

Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

Katedra optiky

Bakalářská práce

Návrh sběru pro vícekanálový spektrometr



Vypracoval: David Novák

Studijní obor: Digitální a přístrojová optika

Vedoucí: Ing. Jan Novotný, Ph.D.

Termín odevzdání práce: 5. 8. 2020

Bibliografická identifikace:

Jméno a příjmení autora	David Novák
Název práce	Návrh sběru pro vícekanálový spektrometr
Typ práce	Bakalářská
Vedoucí práce	Ing. Jan Novotný, Ph.D.
Rok obhajoby práce	2020
Klíčová slova	Spektrometr, optické vlákno
Počet stran	32
Jazyk	Český

Abstrakt

Téma bakalářské práce je zaměřena na detekci záření laserem buzeného plazmatu a související konstrukcí detekční jednotky. Efektivní detekce záření je možná pouze při použití optimalizovaného opto-mechanického systému, který reflektuje rozsah detekovaných vlnových délek a koriguje jednotlivé vady zobrazení. Limitním případem je pak současné využití vícekanálového spektrometru, který vyžaduje zavedení většího počtu optických vláken. Cílem této práce je tedy opto-mechanický návrh sběru pro vícekanálový spektrometr, který bude vyhovovat požadovaným rozsahům vlnových délek. Dílčím cílem je pak zevrubná rešerše současných řešení a optimalizace zvoleného systému pro dané vlnové délky.

Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jana Novotného, Ph.D. a že jsem použil zdrojů, které cituji a uvádím v seznamu použité literatury.

V Olomouci

.....

Děkuji svému vedoucímu Ing. Janu Novotnému, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce a cenné rady.

Obsah

Úvod.....	6
1 Spektroskopie	7
1.1. Historie.....	7
1.2. Atomová emisní spektroskopie (AES).....	8
1.2.1. Bohrov model atomu	8
1.2.2. Energiové přechody	9
1.3. Aparatura LIBS.....	10
1.3.1. Laser	11
1.3.2. Fokusační systémy	13
1.3.3. Plazma	14
1.3.4. Sběrná optická soustava	14
1.3.5. Optická vlákna	15
2 Konstrukce pro vícekanálový sběr.....	17
2.1. Užití vláknového děliče	19
2.2. 6 sběrných soustav	22
2.3. Rozdělení svazku pomocí dichroických zrcadel.....	24
Zhodnocení	29
Literatura	31

Úvod

Spektroskopie laserem buzeného plazmatu, zkráceně LIBS (z anglického Laser Induced Breakdown Spectroscopy) je v poslední době čím dál více používaná analytická metoda. Je založena na snímání emisního spektra plazmatu vybuzeného na povrchu vzorku za pomoci fokusovaného laserového pulzu. Tato metoda, založena na atomové emisní spektroskopii (AES - kap. 1.2.), je žádaná ve velmi širokém odvětví průmyslu, ať už mluvíme o analýze prvkového složení archeologických předmětů, detekci rud v horninách, složení oceli v ocelárnách, o zdravotnictví, stavebním průmyslu či o moderních technologiích, jako je například polovodičová technika nebo nanotechnologie. Potřeby průmyslu si vyžádaly nově i mobilní dálkové varianty rLIBS (remote LIBS) určené k dálkové analýze na vzdálenost jednotek až několika desítek metrů.

Metoda LIBS je vyvíjena už po dobu několika desítek let a její původní nedostatky (např. detekční limity, rychlost detekce, velikost kráteru aj.) se daří eliminovat několika způsoby. V principu je možné získat informace o výskytu většiny prvků periodické tabulky ve vzorku s limity detekce až na jednotky ppm (částic na milion). V tuto chvíli jsou již známy způsoby, jak lze tyto limity dále snížit. Jako jedna z možností se nabízí například použití druhého laserového pulzu, který reexcituje plazma vytvořené pulzem prvním (tzv. Double pulsed LIBS). Další metodou může být aplikace stříbrných nanočástic na povrch měřeného vzorku, čímž můžeme získat zesílený signál pro určité stopové prvky.

Při měření metodou LIBS se využívá aparatury složené z pulzního laseru, sběrné optiky, optického vlákna, spektrometru a z počítače vybaveného softwarem pro vyhodnocování spektra získaného z plazmatu.

Cílem mé bakalářské práce bylo navrhnout konstrukci pro sběr vícekanálového spektrometru a tím docílit většího spektrálního rozsahu a zároveň vysokého rozlišení oproti využití jediného spektrometru typu Czerny-Turner. Konstrukce komory je určena pro laboratorní podmínky a je dostupná na univerzitě Vysokého učení technického v Brně.

1 Spektroskopie

1.1. Historie

Nepochybně největším průkopníkem, který otevřel brány vědě zabývající se optickým zářením a s tím úzce spjaté spektroskopii, byl Isaac Newton. V letech 1665-1666, kdy kvůli morové nákaze musel opustit Cambridge a přestěhovat se na anglický venkov, začal experimentovat. Zde prožil nejplodnější období, během kterého se kromě gravitace a diferenciálního počtu zabýval tím, jak dochází k barevnému vidění. Doposud se všeobecně přijímala Aristotelova myšlenka, že světlo je bílé a při průchodu sklem se znehodnocuje. To vyvrátil Newton během svého experimentu, když za sebe umístil dva trojúhelníkové hranoly, které byly spojeny jejich základnami. Měl možnost pozorovat, že první hranol rozloží bílé světlo na duhové spektrum, ale druhý hranol tyto barvy opět sloučí do světla bílého. Tímto pokusem si Newton uvědomil, že světlo není prakticky čisté, ale je složené z mnoha barev a dal tak základy oboru spektroskopie [1]. Ne však atomové spektroskopii, na které je spektroskopie laserem buzeného plazmatu založená. Ta má kořeny v roce 1800, ve kterém slavný astronom William Herschel studoval účinky zahřívání těles a tím rozšířil do té doby známé viditelné spektrum o IR oblast. V následujícím roce zase Johann Wilhelm Ritter svým pokusem objevil UV část spektra. V roce 1802 si William Wollaston při ověřování Ritterových výsledků všiml chybějících čar ve spektru slunečního světla - 7 tmavých čar, kde 5 z nich bylo na hranici mezi dvěma barvami a dvě čáry v oblasti určité barvy (konkrétně v oblasti světla zelené a modré barvy) [2].

Po 12 letech začal toto podrobně studovat Joseph von Fraunhofer, zmapoval 574 tenkých černých čar v rozloženém slunečním spektru a 8 nejvýznamnějších označil velkými písmeny od A po G. Dnes je známe jako Fraunhoferovy čáry. Tou dobou Fraunhofer vynalezl také dnes dobře známou difrakční mřížku, díky které byl schopen měřit vlnové délky jednotlivých čar a získat hodnoty na tu dobu nebývale přesné. Ačkoliv se spektrálním výzkumem zabýval většinu svého poměrně krátkého života, nikdy nezjistil, co stojí za výskytem černých čar ve spektru. I přesto byl pro své objevy v optice označen za zakladatele spektrální analýzy [2].

O velký pokrok spektrální analýzy se postarali roku 1826 John Herschel a W. H. F. Talbot. Při pokusu, kdy zahráli látku a vzniklé záření prošlo spektroskopem, zjistili, že každý prvek obsažený v látce vyzařuje na jemu charakteristických vlnových délkách. V roce 1859 Gustav Kirchhoff společně s Robertem Bunsenem objasnili výskyt černých nebo naopak světlých čar. Ve svém pokusu nechali sluneční paprsky projít plamenem kahanu obohaceného o chlorid lithný. Ve spektru samotného plamene mohli vidět jasnou emisní čáru lithia, avšak při prosvícení plamene slunečními paprsky se tato čára zcela vytratila. Bylo tedy jasné, že je-li látka schopná vyzařovat světlo určité vlnové délky, pak je tuto vlnovou délku schopna i absorbovat. Tímto dali světu zákon o vztahu mezi emisí a absorpcí, čímž vysvětlili Fraunhoferem neobjasněný původ tmavých čar ve slunečním spektru a spektrální analýze v mnoha vědních disciplínách otevřeli zcela nové obzory [4]. V dalších letech Kirchhoff s Bunsenem pomocí nové techniky objevují prvky cesium a rubidium. V následujících letech stejným způsobem další vědci objevili např. thallium (S.W. Crookes), indium (F. Reich a T. Richter), helium (P. Janssen a J.N. Lockyer).

Vývoj spektrální analýzy a pochopení řady nejasností byl podpořen hned několika důležitými objevy, teoriemi a vynálezy. Ve stručnosti se jedná především o objev elektronu, Bohřův

model atomu, příchod Maxe Plancka a Alberta Einsteina s kvantovou hypotézou, fotoelektrickým jevem a jinými revolučními poznatky fyziky mikrosvěta aj. Vele důležitý byl také rok 1900, ve kterém přišel na trh Frank Twyman s prvním komerčně dostupným křemenným hranolovým spektrometrem. Neméně cenný byl pak vynález elektrického oblouku a jiskrového výboje. Roku 1955 vyvinul Australan Alan Walsh atomovou absorpční spektroskopii (AAS), která byla ve 20. století označena za nejvýznamnější pokrok v chemické analýze.

