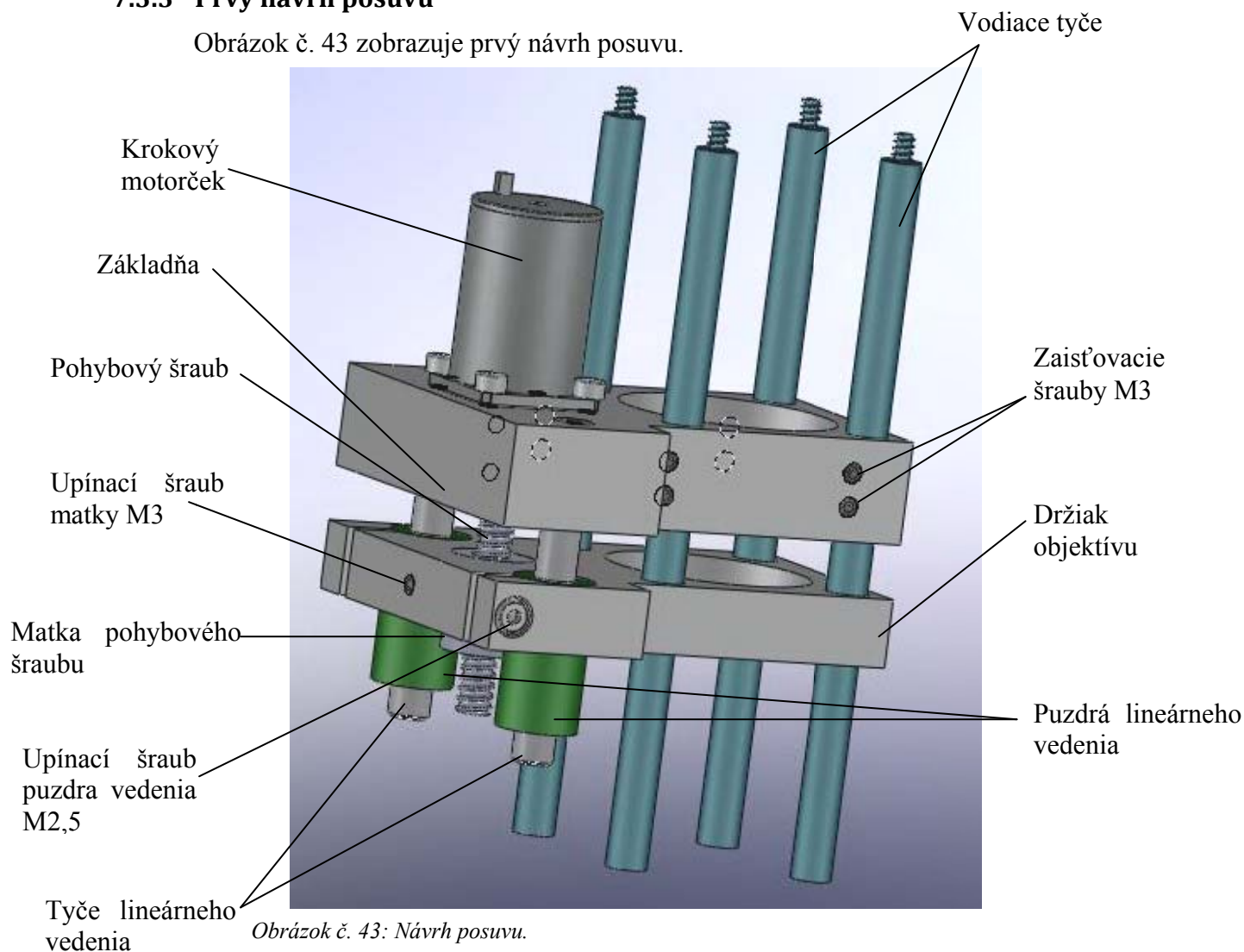
Rozmery držiaku šošovky taktiež vychádzali z rozmerov pôvodného držiaku ručného posuvu. Rozloženie otvorov musí byť samozrejme súosé s otvormi v základni. Prvý návrh držiaku je na obrázku č. 42.



Obrázok č. 42: Držiak šošovky.

7.3.3 Prvý návrh posuvu

Obrázok č. 43 zobrazuje prvý návrh posuvu.

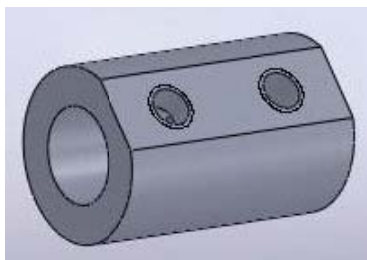


Obrázok č. 43: Návrh posuvu.

