



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

**Realizace modelu navazování
laserového svazku do optického vlákna**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vypracoval:

Mgr. Libor Úlehla

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Petr Neumann, Ph.D.

Studijní program:

N3902 Inženýrská informatika

Studijní obor:

Bezpečnostní technologie, systémy
a management

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Mgr. Libor ÚLEHLA**
Osobní číslo: **A09742**
Studijní program: **N 3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**

Téma práce: **Realizace modelu navazování laserového svazku do optického vlákna**

Zásady pro vypracování:

1. Vytvořte model navazování koherentního záření do optického vlákna (světlovodu).
2. Zpracujte fyzikální možnosti uvažovaného modelu.
3. Prakticky realizujte uvažovaný model (mimo UTB).
4. Vytvořte demonstrační materiály (prezentaci, video) uvažovaného modelu.
5. Proveďte kalkulaci pro uvažovaný model pro případnou realizaci v rámci výukových potřeb UTB.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. Vrbová, M.: **Lasery a moderní optika**, Prometheus, Praha 1994, 474 s., ISBN 80-85849-56-9.
2. Schröfel, J., Novotný, K.: **Optické vlnovody**, SNTL, Praha 1986, 231 s.
3. Saleh, B. B. H., Teich, M. C.: **Základy fotoniky 2**, MATFYZPRESS, Praha 1994, 228-436 s., ISBN 80-85863-02-2.
4. Úlehla, L.: **Navazování laserových svazků do optických vláken**, Olomouc 2006. Diplomová práce na katedře Optiky, PřF. UPOL.
5. Newport Corporation: [www.newport.com].
6. **Fiber Optic Communications Training System EF-970**, technická dokumentace firmy Promax, 2002.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Petr Neumann, Ph.D.
Ústav elektroniky a měření


Datum zadání diplomové práce:

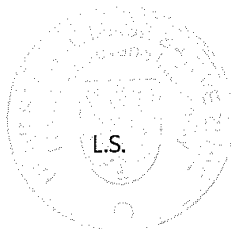
25. února 2011

Termín odevzdání diplomové práce:

27. května 2011

Ve Zlíně dne 25. února 2011


prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan




doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.
veditel ústavu

ABSTRAKT

Idea této diplomové práce vznikla za účelem přiblížit proces navazování záření do optických vláken. Tedy proces fyzikálních principů, které jsou obvykle skryty v miniaturizovaných komponentách pro navazování záření. V rámci práce je tedy vytvořen model, který poskytne názornou ukázkou procesu navazování záření do optických vláken. Tento model bude prakticky realizován, aby ukázal svoji variabilitu a názornost. Na závěr bude také vytvořena kalkulace pro představu o náročnosti k případné realizaci v rámci UTB.

Klíčová slova:

Optická vlákna, lasery, navazování do vláken, fokusace, propustnost, polarizace

ABSTRACT

The idea of the thesis was created to comprehend a process of the optical fibers coupling. Means the process of physical principles, which are usually hidden in miniaturized components for coupling of the radiation. There is a model build up in the thesis, which affords an illustrative example of the process of the radiation coupling into the optical fibers. Created model is practically realised to demonstrate its variability and objectivity. Afterwords the calculation of the model is created to imagine the financial performance for prospective realisation at the UTB.

Keywords:

Optical fibers, lasers, fiber coupling, focusation, transmittion, polarisation

Děkuji svému vedoucímu Ing. Petrovi Neumannovi Ph.D. za odborné vedení diplomové práce a vstřícný přístup při její kompletaci.

Také děkuji své manželce Mgr. Janě Úlehlové za podnětné rady.

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užit své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve

.....

Zlíně

podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 LASERY	12
2 OPTICKÁ VLÁKNA	16
3 FYZIKÁLNÍ PRINCIPY	20
3.1 LASEROVÉ SVAZKY	20
3.2 PROPUSTNOST, POLARIZACE	22
II PRAKTICKÁ ČÁST	26
4 NÁVRH MODELU NAVAHOVÁNÍ	27
4.1 OBECNÁ MYŠLENKA MODELU NAVAHOVÁNÍ VÝKONU DO OPTICKÉHO VLÁKNA	27
4.2 VARIACE MODELU	28
4.2.1 Model pro navazování výkonu do vlákna	28
4.2.2 Model pro studium propustnosti	28
4.2.3 Model pro studium polarizace	29
4.3 ROZVAHA NAD JEDNOTLIVÝMI SESTAVAMI MODELU	32
4.3.1 Sestava laseru	32
4.3.2 Sestava fokusační čočky	35
4.3.3 Sestava optického vlákna	36
4.3.4 Sestava výstupu optického vlákna	37
4.3.5 Ostatní sestavy a prvky modelu	38
5 REALIZACE MODELU	41
5.1 REALIZACE 532NM	41
5.1.1 Popis komponent	42
5.1.2 Varianty realizovaného modelu	45
5.2 REALIZACE V DUV	51
5.3 DISKUSE NAD REALIZACÍ	52
6 KALKULACE	54
6.1 SESTAVA LASEROVÉHO MODULU	55
6.2 SESTAVA FOKUSAČNÍ ČOČKY	59
6.3 SESTAVA OPTICKÉHO VLÁKNA	61
6.4 SESTAVA VÝSTUPU OPTICKÉHO VLÁKNA	62
6.5 SESTAVA ZÁKLADNÍ DESKY MODELU	65
6.6 BILANCE NAD CENOU	66
ZÁVĚR	67