Tak jako v každém technickém oboru, tak i pro spektrální analýzu byl příchod elektroniky velkým převratem. Zdokonalovalo a digitalizovalo se prakticky vše spojené s tímto oborem [3]. Po dlouho očekávaném příchodu prvního laseru (viz kap.1.3.1.) vyrobeného americkým fyzikem Theodorem Maimanem roku 1960 mohla vzniknout nová metoda LIBS, známá dnes jako spektroskopie laserem buzeného plazmatu.

1.2. Atomová emisní spektroskopie (AES)

LIBS je jednou z metod atomové emisní spektroskopie (někdy označována jako optická emisní spektroskopie – OES). Ta patří spolu s atomovou absorpční, fluorescenční a hmotnostní spektroskopií do jedné skupiny metod pro materiálovou analýzu vzorků. Účelem AES je určit základní složení vzorku, ať už v pevném, kapalném či plynném stavu. Pod touto analýzou si můžeme představit jak “jednoduchou” identifikaci atomových složek vzorku, tak i podrobnější stanovení relativních koncentrací či absolutních hmotností. Mezi základní kroky AES patří:

- atomizace/odpařování vzorku za vzniku volných atomových částic,
- excitace atomů,
- detekce emitovaného záření,
- stanovení koncentrací, hmotností nebo jiných informací.

Vlastnost každého prvku vyzářit své vlastní emisní spektrum by se dala připodobnit k otisku prstu každého člověka - je pro každého z nás specifický a jedinečný [6].

Abychom ale správně pochopili princip AES, je potřeba si nejdříve vysvětlit několik předpokladů.

1.2.1. Bohrov model atomu

Důležitým milníkem pro AES byl příchod dánského fyzika Nielse Bohra s jeho modelem atomu vodíku a tvrzením, že veškerá energie je z atomu vyzařována i pohlcována v nedělitelných balících, tzv. kvantech. V jeho teorii elektrony obíhají atomové jádro v různých soustředných energetických hladinách. Když elektrony pohltnou energii, dochází k vybuzení (excitaci) a elektrony přeskóčí na vyšší energetickou hladinu. Tam vydrží řádově 10^{-8} s a při přeskočení na nižší hladinu (deexcitace) dojde k uvolnění kvanta energie. Už v roce 1913 se tedy vědělo, že vyzařovaná energie má spojitost s přeskoky elektronů mezi hladinami. Jestliže atom přechází z vyššího stavu do nižšího, energie se vyzáří (např. v podobě fotonu).

Při opačném přechodu se energie pohltí. Energie se může předávat i jinak než zářením, třeba srážkou částic, ale vždy pouze v kvantech odpovídajících rozdílu energetických hladin. Přejde-li soustava z kvantového stavu o energii E_n do stavu s nižší energií E_m , vyzáří nebo jinak uvolní kvantum energie o frekvenci f_{nm} podle následujícího vztahu [5]:

$$hf_{nm} = E_n - E_m, \quad (1)$$

kde $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s je Planckova konstanta

Tuto teorii lze sice z atomů aplikovat pouze na vodík, ale pro vysvětlení existence energetických hladin je to dostačující.

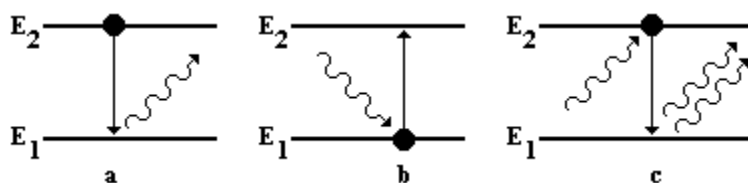
1.2.2. Energiové přechody

Jak již bylo vysvětleno předchozí rovnicí (1.2), atomy při přechodu z excitovaného stavu do nižšího mohou vyzářit foton. Tento přechod proběhne v náhodném okamžiku a celému ději se říká spontánní emise (lat. emitto = vysílám).

Opakem emise je absorpce (lat. absorbeo = pohlcuji). To je proces, při kterém atom v nižším energetickém stavu pohltí foton o přesné energii, které je potřeba k excitaci do vyššího stavu.

A. Einstein dal světu mnoho včetně práce, která obsahovala opět něco zcela nového. Zmiňuje se v ní o třetím procesu, při kterém foton dopadající na atom ve vyšším energetickém stavu přiměje tento atom k přechodu do stavu nižšího. Důsledkem je vyzáření dalšího fotonu. Původní atom se ale nepohltí a oba fotony letí společně dále stejným směrem. Tyto dva fotony letí stejným směrem a ke všemu mají stejnou vlnovou délku (shodnou s dopadajícím fotonem) s nulovým fázovým rozdílem. Záření se tak zesiluje a proces se může lavinovitě opakovat. Tomuto procesu říkáme stimulovaná emise a na jejím principu je založen také laser (více v kap.1.3.1.).

Absorpce a emise jsou jevy stejně pravděpodobné. Rozhodující je, na jaké energiové hladině se při nerovnovážném stavu v aktivním prostředí (více v kap. 1.3.1) nachází většina atomů. V případě, že se více atomů nachází na vyšší energiové hladině, pak mluvíme o tzv. inverzi populace a převládne emise záření.



Obrázek 1: spontánní emise (a), absorpce (b), stimulovaná emise (c)

Při deexcitaci částice vyzařují elektromagnetické záření ve formě fotonů takových vlnových délek, které jsou charakteristické pro jednotlivé prvky. Spektrometrem jsme schopni změřit intenzitu spektrálních čar patřících různým vlnovým délkám. Ta nám dává informace o koncentraci prvku obsaženém v daném vzorku, tedy jeho kvantitu. Podle vlnových délek pak zjistíme, o jaké prvky se jedná (kvalita). Jako nejběžnějších budících zdrojů se využívá laser, plamen, jiskrový výboj, obloukový výboj a plazmový výboj, mezi který patří např. indukčně vázané plazma (ICP) nebo mikrovlnně indukované plazma (MIP).

1.3. Aparatura LIBS

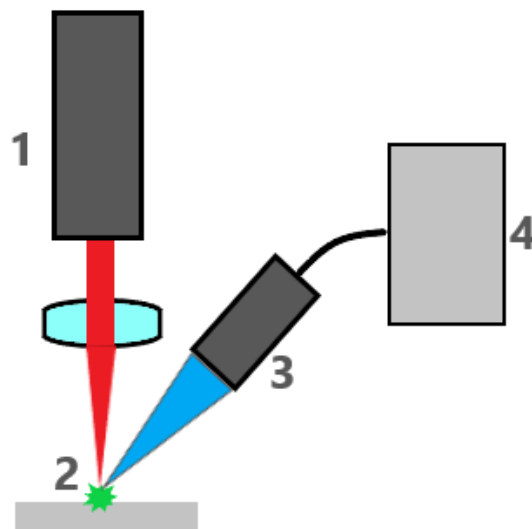
Jak již bylo zmíněno v historii (kap 1.1.), metoda LIBS vznikla až s příchodem prvního laseru. Ten otevřel spektrochemické analýze zcela jiné možnosti a díky němu se také LIBS během posledního půlstoletí vyvinul v moderní analytickou metodu, která i přes poměrně složité děje na první pohled nevypadá nijak složitě a obsluhovat její aparaturu není v dnešní době nic náročného.

Mezi její hlavní výhody patří:

- rychlost - celý proces, včetně vyhodnocení počítačem, nezabere více než vteřinu,
- zachování vzorku - odpaří se jen nepatrné množství materiálu v řádu několika nanogramů,
- není potřeba složitá příprava vzorku,
- dálková spektroskopie - dnes je již možné analyzovat vzorek i v terénu na vzdálenost několika metrů.

Typická aparatura LIBS je znázorněna na obrázku č.2. Hlavními komponentami, které si v následujících podkapitolách podrobněji rozebereme, jsou:

1. pulzní laser, který generuje silné optické pulsy k vytvoření mikroplazmatu,
2. optická soustava zaostřující laserový svazek do konkrétního cíle na povrchu vzorku,
3. optická soustava pro sběr záření plazmatu,
4. spektrometr pro záznam záření,
5. počítač, který slouží k ukládání dat z detektoru a k "vystřelení" laserového paprsku.



Obrázek 2: Typická aparatura LIBS 1) laser 2) plasma 3) sběrná soustava 4) spektrometr

1.3.1. Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

Laser, jak už anglický název napovídá, je zdroj založený na zesilování světla stimulovanou emisí, jehož výsledkem je vysoce koherentní elektromagnetické záření. Tvoří ho primárně aktivní prostředí, rezonátor, zdroj záření a laserový paprsek. U výkonnějších laserů by neměl chybět ani chladič, který zabraňuje přehřívání přístroje a dbá tak na ochranu probíhajícího procesu. Laser vyzařuje světlo v úzkém svazku paprsků a od obyčejného světla se liší tím, že je koherentní, tedy že má stejnou vlnovou délku, fázi a amplitudu.

Princip

Princip se zakládá na zesilování záření stimulovanou emisí, kdy jsou elektrony v aktivním prostředí dodáním energie vybuzeny a následně přecházejí na tzv. metastabilní hladiny, na nichž mohou setrvat poměrně dlouho (10^{-8} s a déle). Pokud během této doby atom v excitovaném stavu interaguje s dalším fotonem, atom se vrátí ke své nižší energii a vyzáří druhý foton, který je identický s tím prvním. Ve chvíli, kdy dodáním energie dospějeme k tomu, že počet atomů na metastabilní hladině převažuje nad počtem atomů na nižší hladině, můžeme mluvit o tzv. populační inverzi. Tím dochází k zesilování světla stimulovanou emisí záření. Konstrukcí rezonátoru docílíme, aby laserový paprsek měl požadovaný směr. Tvoří ho na jednom konci odrazné a na druhém konci polopropustné zrcadlo. Fotony letící mimo osu rezonátoru pravděpodobně vyletí pryč. Musí však existovat takové fotony, které letí rovnoběžně s osou laseru. Ty kmitají mezi zrcadly a jejich počet exponenciálně narůstá. Tyto fotony následně rezonátor opustí a tím vzniká laserový svazek paprsků.