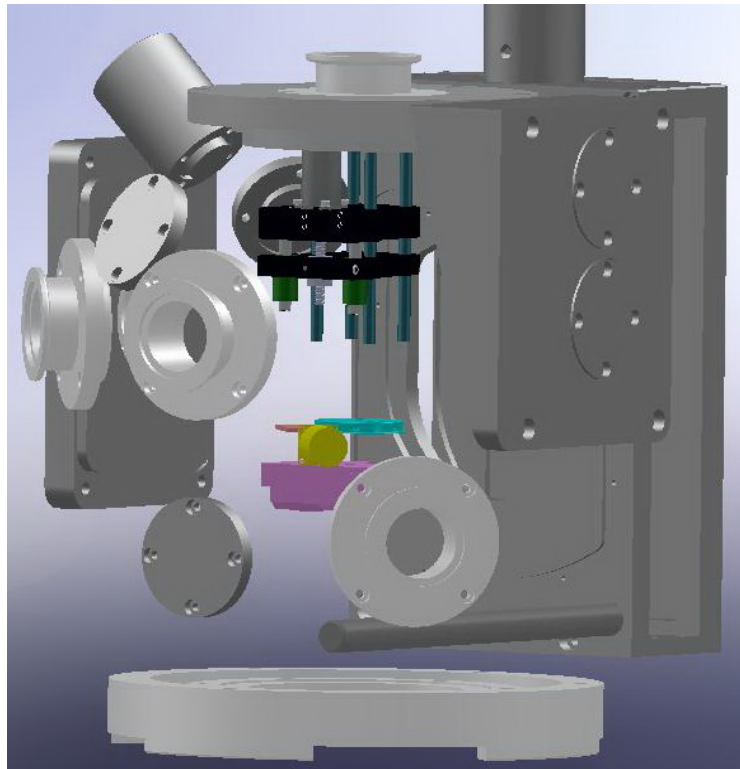
Posuv spĺňa takmer všetky požiadavky. Pomocou zaist'ovacích šraubov v základni sa celý posuv po posunutí do požadovanej polohy zaistí na stabilnom mieste. Celková dĺžka však nie je príliš vhodná, pretože koliduje s výhľadom vstupných portov na vzorku, obrázok č. 45.

7.3.4 Spojka

Medzi šraub a hriadeľ krokového motorčeka je potrebné umiestniť spojku (obrázok č. 44), ktorá bude prenášať krútiaci moment. Z každej strany spojky je vsunutá jedna súčasť a jej pohyb je zaistený šraubom M2. Avšak zo širokého sortimentu sa mi nepodarilo vybrať rozmerovo vhodnú spojku, preto aj spojka bude vyrobená v dielni ÚFI. Rozmery spojky sú uvedené vo výkresovej dokumentácii, príloha č. 7.



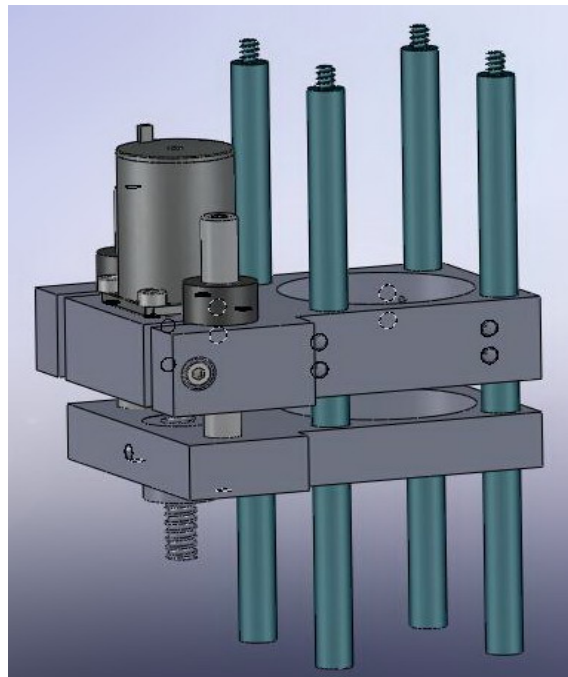
Obrázok č. 44: Spojka



Obrázok č. 45: Posuv v interakčnej komore LIBS.