CONCLUSION.....	68
SEZNAM ZKRATEK	69
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	70
PŘÍLOHA P I: KOMPLETNÍ KUSOVNÍK KALKULACE.....	71

ÚVOD

Oblast komunikací se v posledních letech až desetiletích setkala s výrazným rozvojem. Tento rozvoj je podmíněn čím dál větším rozmachem techniky a technologií a jejich nároků. Ruku v ruce s rozvojem technologií jde i miniaturizace technických prvků a to za zřejmým účelem, tedy získat co nejvyšší přenosové (úschovné) kapacity na co nejmenším prostoru. A právě tato miniaturizace přináší problém, kdy si již lidé nedokáží plnohodnotně představit, co se skrývá „pod pokličkou“ většiny přístrojů, které dnes každodenně využíváme. Uvnitř všech těchto přístrojů probíhá obrovské množství fyzikálních procesů, které již bereme jako jev samozřejmý. A právě oblast telekomunikací je jedním z těchto příkladů. Tento proces miniaturizace zde můžeme vidět na příkladu optických vláken, navazovacích komponent a celkově pak elektroniky pro podporu přenosu.

Otázka položená při úvaze nad touto diplomovou prací byla, v jaké míře si dokáže student v dnešní době představit právě proces navázání energie do optického vlákna. Zdali si dokáže představit podstatu navazování z pohledu samotného zařízení.

Právě s cílem osvětlit tento proces vznikla idea této práce, a to vytvořit model (sestavu, pracoviště) pro navazování energie do optického vlákna. Na tomto modelu demonstrovat způsoby navazování a také možné příčiny nedokonalého navazování (závislost na úhlu dopadu, nerespektování numerické apertury, ztráty vzniklé ohybem vlákna, atd.). Dále také promyslet a realizovat další možné úkoly související s tímto tématem.

Cílem této práce je poskytnout náhled do procesu navazování zařízení do optických vláken. Poskytnout teoretický podklad pro pochopení procesů při navazování, demonstrovat a vizualizovat samotné navazování. Tohoto chceme dosáhnout navržením a realizováním modelu pro navazování laserových svazků do optických vláken. Právě realizace modelu má demonstrovat a doporučit možnost vytvoření takovéto sestavy pro využití nejen jako výukových prostředků pro předměty zahrnující problematiku komunikací, ale také jako základ pro samostatné experimentální pracoviště v rámci UTB. Vytvoření takového pracoviště bude v této práci podpořeno cenovou kalkulací pro realizaci modelu.

Teoretická část práce, tedy první tři kapitoly se zabývají teoretickým podkladem fyzikálních principů. V první kapitole se jedná o úvod do problematiky laserů. Rozebereme si, co to laser znamená a jak pracuje a ukážeme si rozdělení laserů do skupin dle různých charakteristik. Ve druhé kapitole poskytneme úvod do problematiky optických vláken, co to optická vlákna jsou a jaké typy používáme. Kapitola třetí se zabývá fyzikálními principy,

kteřé budou hrát důležitou roli v našem modelu. Popíšeme si chování koherentního laserového zářeni a uvedeme si některé fyzikální principy, jako nejdůležitější vlastnost polarizace světla.

V kapitole 4 si rozebereme myšlenku modelu navazování laserového zářeni do optických vláken, navrhne me tento model a rozebereme variace, které nám navržený model umožní.

V kapitole 5 se budeme zabývat praktickou realizací navrženého modelu. V kapitole 6 provedeme kalkulaci, aby bylo dosaženo představy o finanční náročnosti uvažovaného modelu a jeho případné realizace v rámci UTB.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 LASERY

Základem našeho modelu je záření, které bude procházet jednotlivými sestavami. Proto musíme uvážit jaký zdroj záření bude pro naše potřeby nejvhodnější.

Zdroje optického záření jsou objekty, v nichž dochází k přeměně různých forem energie na energii elektromagnetického záření v optické oblasti elektromagnetického spektra. Existují přirozené i umělé zdroje záření. Mezi přirozené patří Slunce, hvězdy, atmosferické výboje a luminiscenční objekty rostlinného nebo živočišného původu. Umělé zdroje se dělí na tepelné (plameny, žárovky, zářiče s tepelným ohřevem, modely absolutně černého tělesa) a luminiscenční (luminofory, luminiscenční diody). Podle vlastností emitovaného záření se dělí na koherentní (lasery) a nekoherentní (spontánní záření s chaoticky měnící se fází) [1].

Jak ze zkušenosti, tak i z hlediska nutnosti modifikace záření, dojdeme rychle k závěru, že nejvhodnější pro využití v oboru informačních technologií je monochromatické a koherentní záření generované lasery. Právě vlastnost koherence, tedy schopnost záření vykazovat stejné vlastnosti napříč prostorem (prostorová koherence) a časem (časová koherence), umožňuje modifikovat toto záření tak, aby vykazovalo a zachovávalo námi požadované vlastnosti. Monochromaticnost zaručuje, že laserové záření je generováno dominantně právě na jedné vlnové délce elektromagnetického spektra.