Obyčejné světlo vyzařované například Sluncem, ohněm nebo žárovkou je tvořeno všemi vlnovými délkami a po splynutí všech těchto barev se lidskému oku může jevit jako světlo bílé, případně žluté. Naproti tomu laser vyzařuje světlo monochromatické a má téměř nulovou rozbíhavost. Navíc je možné laserový paprsek fokusovat na plochu velmi malých

rozměrů. Právě této vlastnosti se využívá v zařízení LIBS. Velikost intenzity záření v místě, kde fokusovaný laserový svazek dopadá na povrch vzorku, může dosahovat až několika stovek $\text{GW}\cdot\text{cm}^2$ a následkem takto velké intenzity se materiál v místě dopadu svazku prudce ohřeje (rychlostí asi 10^{10} K/s.), zkapalní a odpaří.

Dělení laserů:

Lasery lze dělit do skupin na základě různých vlastností, jako je spektrální oblast vysílaného záření (masery, lasery, gasery, rasery), podle počtu energetických hladin částic aktivního prostředí, režimu práce či typu excitace. Tím nejběžnějším je dělení podle aktivního prostředí:

- pevnolátkové lasery - aktivním materiálem jsou krystalické nebo amorfní izolanty s příměsí vhodných iontů. Nejznámějším je rubínový laser, nejrozšířenějším neodymový, známý jako Nd:YAG,
- kapalinové (barvivové) lasery - jejich aktivní prostředí tvoří roztoky různých organických barviv,
- polovodičové lasery - patří dnes mezi nejpoužívanější, základem je elektricky čerpaná polovodičová dioda velmi malých rozměrů,
- plynové lasery - aktivním prostředím je zde plyn, který lze budít či stimulovat různými způsoby (elektricky, radiofrekvenčními vlnami, opticky apod.), v průmyslu je dobře známý např. CO_2 laser nebo He-Ne (helium-neonový) laser,
- vláknové pulsní lasery - aktivní prostředí tvoří vlákno dopované prvkem Ytterbia. To je čerpáno pomocí laserové diody. Světlo čerpané z této diody generuje ve vlákně další energii, která je následně akumulována a ve formě zesíleného paprsku vychází ven z vlákna. Většinou je tento výstupní paprsek skládán s paprsky vystupujícími z mnoha dalších optických vláken, čímž je možno dosáhnout vyššího výkonu u laserového paprsku, který je tímto způsobem složen. V pulzním režimu je energie paprsku akumulována po delší dobu, díky čemuž má paprsek při svém výstupu vyšší výkon. Mezi jednotlivými výstupními paprsky vznikají prodlevy, které jsou dány právě časem nutným k nahromadění potřebné energie. Tak vznikají světelné pulsy [8].

Lasery v LIBS aplikacích

Mezi běžné a nejčastěji používané lasery v LIBS aplikacích patří především pevnolátkový pulzní Nd:YAG laser, jehož aktivním prostředím je izotropní krystal Yttrium Aluminium Granátu ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) dopovaný ionty neodymu (Nd^{3+}). Ten je vyjma své cenové dostupnosti vhodným pomocníkem i pro svou spolehlivost a je vhodným zdrojem pulsů potřebných pro generování plazmatu. Fundamentální typ takového laseru generuje záření na vlnové délce 1064 nm a délka jeho pulsu se pohybuje v rozmezí od 6 do 15 nanosekund, ale může být konverzí převeden na kratší vlnové délky (532,355 a 266 nm) s délkou pulzu 4-8 ns. Výhodami této kategorie laserů jsou především:

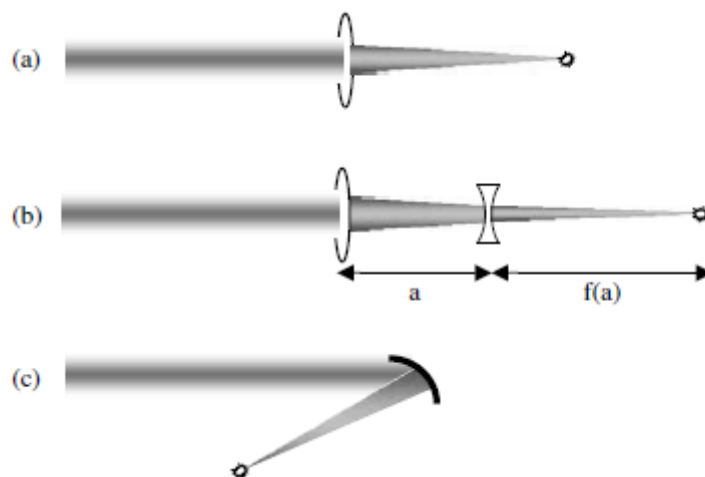
1. schopnost snadné úpravy vlnové délky k dosažení vyšších harmonických frekvencí,
2. dostupné ve velmi kompaktní formě pro malé přístroje,

3. vysoká kvalita svazku,
4. možnost dvojitého pulzu v jedné jednotce (to ostatně nabízejí i jiné lasery).

Pro UV oblast se používají excimerové lasery XeCl (308 nm), KrF (248 nm) ArF (194 nm) s délkou pulsu okolo 20 ns. Ty jsou ovšem složitější na údržbu a kvalita svazku je v porovnání s Nd:YAG lasery podstatně nižší. Zmíněné vlastnosti platí také pro CO₂ laser, který generuje záření v daleké infračervené oblasti - asi 10 600 nm [7].

1.3.2. Fokusační systémy

Způsob fokusace laserového paprsku do malého bodu na povrchu vzorku závisí na konkrétním využití této metody. Mnohdy zaostření dosáhneme užitím čoček a zrcadel, jak můžeme vidět na obrázku (obr. 3). Typickým způsobem k dosažení analyticky užitečného plazmatu je zvolit jednoduchou čočku (a). V systémech, kde vzdálenost mezi laserem a vzorkem není stálá, tudíž zaostření vyžaduje nastavitelnou variantu, je vyžadován systém více čoček (b). Naopak u některých aplikací se k fokusaci využívá zrcadel (c).



Obrázek 3: Možnosti fokusace [7]

Ve většině případů se však využívá k zaostření jednoho optického prvku. Jeho hlavními parametry jsou především: ohnisková vzdálenost a míra korekcí optických vad. Chceme-li fokusovat laserový svazek do určitého bodu, je nezbytné si uvědomit, že je nemožné zaostřit svazek do geometrického bodu, protože optická soustava nikdy není dokonalá. Minimální ovlivněná plocha tedy bude vždy daná difrakcí [9].

Pro sofistikovanější systémy, například v situacích vyžadujících variabilní vzdálenost zaostření laserového svazku v řádech několika metrů, se využívá složitějších vícečočkových optických soustav k dosažení co nejmenší ovlivněné plochy.

Pro čočky jsou klíčové následující vlastnosti:

1. materiál - čočky jsou vyrobeny z těch materiálů, které disponují co největší propustností pro konkrétní vlnové délky laserového záření,

2. antireflexní vrstvy - nanášejí se pro minimalizaci zpětného odrazu na přechodu vzduch-sklo,
3. typ čočky - plankonvexní, bikonvexní apod.

1.3.3. Plazma

Vlivem dopadajícího záření fokusovaného laserového svazku o velké intenzitě dochází k zahřátí materiálu. Při zahřívání dochází k jeho zkapalnění a odpaření. Tyto páry se skládají z jednotlivých atomů, popřípadě molekul (pokud během vypařování nebo sublimace nedojde k jejich rozkladu). Dalším zvyšováním teploty dochází k excitaci atomů a molekul a při jejich deexcitaci může dojít k vyzáření fotonů, jejichž vlnové délky jsou pro konkrétní atomy a molekuly charakteristické. Při stálém zvyšování teploty dochází nejen k excitaci, ale i k ionizaci a vzniká směs elektronů a iontů - plazma. Ionty mají sice také své charakteristické spektrální čáry, ale volné elektrony mohou při srážkách náhle měnit směr i rychlost svého pohybu, což může být spojeno s absorpcí či emisí fotonu. Plazma se tak stává neprůhledné (potažmo černé) a samo září jako černé těleso se spojitým spektrem, které nese informaci především o teplotě, ale vytrácí se informace o složení materiálu. Pokud během laserového impulsu dojde nejen k vytvoření "obláčku" materiálu zahřátého na takovou teplotu, že v něm bude nejen významná koncentrace excitovaných atomů či molekul, ale i velké množství iontů a volných elektronů, stane se toto plazma neprůhledným a další laserové záření bude absorbováno v tomto oblaku a bude dále zvyšovat jeho teplotu - zvýší zářivý tok černého tělesa (se čtvrtou mocninou teploty) se spojitým spektrem. Pro získání co nejlépe vyhodnotitelného čárového spektra tedy existuje optimální teplota odpařeného materiálu a při dalším zvyšování jeho teploty (tedy i energie v laserovém impulsu) je vyhodnocení již obtížnější. To je důvod, proč se v LIBS systémech používají pulzní lasery, které v místě dopadu dosahují intenzity v řádech několika $\text{GW}\cdot\text{cm}^2$ i přesto, že je zde možnost využití i daleko silnějších laserů.