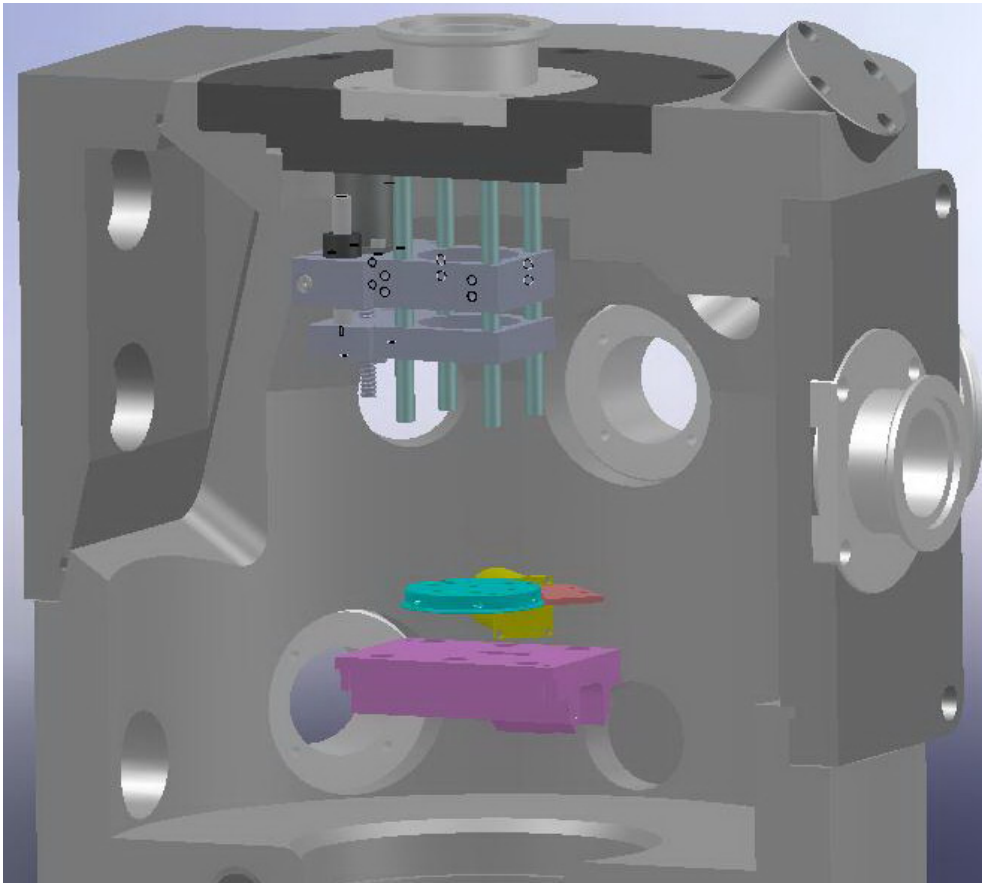
7.3.5 Konečný návrh

Konečný návrh prešiel oproti prvému návrhu drobnými úpravami, obrázok č. 46. V prvom rade som kvôli skráteniu celkovej dĺžky posuvu presunul puzdrá lineárneho vedenia do základne. Rozmery, ktorých sa to týka, boli upravené tak, aby bolo možné použiť vybraný guľôčkový šraub tak aj pohybový šraub s metrickým závitom vyrobený na ÚFI.



Obrázok č. 46: Konečný návrh posuvu.

Celý posuv sa pomocou závitov na konci vodiacich tyčí upevňuje k prírubе v hornej stene komory, obrázok č. 47. Dĺžku vodiacich tyčí je možné upraviť podľa potrieb analýzy. Výsledný posuv má presnosť v smere posuvu (minimálny krok) približne $2,5 \mu\text{m}$ a radiálnu presnosť dosahuje vďaka lineárnemu vedeniu $25 \mu\text{m}$. Celkové dĺžkové rozmedzie posuvu je 25 mm. Komponenty ako základná doska a držiak šošovky budú vyrábané z duralu. Matka pohybového šraubu bude vyrábaná z teflónu, šraub a taktiež spojka medzi šraubom a motorčekom bude vyrobená z konštrukčnej ocele. Rozmery vyrábaných súčastí je možné nájsť, spolu s výkresom zostavy vo výkresovej dokumentácii.



Obrázok č. 47: Rez komorou s posuvom.