Laser je optický oscilátor. Skládá se z rezonančního optického zesilovače, jehož výstupní signál se vrací zpětnou vazbou sfázovaný znovu do vstupu. Pokud na vstupu není žádný signál, není ani výstupní signál, takže i signál zpětné vazby je nulový. Takový stav je však nestabilní. Sebenepatrnější šum (s frekvenčními složkami spadajícími do frekvenčního pásma zesilovače), který nevyhnutelně vždy existuje, může na vstupu iniciovat proces oscilací. Vstupní signál je zesílený a z výstupu je vedený zpět na vstup, načež je znovu zesilován. Tento proces se neustále opakuje, až vznikne velký výstupní signál. Zvětšování signálu je omezeno saturací zisku zesilovače a systém dosahuje ustáleného stavu, ve kterém na rezonanční frekvenci zesilovače vzniká výstupní signál. Aby nastaly oscilace, musí být splněny dvě podmínky:

- Zisk zesilovače musí být větší než ztráty systému zpětné vazby, takže při jednom oběhu smyčkou se zpětnou vazbou se dosahuje čistého zisku.
- Celková změna fáze při jednom oběhu musí být celočíselným násobkem 2π , takže signál zpětné vazby je sfázovaný s původním vstupním signálem.

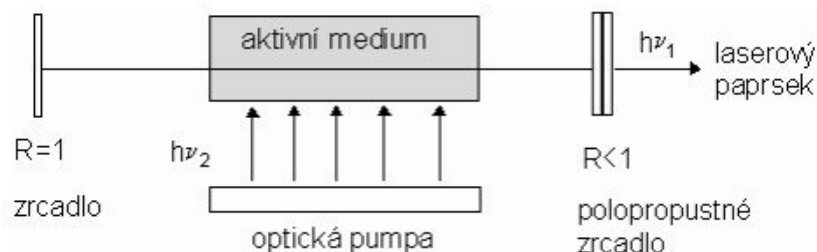
Jsou-li tyto dvě podmínky splněné, systém se stává nestabilním a začíná oscilovat. S rostoucím výkonem oscilací se začne uplatňovat saturace zesilovače a zisk klesne pod svoji počáteční hodnotu. Stabilních podmínek je dosaženo při poklesu zisku na hodnotu ztrát. Zisk právě kompenzuje ztráty, takže cyklus zesílení a zpětné vazby se beze změny opakuje a ustaví se stacionární oscilace.

Protože zisk i změna fáze jsou funkcemi frekvence, jsou obě podmínky pro nasazení oscilací splněné pouze pro jednu, nebo několik frekvencí, které se nazývají rezonančními frekvencemi oscilátoru.

Oscilátor jako celek se skládá z následujících částí:

- Ze zesilovače s mechanismem saturace zesílení
- Ze systému zpětné vazby
- Z mechanismu frekvenční selekce
- Ze zařízení pro vyvedení výstupního signálu

Laser je optický oscilátor, jehož zesilovačem je čerpané aktivní prostředí. Saturace zisku je základní vlastností laserových zesilovačů. Zpětná vazba je zajištěna umístěním aktivního prostředí do optického rezonátoru, ve kterém dochází k odrazům mezi zrcadly. Frekvenční selekce je dosaženo rezonančním zesilovačem a také rezonátorem, který připouští pouze určité módy. Vyvedení výstupního záření z rezonátoru je zajištěné tím, že jedno ze zrcadel rezonátoru je částečně propustné (viz. Obrázek 1) [2].



Obrázek 1: Schéma laseru [<http://www.jergym.hiedu.cz/~canovm/barva/a/f.html>]

Jako aktivní prostředí se užívá mnoho různých materiálů v různých skupenstvích. Podle toho dělíme lasery na pevnolátkové, plynové, kapalinové a plasmové. Aktivní prostředí je možno vytvořit také prostřednictvím elektronů v magnetickém poli, jak je tomu v případě laserů s volnými elektrony.

Pevnolátkové lasery jsou takové, jejichž aktivním prostředím je pevná látka, většinou ve formě krystalu. Prvním pevnolátkovým laserem byl rubínový laser. Ze složitějších krystalů jsou pak obvyklé pro užití Nd^{3+} :YAG, Nd^{3+} :sklo, Nd^{3+} :YLF, aj. Zvláštní, avšak velmi rozšířenou skupinou pevnolátkových laserů jsou polovodičové lasery. S těmito typy laserů se všichni z nás setkáváme v každodenním životě.

Plynové lasery mají aktivní prostředí ve formě atomů, iontů, molekul či excimerů. K nejpoužívanějším plynovým laserům patří atomární He-Ne laser zářící na vlnové délce 632,8nm (a také méně užívané 1,15 μm či 3,39 μm). Dále molekulární CO_2 lasery (10,6 μm , 9,6 μm), dusíkové lasery, nebo excimerové lasery s aktivní látkou se vzácnými plyny.

Kapalinové lasery sestávají z aktivního prostředí s organickými i anorganickými roztoky. Tyto lasery zatím nejsou výrazně využívány. Tabulka některých typických laserů je na obrázku 2.