1.3.4. Sběrná optická soustava

V závislosti na typu aparatury může sběrná soustava využívat různých optických prvků. Nejčastěji se však opět jedná o kombinace čoček (popř. zrcadel), které navedou plazmatem emitované záření do optického vlákna a následně do spektrometru. Hlavním nepřítelem je zde chromatická aberace, jelikož poloha ohnisek těchto čoček je závislá na vlnové délce a dostat do spektrometru co největší kvantum záření je proto poněkud složitější. Sběru plazmatu a jeho variantám pro vícekanálový spektrometr bude věnována celá kapitola 2.

1.3.5. Optická vlákna

Záření se pomocí optických komponent navádí do optického vlákna. Díky této technologii jsme dnes schopni přenést informaci obrovskou rychlostí i na tisíce kilometrů daleko. Přenos elektromagnetické vlny, která se šíří ve směru osy vlákna, je založen na totálním odrazu dvou rozdílných prostředí, pro které musí platit, že index lomu vnitřního prostředí (jádra) musí být větší, než index lomu prostředí vnějšího (pláště). Pro totální odraz na rozhraní dvou prostředí, kde $n_2 < n_1$, ze Snellova zákona plyne:

$$\alpha_m = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (2)$$

kde α_m je mezní úhel. Pokud světlo dopadá pod větším úhlem, než je úhel mezní, je kompletně odraženo. Tímto způsobem se světlo přenáší po celé délce vlákna. Vlákna můžeme v principu rozdělit do tří kategorií:

- jednojádřová vlákna (SMF) - vlákno s malým poloměrem jádra, které vede pouze jeden vid. Slouží k přenosu dat na větší vzdálenosti, např. vysokorychlostní internet mezi kontinenty,
- mnohójádřová vlákna se skokovou změnou indexu lomu (MMF SI) - mají větší průměr a používají se především pro komunikace v rámci kratších vzdáleností, výhodou je nižší cena,
- mnohójádřová vlákna s gradientním průběhem indexu lomu (MMF GI) - mají speciálně upravené jádro, díky němuž se světlo v těchto vláknech nešíří pomocí totálního odrazu, ale díky ohybu světla. Používají se zejména v datových sítích.

Numerická apertura (NA)

Znalost této vlastnosti optického vlákna je nezbytná při navedení optického záření do jádra vlákna. Určuje úhel, pod kterým je možné do vlákna navázat vedené paprsky. Určuje se jako:

$$NA = n_1 \sin(\theta_{\max}) \quad (3)$$

kde θ_{\max} je maximální úhel, pod kterým paprsek projde do jádra vlákna.

Ztráty v optických vláknech

Průchodem elektromagnetického vlnění vláknem dochází k útlumu, který může být zapříčiněn několika faktory. Obecně útlum definujeme jako poměr síly signálu mezi koncem a začátkem optického vlákna:

$$A = 10 \cdot \log \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (4)$$

Ztráty můžeme rozdělit na:

- ohybové ztráty - dochází k nim při ohybu optického vlákna, při kterém je porušena podmínka totálního odrazu a paprsek dopadá do pláště,
- rozptylové ztráty - jsou dány výrobou, vznikají na nečistotách a fluktuacích krystalické mřížky,
- absorpční ztráty - elektromagnetické vlnění se absorbuje a přeměňuje se na teplo,
- disperzní ztráty - nejsou to ztráty v pravém slova smyslu, ale kvůli disperzním jevům se vlastnosti optického vlákna znehodnocují, protože energii navázanou do vlákna rozprostírají v čase [9],
- přechodové ztráty - na spoji dvou vláken může dojít ke ztrátám v důsledku dvou rozdílných apertur, kdy světlo z vlákna o vyšší apertuře proniká do vlákna o nižší apertuře. Některé paprsky totiž dopadají na rozhraní pod větším úhlem než je θ_{\max} a na rozhraní jádro-plášť nedochází k odrazu.

1.3.6. Spektrometr

S využitím optického vlákna je emitované záření přivedeno do spektrometru. Dnešní moderní spektrometry jsou schopny pomocí disperzních prvků měřit spektrum elektromagnetického záření i mimo viditelnou oblast. U těch nejběžnějších zobrazovacích spektrometrů, jako např. typu Czerného-Turnera, Ebertova apod., se k disperzi používají optické mřížky.

Spektrometry charakterizují 3 hlavní parametry. Mezi ně patří ohnisková vzdálenost f a rozlišení R , pro které platí:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \quad (5)$$

kde $\Delta\lambda$ je nejmenší vzdálenost dvou vlnových délek, které lze od sebe rozlišit v okolí vlnové délky λ .

Dalším parametrem je úhlová disperze dána úhlem $d\delta$, který svírají paprsky a rozdílem jejich vlnových délek $d\lambda$.

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \quad (6)$$

Detektory

Typy detektorů, které jsou umístěny na výstupní štěrbině každého spektrometru, pro LIBS závisí na mnoha faktorech, např. na typu použité spektrální metody.

Běžnými příklady jsou fotonásobiče (PMTs), fotodiody (PDA) nebo dnes nejrozšířenější CCD či CMOS čipy.

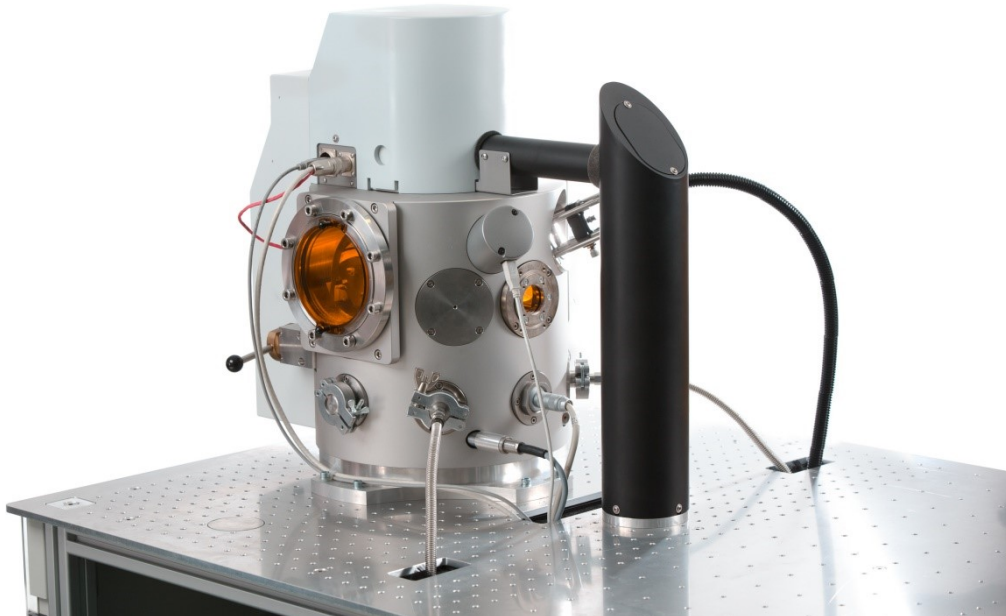
2 Konstrukce pro vícekanálový sběr

V dosavadní práci bylo popisováno provedení s jednokanálovým spektrometrem typu Czerny-Turner, u kterého se 2 hlavní parametry (velký spektrální rozsah a vysoké rozlišení) navzájem vylučují. Aby bylo docíleno přijatelné kvality obou těchto parametrů, pak může být řešením zavedení většího počtu spektrometrů (a jim úměrný počet optických vláken) naladěných na požadované rozsahy vlnových délek. V zadání mé bakalářské práce bylo stanoveno následujících 6 rozsahů vlnových délek:

1. 200-300 nm
2. 300-400 nm
3. 400-500 nm
4. 500-650 nm
5. 650-800 nm
6. 800-1000 nm

Komora

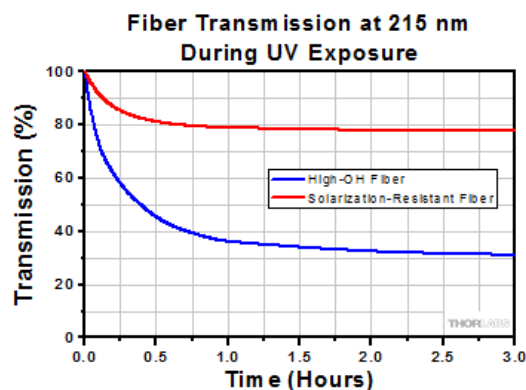
V řešeních uvažují návrhy konstrukcí, které jsou optimalizovány pro zabudování do reálné komory, která se nachází na univerzitě Vysokého učení technického v Brně. Její podoba je znázorněna na obrázku (obr. 4). Vzorek se vkládá dovnitř komory, kam je také černou trubicí přiveden laserový svazek. Pomocí optického vlákna napojeného na sběrnou soustavu je záření vyvedeno ven z komory.