8 Záver

LIBS je skratka z anglického Laser Induced Breakdown Spectroscopy. V preklade tento výraz znamená laserom indukovaná spektroskopia. Metóda využíva intenzívne žiarenie (rádovo v GW/cm^2), vytvorené fokusovaným laserovým zväzkom na generovanie svietiacej plazmy v ohnisku šošovky. Zloženie plazmy odpovedá zloženiu analyzovanej vzorky. Nasleduje zber a spektrálna analýza žiarenia plazmy. Kvalitatívna a kvantitatívna analýza je uskutočňovaná sledovaním pozície emisných spektrálnych čiar a ich intenzity. Metóda LIBS prakticky existuje takmer 40 rokov a to od vynájdenia prvého laseru v roku 1960. Rozvoj však nastal až od roku 1980, kedy sa analytické schopnosti začali viac rozširovať a to hlavne zdokonaľovaním komponentov aparatury (lasery, spektroskopy, detektory). Od počiatku, až do dnešnej doby sa vyskytujú rozmanité oblasti aplikácií: monitorovanie kvality materiálov a zvarov v prípade kovových konštrukcií, alebo oblasť monitorovania životného prostredia (kvapalné, plynné, tuhé vzorky; skúmanie kontaminácií v priemyselných aj ťažko dostupných/nebezpečných prostredí, využitím optických vlákien) LIBS aparaturu je možné vybudovať ako mobilné zariadenie a prispôbiť daným aplikáciám.

Úlohou diplomovej práce bolo navrhnuť systému pre uchytenie a posuv fokusačného objektívu vo vnútri interakčnej komory LIBS. Navrhnutý posuv mal vychádzať zo stávajúceho experimentálneho zariadenia a využiť konštrukčné prvky, ktoré už boli súčasťou komory. Posuv mal byť riešený pomocou krokového motorčeku ovládaného počítačom. Celý systém mal byť schopný pracovať vo vákuu, teda aby pohybové súčasti neboli mazané (mazivo sa vo vákuu časom odparí) a zároveň eliminovali trenie na minimum. Posuv mal dosahovať minimálny krok približne 0,1 mm, keďže s touto presnosťou je možné zaostriť na vzorku. Krátery vzniknuté po odparení časti vzorky majú približne 50 μm , z čoho vyplývala požiadavka na radiálnu presnosť menšiu, alebo rovnú 50 μm . Rozmery posuvu samozrejme nesmeli obmedzovať pohyb kompucentrického stolčeku a celková konštrukcia mala umožniť použitie šošoviek s rozličnou ohniskovou vzdialenosťou.

Všetky vyššie uvedené požiadavky výsledný posuv spĺňa. Riešenie využíva schopnosť pohybového šraubu na prenos rotačného pohybu z krokového motorčeku na lineárny pohyb posuvu. Krokový motorček s krokom $1,8^\circ$ a kombináciou so šraubom so stúpaním 0,5 mm, dáva posuvu presnosť v smere posuvu približne 2,5 μm . Šraub využíva veľmi malého koeficientu šmykového trenia ($\mu=0,04$) medzi kombináciou materiálov oceľ – teflón. K presnému vedeniu posuvu je použité tyčové lineárne vedenie, ktoré dosahuje požadovanej radiálnej presnosti (resp. lepšej, 25 μm) a zároveň má schopnosť eliminovať trenie, bez toho aby bolo nutné mazanie. Vďaka posuvu sa zjednodušil priebeh analýzy a spresnilo nastavenie polohy fokusačného objektívu, čím aj presnosť fokusácie.

9 Použitá literatura

PUBLIKÁCIE

[1] ADRAIN, R.S.; WATSON, J.: Laser Microspectral Analysis: a review of principals and applications. J. Phys. D: Applied Phys., 17, 1984, s. 1915-1935.

[2] CREMERS, D. A.; RADZIEMSKY, L.J.: Handbook of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. John Wiley & Sons Ltd., 2006, ISBN: 0-470-09299-8.

[3] HÁJEK, J.: Řídící jednotka krokového motoru založená na mikrokontroléru HC08. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií, 2007. 43 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Josef Strnadel, PhD.

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

[5] NOVOTNÝ, J.: Návrh systému pro automatické nastavení vzorku do ohniskové vzdálenosti objektívu 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.

[6] SAMEK, O., LIŠKA, M., KAISER, J.: Využití laserových ablací pro materiálovou analýzu: integrace LIFS a LIBS. Jemná mechanika a optika. 1998. 43(4). p. 123 - 128. ISSN 0447-6441.

ELEKTRONICKÉ ZDROJE

[7] HARTL, M.: Konstruování strojů – strojní součásti – Tření, mazání a opotřebení. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. None published.