Aktivní prostř.	Vlnová délka (nm)	Poznámka
argon - fluor	193	UV, excimer
krypton - fluor	248	UV, excimer
xenon - chlor	308	UV, excimer
helium - kadmium	325, 442	UV, viditelné
argon	488, 514	viditelné
rubín	694	viditelné
Nd:YAG	532, 1064	viditelné, IČ
helium - neon	543, 594, 612, 633, 1150, 3390	viditelné, IČ
polovodičové diody	630 - 1600	viditelné, IČ
erbium	1540	IČ
oxid uhličitý	9600, 10600	IČ

Obrázek 2: Vybrané typy laserů a jejich vlastnosti

[<http://www.cez.cz/ede/content/microsites/laser/f4.htm>]

Aby mohl vzniknout proces inverze populace a následně tedy proces laserování a také, aby bylo možné udržovat kmity v rezonátoru, je nutno do rezonátoru laseru dodávat energii. Tomuto procesu říkáme buzení, nebo také čerpání laseru. Při tomto procesu je částicím v systému předávána energie v elementárních procesech rezonanční absorpce, nepružného rozptylu, chemické reakce apod. Buzení lze tedy chápat jako proces přeměny různých forem energie na excitační energii některých částic látky. V závislosti na druhu dodávané energie rozlišujeme buzení optické, elektrické, chemické aj. K optickému čerpání se řadí buzení zářením výbojek, Slunce nebo jiného laseru. Tento typ čerpání je hojně

vyžíván u pevnolátkových laserů. Elektrické čerpání se uplatňuje především u plynových a polovodičových laserů. Chemické buzení je již méně časté, avšak energeticky velmi výhodné, získává se při něm energie uvolněná v důsledku změny chemických vazeb [3].

U laserů dále rozlišujeme režim jeho vyzářování. Lasery takto řadíme do dvou skupin, lasery kontinuální a lasery pulsní. Kontinuální laser vyzářuje dle uspořádání na obrázku 1. Polopropustným zrcadlem vychází z rezonátoru laseru konstantní výkon záření.

Nejprostším způsobem, jak získat impulsy záření z laseru, je použití kontinuálního (cw) laseru a externí uzávěrky nebo modulátoru, který propustí záření pouze během požadovaného krátkého časového intervalu. Tato metoda je nevýhodná, neboť má nízkou účinnost a také její špičkový výkon pulsů nemůže přesáhnout hodnotu stálého výkonu kontinuálního zdroje. Účinnější metodou získávání pulsů je zapínání a vypínání samotného laseru vnitřní modulací, takže energie nashromážděná v době mezi pulsy je vyzářena během pulsu. Energie se může hromadit buďto v rezonátoru ve formě světla, které je periodicky vypouštěno ven, nebo v atomárním systému ve formě inverzního obsazení a energie se periodicky uvolňuje, když systém může oscilovat. Tyto metody umožňují generovat krátké laserové pulsy se špičkovým výkonem větším než je konstantní výkon kontinuálních laserů [2].

Jak bylo zmíněno v začátku této kapitoly, laserový zdroj záření bude vybrán také pro náš model pro navazování elektromagnetického záření do optických vláken.

2 OPTICKÁ VLÁKNA

Optické vlákno je válcovým dielektrickým vlnovodem zhotoveným z nízkoztrátového materiálu, například z křemenného skla. Je tvořeno vnitřním jádrem, sloužícím k vedení přenášeného výkonu. Jádro je uloženo ve vnějším obalu - plášti vlákna. Optická vlákna mají extrémně nízké ztráty přenášeného výkonu vedeného optického záření. Příkladem těchto nízkých ztrát může být skleněné vlákno o délce 1km o útlumu přibližně 0,16dB, což odpovídá ztrátě asi 3,6% celkového přenášeného výkonu. Optická vlákna tak nahrazují měděné koaxiální kabely. Využití optických vláken způsobilo převrat v pozemních komunikačních systémech. Nacházejí široké uplatnění od dálkových telefonních a datových komunikací až po místní počítačové sítě.