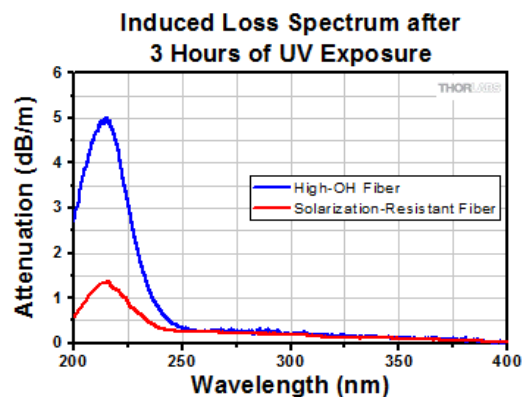
Obrázek 4: Schéma komory

Optická vlákna užitá v návrzích

Ve všech variantách uvažují optická vlákna Solarization-Resistant Multimode Fiber Optic Patch Cables: SMA-SMA od firmy Thorlabs [13]. Tato vlákna jsou obohacena o vrstvu odolnou vůči UV záření, které by jinak vedlo k degradaci přenosu. Výhoda odolnosti proti UV záření je zachycena na obrázku č.5, na kterém je porovnání procentuálního přenosu v závislosti na čase vláknem odolným proti slunečnímu záření se standardními křemičitými vlákny s vysokým obsahem OH. Obsah OH ve vlákně je zapříčiněn zbytkovou vlhkostí během výroby a tato vlákna pak vykazují při přenosu UV záření značné ztráty přenosu. Hodnoty jsou vztaženy na 1m délky vlákna, kterým prochází záření o intenzitě 25 W a vlnové délce 215 nm. Na obrázku č.6 je pak znázorněn útlum v decibelech na metr v závislosti na vlnové délce záření.



Obrázek 5: Porovnání propustnosti vláken v závislosti na čase [13]



Obrázek 6: Závislost útlumu na vlnové délce [13]

Další předností navrhovaného vlákna je schopnost přenášet záření o vlnových délkách v rozsahu od 180 nm až po 1200 nm, což je pro naši aplikaci ideálním řešením.

Pro další práci je třeba zmínit také tři další parametry, a to numerickou aperturu, která činí 0,22, průměr jádra 400 μm a vláknové spojení SMA905.

Vysoká kvalita vlákna a ochrana proti solarizaci si žádá také poměrně vysoké finanční náklady. 1 metr takového vlákna vyjde na 104,26 €, 2 metry pak stojí 123,94 €.

V úvahu přicházejí 3 řešení, kterým se v této části budu věnovat a porovnávat jejich pro a proti.

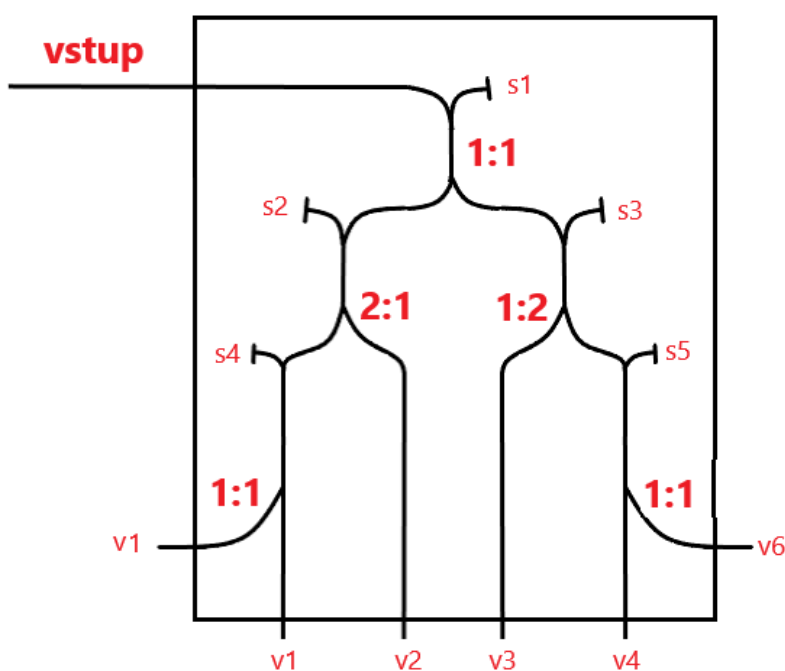
2.1. Užití vláknového děliče

Jako první z možností se nabízí rozdělení elektromagnetického záření vedeného optickým vláknem do šesti různých vláken pomocí vláknového děliče.

Vláknový dělič svazku

Toto zařízení, označováno též jako optický splitter, se používá k rozdělení dopadajícího světelného záření v jednom vlákně do dalších 2 a více optických vláken. Zakládá se na vlnovodné vazbě, ke které dojde mezi dvěma vlákny. Ta jsou od sebe v takové vzdálenosti, že elektromagnetické pole módu vedeného jedním vláknem částečně zasahuje do vlákna druhého [15]. Mezi nejčastější provedení patří děliče s počtem výstupních vláken rovných n -té mocnině čísla 2 (tedy 1x2, 1x4, 1x8, 1x16 apod.).

Pro naši aplikaci je zapotřebí navrhnout vláknový dělič 1x6. Aby na všech výstupech byl přibližně stejně silný signál, je nutno rozdělit vstupní vlákno v poměru 1:1, následující v poměru 2:1 a naposled už jen vlákno se silnějším signálem v poměru 1:1 (obr. 7).



Obrázek 7: Návrh vláknového děliče 1x6

Nejdůležitějšími parametry jsou: vazební poměr, nadměrné ztráty, vložné ztráty, směrovost, homogenita ztrát, útlum zpětného odrazu, rozsah operační vlnové délky, polarizačně závislé ztráty, izolace, spolehlivost a cena.

Nadměrné ztráty (excess loss) vyjadřují ztráty, ke kterým došlo rozptylem v nehomogenních místech vzniklých při nepřesné výrobě. Uvádí se v jednotkách dB a jsou určeny poměrem celkového vstupního výkonu k celkovému výstupnímu výkonu:

$$\text{Nadměrná ztráta}(dB) = 10 \log \frac{P_{\text{vstupní}}}{P_{\text{výstup1}}(mW) + P_{\text{výstup2}}(mW) + \dots + P_{\text{výstup6}}} \quad (7)$$

Směrovost se vztahuje na zlomek vstupního světla, který je ztracen v tzv. slepých částech vlákna znázorněných na obr.7. Taktéž se uvádí v dB a můžeme ji vypočítat z následující rovnice:

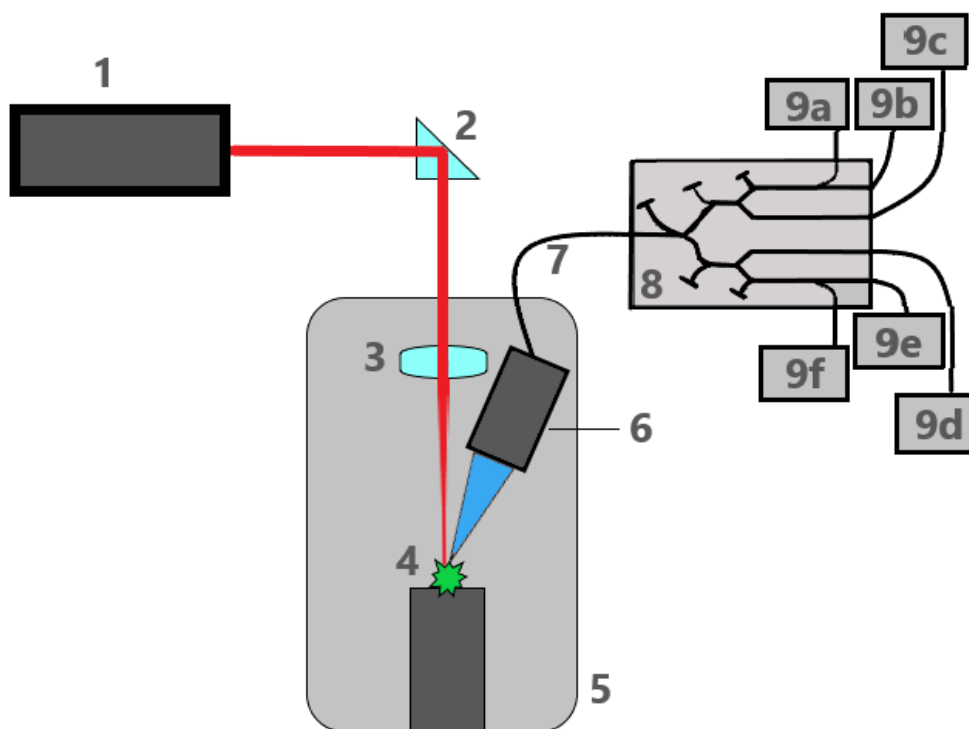
$$\text{Směrovost}(dB) = 10 \log \frac{P_{s1}(mW) + P_{t2}(mW) + \dots + P_{s5}(mW)}{P_{\text{vstupní}}} \quad (8)$$

kde P_{s1-5} jsou energie na koncích slepých částí vláken.

Vložné ztráty udávají poměr mezi vstupním signálem a signálem na konkrétním výstupu:

$$\text{Vložné ztráty}(dB) = 10 \log \frac{P_{\text{vstupní}}}{P_{\text{výstup-n}}} \quad (9)$$

Schéma zapojení by mohlo vypadat následovně (obr.8):



Obrázek 8: Schéma zapojení s vláknovým děličem

Nevýhodou této metody dělení záření je to, že do všech spektrometrů citlivých na určité vlnové délky dostaneme celé spektrum záření a tím se ochudíme o intenzity, které jsou přeneseny do jednotlivých spektrometrů zbytečně.