[8] HARTL, M.: Konstruování strojů - strojní součásti – Šrouby a šroubové spoje. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. None published.

INTERNETOVÉ ZDROJE

[9] MATIS – internetový katalóg firmy [online]. [cit. 2008-10-05]

Dostupné z WWW: http://www.linearnitechnika.cz/Upload/ClientData/pdf/Linearnitechnika/0101_Kulickova_pouzdra_a_sety.pdf.

[10] PHYTRON – internetový katalóg firmy [online]. [cit. 2008-10-05]

Dostupné z WWW: ftp://ftp.phytron.de/datasheets/stepper_motors/vss-d.pdf.

[11] SHAEFFLER KG. Internetový katalóg firmy INA [online]. [cit. 2008-10-05].

Dostupné z WWW: <http://medias.ina.de/medias/ext/hp?lang=en>.

[12] STEINMEYER – internetový katalóg firmy [online]. [cit. 2008-10-05]

Dostupné z WWW: <http://www.steinmeyer.com/english/kataloge/pdf/bssm.pdf>.

[13] TESCAN – stránka firmy [online]. [cit. 2008-10-05]

Dostupné z WWW: http://www.tescan.com/cz/an_ts5130lm.html.

[14] ÚFI – stránka Ústavu fyzikálního inženýrství [online]. [cit. 2008-10-05]

Dostupné z WWW: <http://physics.fme.vutbr.cz/ufi.php?Action=0&Id=1457>.

Zoznam použitých skratiek a symbolov

- AES – (atomic emission spectroscopy) metóda spektroskopie emisných atómov
- CCD – (charged-coupled device) typ fotocitlivého snímača
- CID – (charged-injection device) typ fotocitlivého snímača
- c_X - koncentrácia skúmaného prvku X vo vzorke
- D – koeficient termodifúzie
- d_m – stredný priemer závitu šraub
- E_p – energia laserového pulzu
- E_s – žiarivá energia na jednotku hmotnosti
- F – vertikálne silové zaťaženie v ose šraub
- I – intenzita ožarovania
- ICCD – (intensified charged-coupled device) zosilnený typ CCD snímača
- ICP – (inductively coupled plasma) indukčne generovaná plazma
- I_{min} – minimálna intenzita k dosiahnutiu prahu vyparovania
- I_x – intenzita spektrálnej čiary prvku X na určitej vlnovej dĺžke
- J – celková intenzita spektrálnych čiar
- l – stúpanie závitu šraub
- LIBS – (laser induced breakdown spectroscopy) spektroskopia laserom indukovanej plazmy
- l_v – merné skupenské teplo vyparovania
- MIP – (microwave induced plasma) mikrovlnami indukovaná plazma
- M_L – moment potrebný k spúšťaniu bremena
- M_R – moment potrebný k zdvíhaniu bremena
- Nd:YAG – neodým: ytrium alumínium granát
- N_c – kritická elektrónová hustota
- N_e – elektrónová hustota
- N_x – počet atómov prvku X v plazme
- N_x^* - počet atómov prvku X v excitovanom stave
- p – rozteč závitu
- PDA – (photodiode detector array) detektor s poľom fotodiód
- P_L – trecia sila spôsobená vertikálnym zaťažením v ose šraub pri spúšťaní bremena
- P_R - trecia sila spôsobená vertikálnym zaťažením v ose šraub pri zdvíhaní bremena
- Q – časť celkovej intenzity vstupujúcej do spektrometru
- S_x – intenzita spektrálnych čiar registrovaných na detektore spektrometru
- t_b – doba snímania žiarenia plazmy
- t_d – doba oneskorenia snímacieho signálu

t_1 – dĺžka trvania pulzu

ÚFI – ústav fyzikálneho inžinierstva

α – vrcholový uhol závitú

λ – vlnová dĺžka

μ – koeficient šmykového trenia

π – Ludolfovo číslo

ρ – hustota látky – skúmanej vzorky

τ – doba trvania pulzu

Zoznam príloh

- Príloha č. 1 – Výkres zostavy posuvu 5O/90-00
- Príloha č. 2 – Kusovník k zostave posuvu 5O/90-00-0
- Príloha č. 3 – Výkres držiaku objektívu 5O/90-01
- Príloha č. 4 – Výkres základne 5O/90-02
- Príloha č. 5 – Výkres šraubou 5O/90-03
- Príloha č. 6 – Výkres matky 5O/90-04
- Príloha č. 7 – Výkres spojky 5O/90-05