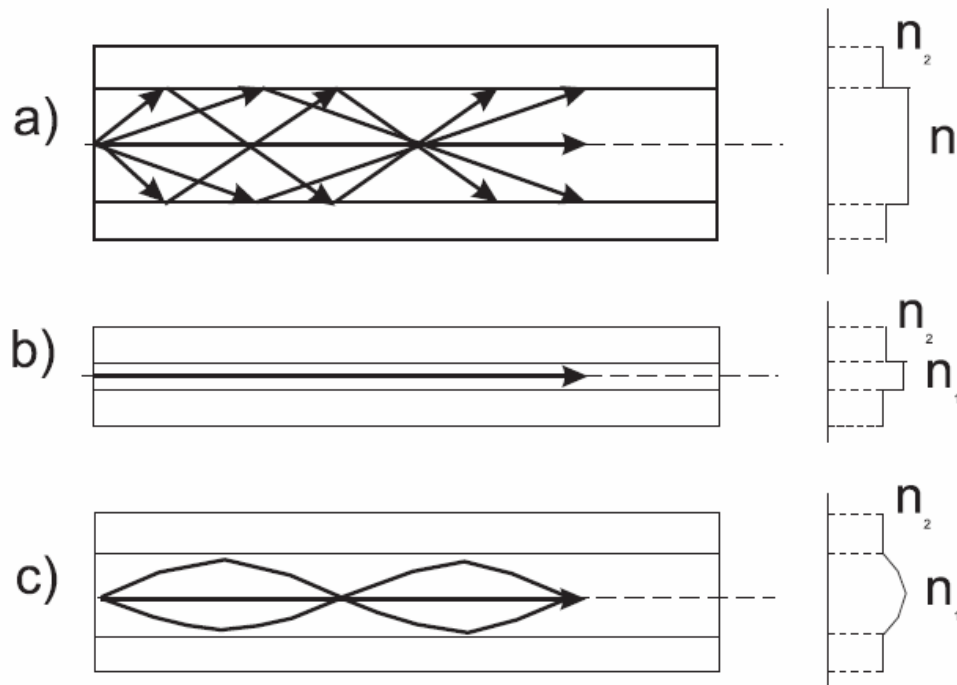
Optická vlákna můžeme rozdělit podle rozložení indexu lomu do dvou kategorií, na vlákna se skokovou změnou indexu lomu a na vlákna s gradientní změnou indexu lomu. Vlákna se skokovou změnou indexu lomu mají jádro a obal odlišného indexu lomu, jehož rozložení se pro jádro ani obal v různých místech nemění. Hodnoty indexu lomu jádra n_1 a obalu n_2 se od sebe liší jen velmi málo, typicky až v tisícinách jejich hodnoty. Pro relativní změnu indexu lomu $\delta = (n_1 - n_2) / n_1$ tedy platí $\delta \ll 1$. Pro jádro vlákna a plášť vlákna platí typické poměry poloměrů jádra a a obalu o . $2a [\mu\text{m}] / 2o [\mu\text{m}]$. např. 8/125, 50/125, 85/125, 100/140.

Gradientní optická vlákna mají jádro s proměnným indexem lomu, největší v ose, který postupně směrem k plášti klesá až na hodnotu indexu lomu pláště. Fázová rychlost šíření je tedy na ose nejmenší a s radiální vzdáleností postupně roste. Paprsky modů přimykající se nejvíce k ose se pohybují po nejkratších trajektoriích s nejmenší fázovou rychlostí. Paprsky modů svírající větší úhly s osou vlákna urazí větší vzdálenost, ale převážně v prostředí s vyšší fázovou rychlostí. V důsledku toho lze očekávat zmenšení rozdílů mezi grupovými rychlostmi jednotlivých modů a jejich dobami průchodu vláknem.

Při dané frekvenci se ve vláknovém vlnovodu může šířit jen konečný počet různých typů elektromagnetických vln, které se od sebe liší geometrií pole. Těmto jednotlivým modifikacím vln, které mohou při splnění určitých podmínek samostatně existovat, říkáme mody.

Je-li poloměr vlákna dostatečně malý, může se jím šířit jen jediný mod a hovoříme o tzv. jednomodovém vlákně. Vlákna s větším průměrem nazýváme mnohamodová. U vláken jednomodových se jedná o rozměry jednotek mikrometrů, u mnohamodových se může

jednat o desítky až stovky mikrometrů. Jednomodový režim tak vyžaduje vlákno s malým poloměrem jádra vlákna a s malou hodnotou numerické apertury $NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ nebo dostatečně velkou vlnovou délkou. Zvonovité příčné rozložení základního modu je podobné Gaussovskému profilu. Výkon přenášený tímto modem je současně maximálně soustředěn do jádra vlákna. Mody mnohamodových vláken mají různé grupové rychlosti šíření a tedy rozdílné doby průchodu. Krátký časový impuls, jehož výkon je na vstupu vlákna přibližně rovnoměrně rozložen mezi jednotlivé mody, je po průchodu časově roztažen. Tento jev nazýváme modová disperze. V jednomodovém vlákne, kterým se může šířit pouze jediný mod s jedinou grupovou rychlostí, k modové disperzi nedochází. Nicméně v něm existují jiné příčiny časového rozšíření přenášeného impulsu, jejich vliv je však ve srovnání s modovou disperzí podstatně menší. Menší koeficient útlumu společně s menší disperzí přenášeného signálu vede v jednomodových vláknech ve srovnání s mnohamodovými k podstatně vyšší přenosové kapacitě [6].



Obrázek 3: Druhy optických vláken: a) multimodové; b) jednomodové; c) gradientní [Úleha, 2006]

Další nevýhodou mnohamodových vláken je náhodná interference jednotlivých modů. V důsledku nekontrolovatelných nedokonalostí reálného vlákna, působením mechanického napětí a v důsledku změn teploty dochází k náhodným posunutím fáze modů, takže výsledná

komplexní amplituda daná superpozicí jednotlivých modů povede k výsledné intenzitě, která bude také náhodnou veličinou. Výsledkem uvedených nedokonalostí je druh šumu označovaný jako modový šum, nebo také koherenční zrnitost (speckle). Tento jev je analogický úniku elektromagnetických vln v rádiové oblasti spektra, který je způsoben superpozicí vln prošlých různými drahami. Vzhledem k malým rozměrům jádra a nízké hodnotě numerické apertury jsou jednomodová vlákna kompatibilnější s technologií integrované optiky. Tyto vlastnosti však na druhou stranu komplikují jejich výrobu a optickou justáž při práci s nimi. Mají menší dovolené tolerance, což při jejich sesazování či spojování konektory a při navazování záření do vlákna klade náročné požadavky na přesnost optických a mechanických prací.