Nepříjemností této varianty je také to, že se naskytá problém s dostupností takovýchto prvků. V první řadě není zcela běžné vyrábět vláknový dělič ve verzi 1x6. Jak jsem uvedl na začátku této kapitoly, firmy se zaměřují na výrobu vláknových děličů s počtem výstupních vláken rovných n -té mocnině čísla 2 (tedy 1x2, 1x4, 1x8, 1x16 apod.). To neznamená, že by se vláknový dělič nedal sehnat. Možné to je, vyrábějí ho ovšem především méně známé čínské firmy, a to v obecném měřítku znamená také značně zhoršenou kvalitu přeneseného signálu. Dalším nezanedbatelným faktorem je také skutečnost, že tyto produkty ke všemu nepracují v rozsahu vlnových délek potřebných k naší spektroskopii, ale pracují v oblasti na hranici NIR a SWIR, tedy na vlnových délkách okolo 1200-1600 nm.

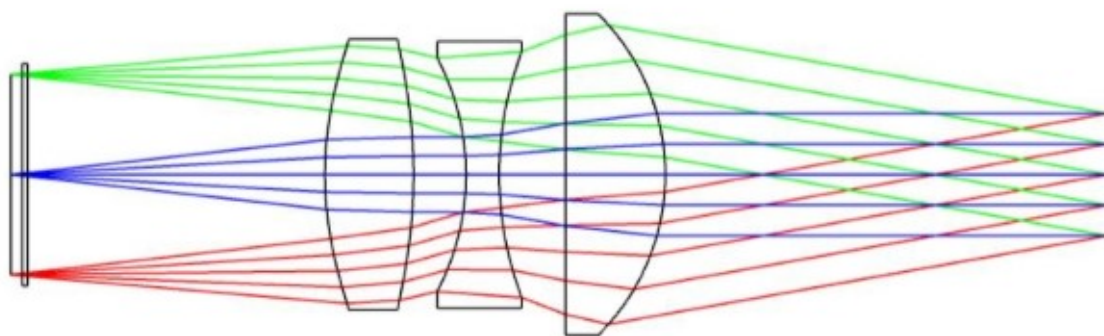
Jediným východiskem se nabízí zakázka na míru, čemuž by logicky odpovídala také vysoká cena. Při znalosti nákladů současných děličů na trhu bych odhadoval cenu zakázky až na 1000-1200 €.

2.2. 6 sběrných soustav

Další možností je použití šesti sběrů v komoře. Záření zachycené těmito sběrnými soustavami je neselektivně přeneseno optickými vlákny do odpovídajícího počtu spektrometrů. Pokud bychom uvažovali dosud využívanou sběrnou soustavu na Vysokém učení technickém, pak bychom nemohli použít takových soustav 6, protože by se do komory nemohly fyzicky vejít. Proto musí být jejich velikosti upraveny na požadovanou velikost. Toho se dá docílit pomocí vláknových kolimátorů malých rozměrů, které jsou schopny fungovat pro všechny požadované rozsahy vlnových délek – to znamená pro UV, VIS a NIR od 200 nm do 1000 nm.

Kolimátor

V optických kolimátorech dochází k přeměně divergentních paprsků světla na paprsky rovnoběžné (obr. 9). Mezi hlavní parametry patří průměr čočky (popř. více čoček), stavební délka, materiál, odrazivost, pracovní teplota, již zmíněný rozsah vlnových délek a také možnost vláknového napojení. Hlavním úkolem kolimační čočky je shromažďovat světlo ze světelného zdroje.



Obrázek 9: Kolimátor [12]

Kolimátory v návrhu

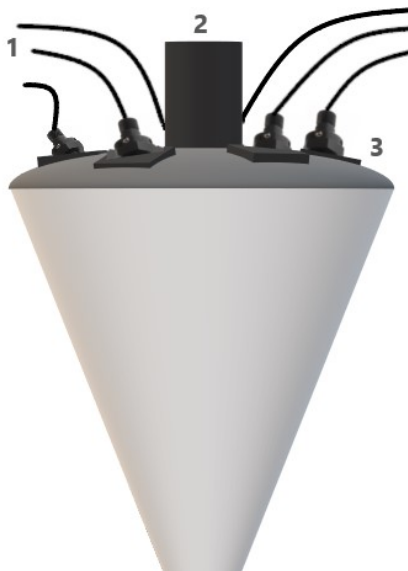
Pro aplikaci kolimátorů do komory se nabízí kolimační čočka COL-UV/VIS (Obr.10) od firmy Avantes, která má průměr čočky pouhých 6mm a celková délka je 8,7 mm. Rozsah vlnových délek je 200-2500 nm, takže je vhodná pro celý rozsah námi požadovaných vlnových délek. Plusem je také vláknové spojení SMA905, kterého využívají také optická vlákna uvedená na začátku této kapitoly. Pracovní teplota se pohybuje od -30° do 100° . Cena této konkrétní čočky bohužel není veřejně známá.



Obrázek 10: Kolimační čočka COL-UV/VIS

Cílem by zde bylo vytvořit kruhový nosič a tím se snadněji dostat do optimální vzdálenosti od vzorku, což by logicky znamenalo větší efektivitu v získávání záření do sběrné soustavy. Takový nosič by nesl kinematické čtvercové optické držáky, ve kterých je možné ukotvit navrhované kolimační čočky COL-UV/VIS. K tomu se nabízí využít kinematických držáků kategorie Techspec kinematic square optical mounts 12,5/12,7 od firmy Edmund Optics [17]. Zároveň je potřeba, aby byly justovatelné, a to zmíněné držáky splňují. K ukotvení a naklánění poslouží několik šroubů velmi citlivých na přesnost. Rozsah náklonu se pohybuje okolo $\pm 5^\circ$. Jeden takový držák nejmenších možných rozměrů 12,5/12,7 mm (6 držáků takových rozměrů se s rezervou vejde do komory) pak vyjde na 95 \$ (v přepočtu asi 80 €).

Na obrázku č.11 je znázorněn předběžný model nosiče kolimačních čoček. Celý nosič by byl posuvný po tyči obklopující laser.



Obrázek 11: Nosič kolimačních čoček. 1) optická vlákna 2) přívod laseru 3) kolimátory

2.3. Rozdělení svazku pomocí dichroických zrcadel

Dichroická zrcadla

Tento prvek velmi přesně propouští a odráží úzké spektrum záření v závislosti na jeho vlnové délce. Klíčovými vlastnostmi dichroických zrcadel jsou:

- Vysoká efektivita
- Dlouhá životnost
- Snadná manipulace

Při výběru optimálního dichroického zrcadla nás zajímá především hodnota Cut-on. To je vlnová délka, při které zrcadlo propouští 50% dopadajícího záření.

Z pohledu propouštění je můžeme dělit na tzv. Shortpass a Longpass.

Shortpass propouštějí kratší vlnové délky a blokuji delší. Longpass fungují logicky opačně – propouštějí delší vlnové délky a blokuji kratší. V mém návrhu jsem použil dichroická zrcadla Longpass (dále jen LP), která se zdají být vhodným řešením.

Tato varianta spočívá v rozdělení svazku pomocí dichroických zrcadel, která jsou sestavena tak, aby rozdělila svazek do šesti různých vláken podle požadovaných rozsahů vlnových délek.

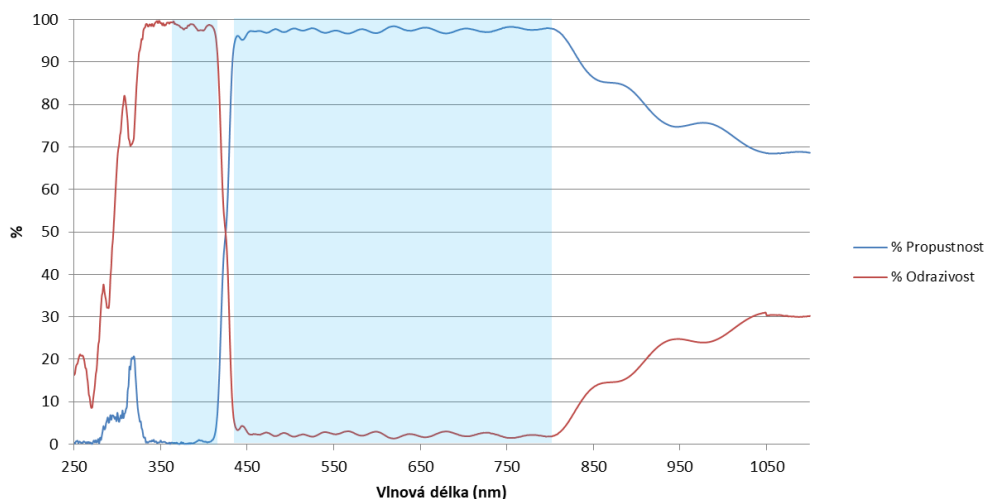
K návrhu jsem použil 4 dichroická zrcadla od firmy Thorlabs, jejichž Cut-on hodnoty nejlépe vyhovovaly našim požadavkům na rozdělení spektra. Jelikož v UV oblasti je problematické sehnat a zakomponovat do systému dichroická zrcadla, která by měla Cut-on okolo 300 nm, aby rozdělila první dvě oblasti (200-300 nm a 300-400 nm), rozhodl jsem se tyto dvě oblasti nerozdělovat selektivně, ale použít dělicí destičku 50R/50T od firmy Edmund Optics [16]. Tato destička o rozměrech 25x25 mm je vhodná pro práci v UV oblasti, konkrétně v rozsahu 250-450 nm. Výsledkem je rozdělení svazku v poměru 50:50 neselektivně, tedy do zbývajících 2 spektrometrů přivedeme záření o stejném spektru. Náklady na takovou destičku jsou 120 €.