Z pohledu paprskové optiky je základním pojmem pro vhodné šíření optického záření ve vláknech pojem totálního odrazu. Pomocí totálního odrazu se může záření šířit s minimálními ztrátami. Řídí se znalostí mezního neboli kritického úhlu. Paprsky dopadající pod úhlem menším než je kritický úhel se částečně lámou do prostředí pláště a vznikají tak velké ztráty. Paprsky, které mají být vedeny vláknem, dopadají na rozhraní jádra a pláště a musí pro ně platit podmínka $\Theta > \Theta_C$, kde Θ je úhel dopadajícího paprsku a Θ_C je kritický úhel, jak ukazuje obrázek 4. Kritický úhel je definován vztahem

$$\Theta_C = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$$

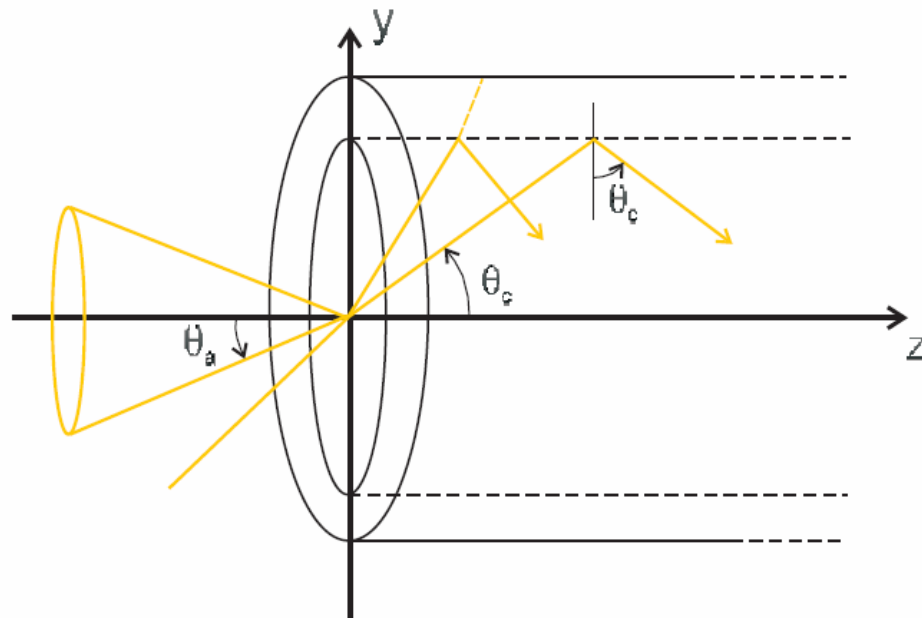
Doplňkový úhel Θ_D je dán

$$\Theta_D = \arccos \frac{n_2}{n_1}$$

Použitím Snellova zákona pro rozhraní vzduch - jádro vlákna můžeme vyjádřit vztah mezi vstupním úhlem Θ_A , ve vzduchu a doplňkovým úhlem totální reflexe Θ_D , v optickém vlákně

$$\Theta_A = \arcsin \sqrt{n_1^2 (1 - \cos^2 \Theta_D)} = \arcsin \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \arcsin NA$$

kde jsme využili substituce $NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$, kde NA je již dříve zmíněná numerická apertura. Paprsky dopadající pod větším úhlem než Θ_A se sice dostávají do optického vlákna, ale jsou vedeny pouze po krátkou vzdálenost a nemají tak budoucnost z hlediska přenosu [4]. Získání vstupního úhlu Θ_A můžeme najít na obrázku 4.



Obrázek 4: Čelo optického vlákna [Úlehla, 2006]

Specifickým typem optických vláken jsou optická vlákna označovaná jako světlovody. Světlovody mají výrazně větší průměr jádra a to až v řádu desetin až jednotek milimetrů. Slouží většinou pro přenos světelného záření ze zdroje na předmět, tedy k osvětlovacím účelům a to na krátké vzdálenosti maximálně několika metrů. Někdy se užívají též pro přenos obrazu na krátké vzdálenosti a to například v lékařství nebo zobrazovací technice.

Právě světlovodů bude v našem modelu využito pro navazování a přenos záření, neboť právě světlovody umožňují větší názornost svým větším průměrem vlákna.

3 FYZIKÁLNÍ PRINCIPY

V předchozích dvou kapitolách jsme si vysvětlili oblast zdrojů záření a optických vláken. Nastínili jsme výběr zdroje záření pro náš model i pro naše účely vhodný typ optického vlákna. Celkově jsme si nastínili podtext složitějších a stěžejních materiálových komponent pro náš model. Nyní je dobré zastavit se lehce nad některými fyzikálními procesy, které budou pro náš model typické.

Laser produkuje laserové záření pohybující se ve formě laserových svazků, které vykazují vysokou směrovost a další charakteristické znaky a chování. V následující kapitole se tedy zmíníme o chování laserových svazků.

V kapitole následující osvětlíme fyzikální principy, které budou pro náš model stěžejními a typickými, jako jsou propustnost, polarizace aj.

3.1 Laserové svazky

Laserové svazky jsou světelnými vlnami ve formě paraxiálních optických svazků. Jde o vlny, jejichž normály k vlnoploše svírají malý úhel s osou šíření. Musejí splňovat tzv. paraxiální Helmholtzovu rovnici. Důležitým řešením této rovnice je vlna nazývaná Gaussovský svazek, popř. další svazky splňující paraxiální Helmholtzovu rovnici, Hermite-Gaussovské, Laguerre-Gaussovské, nebo Besselovské svazky, jejichž limitním případem je však opět svazek Gaussovský [4].

Gaussovský svazek je takový, jehož rozložení energie odpovídá gaussovskému rozložení hustoty. Gaussovský svazek je primárně vyjádřen komplexní amplitudou ve tvaru odpovídajícím harmonickým vlnám $U(\varphi) = A(\varphi) \exp(-i k z)$. Vyjádření samotné komplexní amplitudy by bylo náročné a pro čtenáře ne příliš zajímavé. Nicméně uvážíme-li, že intenzita je určena jako kvadrát komplexní obálky gaussovského svazku, pak můžeme vyjádřit gaussovský svazek právě jeho intenzitou, což nám pro zřejmý popis jeho charakteristiky a chování může postačit (kvadrát z komplexní obálky nám z obálky vypustí komplexní část výrazu, která slouží jako fázový člen a ponechá nám reálnou část, kterou umocní). Intenzitu gaussovského svazku můžeme tedy vyjádřit jako

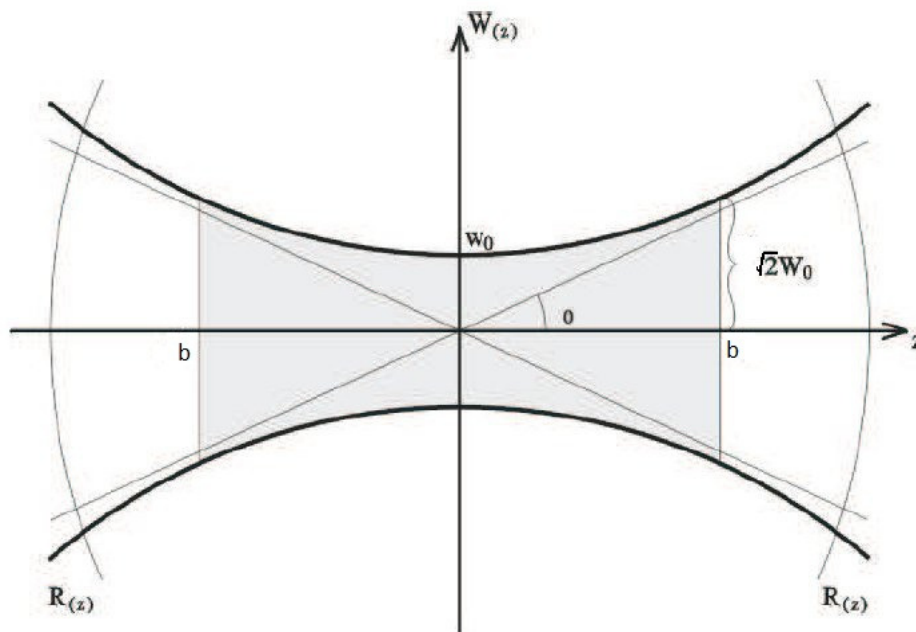
$$I(x, y, z) = I_0 \left[\frac{W_0}{W_{(z)}} \right]^2 \exp \left[\frac{-2(x^2 + y^2)}{W_{(z)}^2} \right]$$

kde I_0 je konstantou, $W_{(z)}$ je tzv. pološířka nebo poloměr svazku, který je dán výrazem

$$W(z) = W_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{b}\right)^2}$$

Zde W_0 je pas nebo střed svazku, tedy šířka svazku v $z=0$. Hodnota pasu svazku je úměrná vlnové délce generovaného záření. Parametr W_0 závisí dále také na rozbíhavosti svazku. Ve výrazu se dále vyskytuje parametr b , což je tzv. Rayleighova vzdálenost, tedy místo, kde velikost svazku odpovídá $\sqrt{2} W_0$.

Nejlépe nám parametry svazku osvětlí následující obrázek 5.



Obrázek 5: Parametry laserového svazku [Úlehla, 2006]

Zde můžeme vidět laserový svazek, kde si můžeme pas svazku představit jako výstup laseru, nebo jako rovinu fokusace čočky. Můžeme tak na obrázku vidět jeho rozbíhavost se vzdáleností z od pasu svazku. Tučněji je pak vyplněna oblast po Rayleighovu vzdálenost. V obrázku je dále zanesen parametr $R(z)$, určující zakřivení vlnoplochy v bodě z .

Uvnitř kružnice o poloměru $W(z)$ je přenášeno přibližně 86% celkového výkonu. Kruhem o poloměru $1,5W(z)$ se šíří asi 99% výkonu. K úplnému popisu Gaussovského svazku potřebujeme znát maximální amplitudu A_0 (reps. $I_0 = |A_0|^2$), směr šíření (tj. osa svazku) a dále polohu středu svazku a jeden z následujících parametrů: středová šířka svazku W_0 nebo např. Rayleighovu vzdálenost [4].