Do návrhu jsem zakomponoval další níže uvedená 4 selektivní zrcadla. Ke každému z nich je k dispozici graf, který ukazuje závislost propustnosti a odrazivosti na vlnové délce dopadajícího záření. Modré pole znázorňuje oblast, ve které jsou uvedené hodnoty zaručeny výrobcem. Hodnoty mimo tuto oblast se mohou lišit.

Uvedené ceny jsou převzaty z katalogu na webových stránkách firmy Thorlabs a odpovídají provedení jednotlivých prvků s průměrem 1" [14].

LP Dichroic Mirror: Cut-on 425 nm

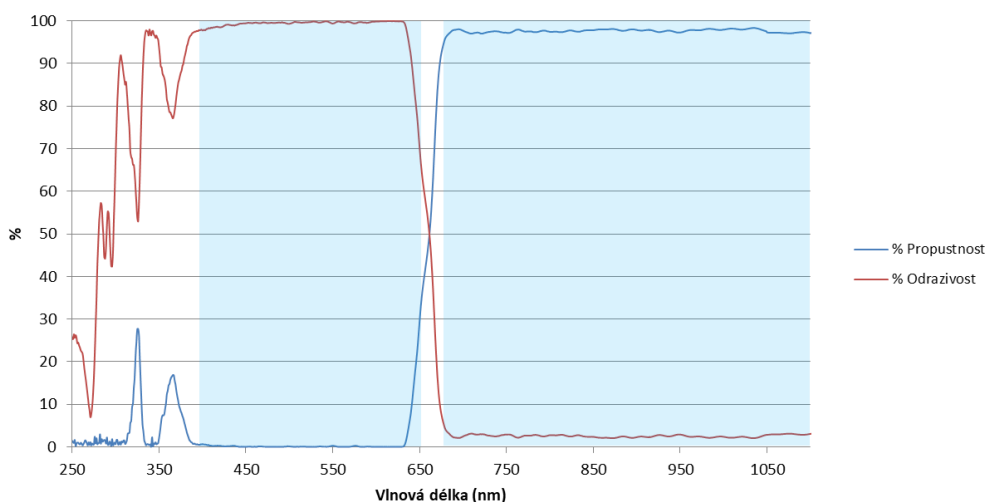
- Tento prvek odráží vlnové délky patřící do prvních dvou rozsahů, avšak z grafu je patrné, že vlnové délky v rozsahu 200-380nm nejsou v modré oblasti a jejich přenos může být značně degradován
- Reflexní pásmo 380-410 nm (200-410 nm)
- Přenosové pásmo 440-800 nm (440-1000 nm)
- Cena: 166,24 €



Obrázek 12: Graf propustnosti a odrazivosti pro LP-DM: Cut-on 425 nm

LP Dichroic Mirror: Cut-on 650 nm

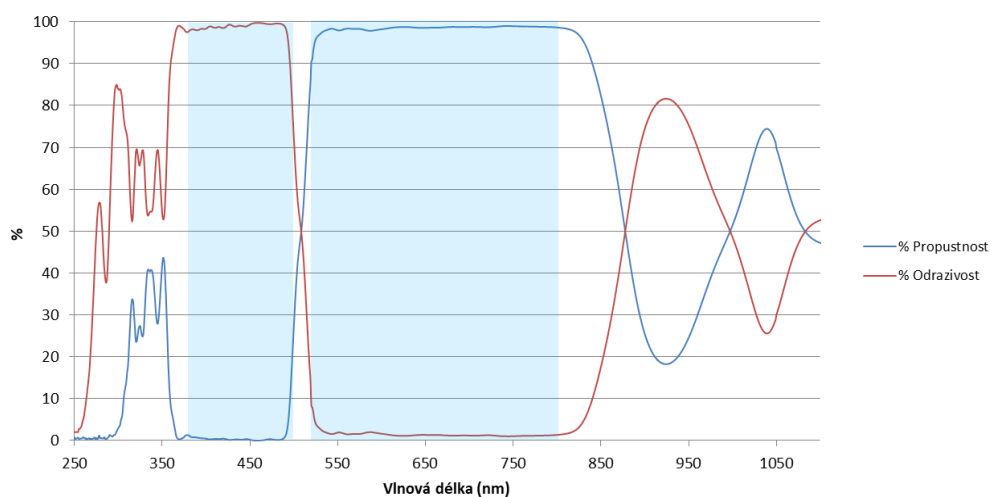
- Přenosové pásmo 685-1600 nm
- Reflexní pásmo 400-633 nm
- Cena: 256,74 €



Obrázek 13: Graf propustnosti a odrazivosti pro LP-DM: Cut-on 650 nm

LP Dichroic Mirror: Cut-on 505 nm

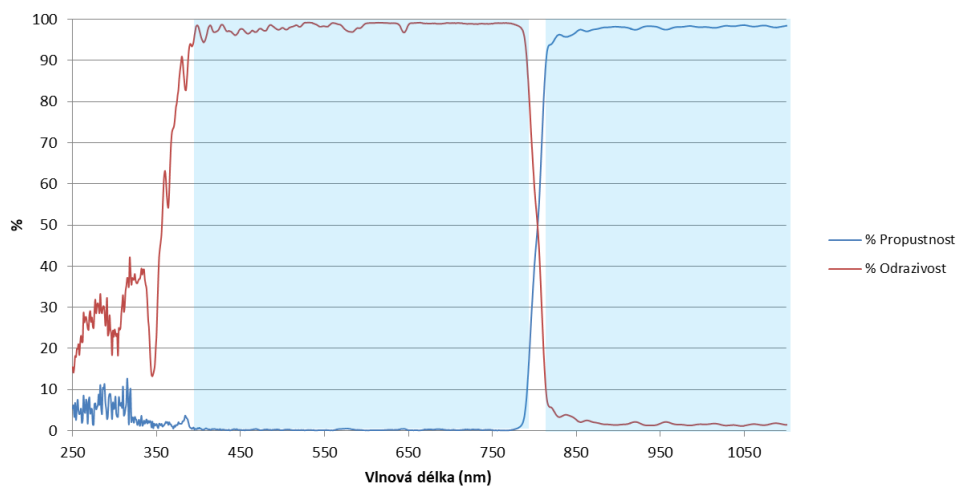
- Přenosové pásmo 520-800 nm
- Reflexní pásmo 380-490 nm
- Cena: 166,24 €



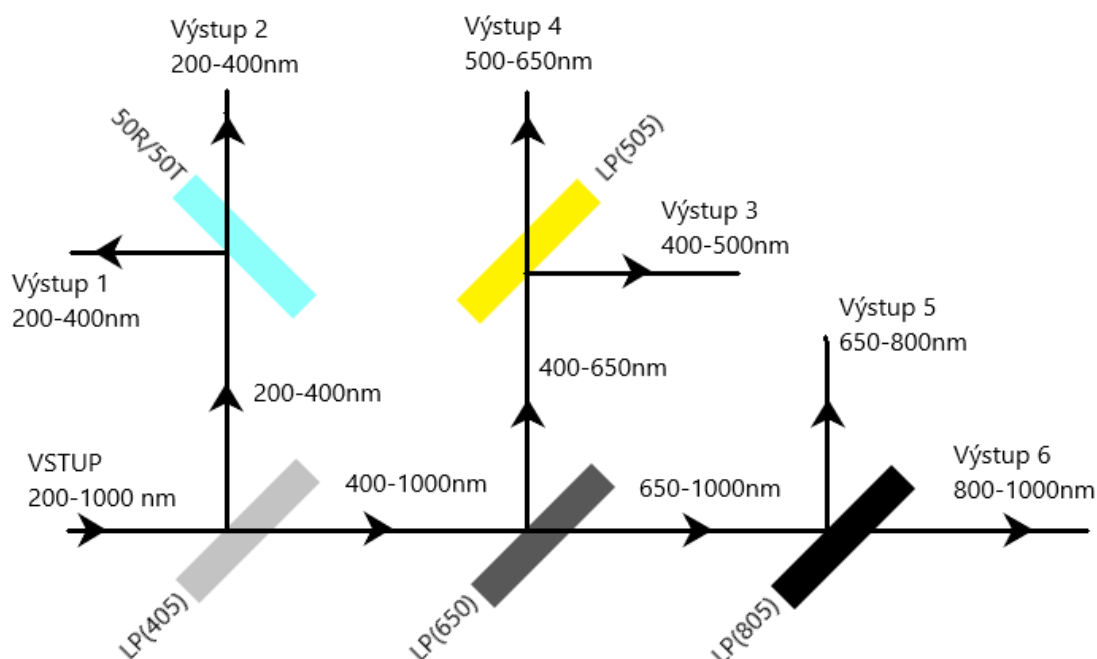
Obrázek 14: Graf propustnosti a odrazivosti pro LP-DM: Cut-on 505 nm

LP Dichroic Mirror: Cut-on 805 nm

- Přenosové pásmo 825-1300 nm
- Reflexní pásmo 400-785 nm
- Cena: 256,74 €



Obrázek 15: Graf propustnosti a odrazivosti pro LP-DM: Cut-on 805 nm



Obrázek 16: Schéma rozdělení pomocí dichroických a 50/50 zrcadel

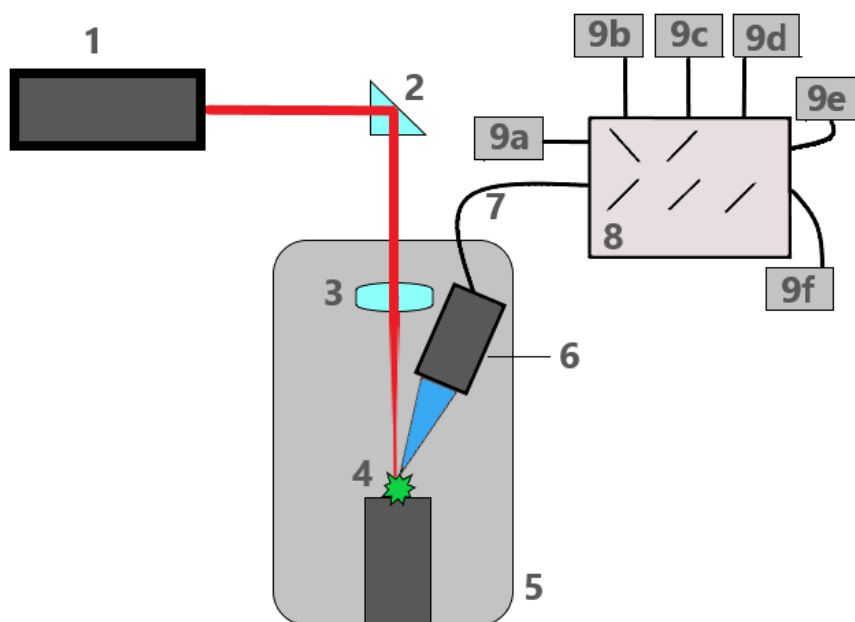
Na stránkách výrobce [14] jsou k dispozici ke stažení dokumenty, v nichž jsou uvedeny hodnoty propustnosti a odrazivosti pro jednotlivé vlnové délky ke každému z vybraných dichroických zrcadel. Z těchto hodnot jsem vypočítal v procentech celkovou intenzitu záření prošlou do jednotlivých spektrometrů pro odpovídající rozsahy vlnových délek – tab. 1.

	LP(425)	LP(650)	LP(505)	LP(805)	UV-PL 50/50	CELK.INT.
200-300 nm	27,2%	x	x	x	50%	13,6%
300-400 nm	92,8%	x	x	x	50%	46,4%
400-500 nm	73,2%	99,1%	98,1%	x	x	71,2%
500-650 nm	97,5%	98,3%	92,3%	x	x	88,5%
650-800 nm	97,6%	90,6%	x	97,2%	x	85,9%
800-1000 nm	82,6%	97,8%	x	94,9%	x	76,7%

Tabulka 1: Propustnost a odrazivost pro konkrétní rozsahy vlnových délek

Z tabulky je patrné, že pro rozsahy v UV oblasti (zejména pro 200-300 nm) by do spektrometrů doputovala velmi malá část z celkové intenzity vstupního záření. Naopak pro delší vlnové délky by ztráty nepřesahovaly 30% a celková výstupní intenzita by tak byla poměrně přijatelná. V celkovém měřítku vychází průměrná přenesená intenzita na 63,7%.

Schéma celé soustavy s použitím dichroických zrcadel by pak vypadalo následovně:



Obrázek 17: Schéma zapojení s pomocí dichroických a 50/50 zrcadel. 1) laser 2) odrazný prvek 3) fokusační optika 4) vzorek 5) komora 6) sběrná optika 7) optické vlákno 8) prostor k upevnění zrcadel 9a-9f) spektrometry

Zhodnocení

V této práci jsem představil návrhy 3 možných řešení, z nichž každé má nepochybně své pro a proti. Při návrhu jsem se zaměřil především na efektivitu, složitost konstrukce a také na finanční náklady potřebné k pořízení vhodné aparatury.

Co se týče efektivitu, nejideálnější variantou se jeví použití kolimačních čoček. Jelikož jsme schopni se dostat do ideální vzdálenosti od vzorku, dostaneme do spektrometrů vysokou intenzitu záření, a to také díky tomu, že žádný z kanálů už se nijak nedělí a vlákna vedená z komory vedou přímo do jednotlivých spektrometrů.

Ovšem ani zbylé 2 varianty nejsou v rozporu s našimi požadavky. U varianty s vláknovým děličem se nám ale velké procento intenzity v každém spektrometru zahodí, protože jsou nastaveny na omezený rozsah vlnových délek a my do každého z nich dostaneme spektrum celé.

Při použití dichroických zrcadel jsme se poté přesvědčili o tom, že je problematické detekovat velké intenzity pro UV záření. Ostatní rozsahy obstály velmi slušně.

Velké rozdíly můžeme vnímat u složitosti konstrukce. Není náhodou, že tam, kde bychom čekali nejlepší podmínky pro ideální sběr záření, bude zapotřebí také nejsložitější konstrukce. Varianta s šesti kolimačními čočkami si žádá posuvný nosič, který ponese justovatelné držáky s čočkami. K tomu je zapotřebí vyrobit složité zařízení, které bude ke všemu odpovídat rozměrům komory.

Výrazně snadnější na výrobu by byl jednoznačně vláknový dělič 1x6. Ten by se pravděpodobně musel nechat vyrobit na zakázku. Nepředpokládám, že fakt, že je relativně těžké takový dělič na trhu sehnat, není zapříčiněný složitostí výroby, ale spíše jeho méně častějším využitím.

Ani rozdělení dichroickými zrcadly se nejví jako konstrukčně náročné řešení. Naopak se zde nabízí výhoda jednoduché obměny jakýchkoliv zrcadel v případě, že by bylo potřeba nastavení spektrometrů změnit.

Odhady na náklady jsou velmi nepřesné, přesto je zde orientačně uvedu:

Vláknový dělič:

- 7x optické vlákno – $7 \times 104,26 = 729,82 \text{ €}$
- Vláknový dělič – odhad 1100 €

6 kolimačních čoček

- 6x kolimační čočka – není uvedeno

- 6x optické vlákno – $6 \times 104,26 = 625,56 \text{ €}$
- 6x kinematický držák – $6 \times 80 \text{ €} = 480 \text{ €}$
- nosič – bez odhadu

Dichroická zrcadla

- 7x optické vlákno – $7 \times 104,26 = 729,82 \text{ €}$
- LP(425) - 166,24 €
- LP(505) – 166,24 €
- LP(650) - 256,74 €
- LP(805) – 256,74 €
- 50R/50T – 120 €

Z těchto čísel vyplývá, že nejlevnější řešení (pravděpodobně dichroická zrcadla) přijde zhruba na částku 1 695 €, tj. v přepočtu přes 44 000 Kč.

Pokud bych měl určit jedno optimální řešení, pak by to bylo formou dichroických zrcadel. V žádné ze zkoumaných kategorií totiž nevzešlo jako nevhodné, příliš komplikované či finančně nevýhodné. Naopak se zdá být velmi účinné.

Literatura

- [1] Jan Kapoun. ScienceWorld 2006
<http://www.spectroscopyonline.com/timeline-atomic-spectroscopy?id=&sk=&date=&pageID=8>
- [2] Brief (incomplete) History of Light and Spectra-
<https://www.chemteam.info/Electrons/Spectrum-History.htm>
- [3] V. Thomsen. A timeline of atomic spectroscopy. Spectroscopy, 21(10), s. 32–42, 2006.
http://files.pharmtech.com/alfresco_images/pharma/2014/08/22/445b0f50-7f2e-4ec4-a2a6-48d9ae8876eb/article-380764.pdf
- [4] LENARD, P. *Velcí přírodopytci*. Přeložil F. X. Lánský. 2. české vydání. Praha: Vydavatelstvo Družstevní práce, 19-43 str.216
- [5] Fyzika mikrosvěta (str. 61, 71-72,84-85)
- [6] A. W. Miziolek, V. Palleschi a I. Schechter, eds. Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS): fundamentals and applications. Cambridge (UK) : Cambridge University Press, 2006.
- [7] D. A. Cremers a L. J. Radziemski. Handbook of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. New York (USA) : John Wiley & Sons, Ltd, 2006. (str.56,63)
- [8] Vláknoový pulsní laser <https://www.lintech.cz/produkty/laserove-technologie/laser-podle-technologie/vlaknovy-pulsni-laser/>
- [9] J. P. Singh a S. N. Thakur, eds. Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. Oxford (UK) : Elsevier B.V., 2007.
- [10] Leoš Maršálek, Optická vlákna, <http://goro.czweb.org/download/interest/vlakna.pdf>
- [11] BARTŮŠKOVÁ, DUŠEK, FIURÁŠEK, HRADIL, JEŽEK, MIČUDA, SLODIČKA. Vláknoová optika na telekomunikačních vlnových délkách. Olomouc: Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého v Olomouci, 2008.
- [12] Shanghai Optics]<https://www.shanghai-optics.com/assembly/collimating-lenses/>
https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=5591
- [13] Solarization-Resistant Multimode Fiber Optic Patch Cables: SMA-SMA
https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=5591
- [14] Longpass dichroic mirrors
https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_ID=3313
- [15] Marek Kouřil. Charakterizace vláknových děličů svazku. 2013.
- [16] 50R/50T 25 x 25mm, UV Plate Beamsplitter
<https://www.edmundoptics.com/p/50r50t-25-x-25mm-uv-plate-beamsplitter/8391/>

[17] Kinematic square optical mount <https://www.edmundoptics.com/p/125127mm-sq-kinematic-mount-2-screws/15653/>