Gaussovské svazky hrají velmi důležitou roli v laserové fyzice, neboť ve většině případů lze záření vystupující z laseru popsat právě jako Gaussovské svazky. I my budeme při výběru zdroje záření dbát na to, aby laserové záření mělo profil Gaussovského svazku.

3.2 Propustnost, polarizace

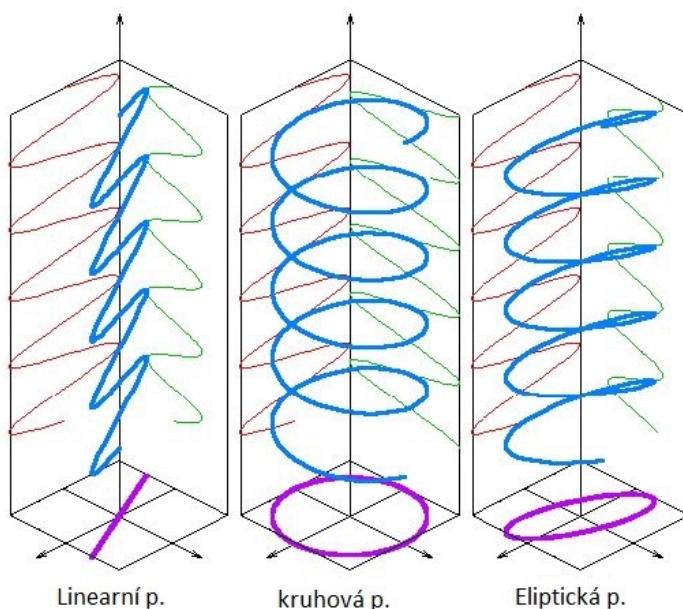
Fyzikálním principem, který budeme v našem modelu využívat je propustnost světla (transmitance) optickými komponentami [3]. Jedná se o veličinu vyjadřující míru schopnosti tělesa propouštět optické záření. Propustnost T je definována jako poměr výkonu P_{TR} prošlého tělesem a výkonu P_0 záření dopadajícího na těleso, tedy

$$T = \frac{P_{TR}}{P_0}$$

Propustnost závisí jak na vlastnostech optického záření, tak na materiálových a geometrických parametrech prostředí. Propustnost je většinou udávána v procentech. Propustnost soustavy komponent můžeme získat jako součin propustností jednotlivých komponent.

Jednou z vlastností optického záření, která ovlivňuje propustnost prostředí, je nesporně polarizace světla. Polarizace světla popisuje příčnou anizotropii světelných vln, tj. neekvivalentnost různých směrů v rovině kolmé ke směru šíření. Elektromagnetické vlnění je příčné, což znamená, že vektory E (elektrická složka intenzity elektromagnetického vlnění) a H (magnetická složka intenzity elektromagnetického vlnění) jsou kolmé na směr šíření a zároveň kolmé sobě navzájem. Světlo nazýváme nepolarizovaným (přirozeně polarizovaným), jestliže vektory E a H chaoticky (nahodile) mění svou orientaci. Typickými zdroji nepolarizovaného záření je například Slunce nebo žárovka. Světlo nazýváme polarizovaným, jestliže koncový bod vektoru E opisuje uzavřenou křivku. Rovinu, ve které leží vektor E a vektor směru šíření paprsku nazýváme rovinou polarizace. Vektor E polarizovaného světla opisuje v nejobecnějším případě elipsu. Takové záření nazýváme elipticky polarizovaným. Změní-li se elipsa v kružnici, jedná se o světlo kruhově polarizované. U elipticky a kruhově polarizovaného záření rozlišujeme dále smysl otáčení vektoru E a rozlišujeme tak dle směru rotace pravotočivou nebo levotočivou polarizaci. Světlo je pravotočivě polarizováno, otáčí-li se vektor E ve smyslu hodinových ručiček a levotočivě polarizováno, otáčí-li se proti směru hodinových ručiček. Pozorování přitom provádíme ve směru opačném ke směru šíření světla.

Dojde-li k degradaci elipsy na přímku, mluvíme o lineárně polarizovaném světle. U lineárně polarizovaného záření rozlišujeme roviny, ve které je záření polarizováno. Dostáváme horizontální a vertikální polarizaci. Tyto polarizace často označujeme jako s a p složky polarizace. Identifikace složek s a p však není jednoduchá, neboť závisí na šíření a interakci s komponentami sestavy. Při horizontálním šíření záření se však dá označit horizontální orientaci vektoru E za polarizaci p a vertikální orientace vektoru E za s složku polarizace. Neboť budeme v našem modelu pracovat s horizontálním směrem šíření a nebude použito zrcadel a jiných prvků, které by mohly orientaci změnit, bude orientace složek polarizace následovat výše popsanou identifikaci.



Obrázek 6: Typy polarizace záření [<http://www.classle.net/bookpage/polarisation-1>]

Z celkového pohledu však není stěžejní, která složka odpovídá horizontální a která vertikální polarizaci, důležité je, že tyto složky jsou na sebe kolmé a odpovídají zmíněným dvěma rovinám. Za tohoto stavu jsme schopni určovat rozložení polarizace do obou os. Podle předchozího můžeme tedy definovat, že složku s identifikujeme v kružnici jako 0° a složku p jako 90° . Obecně platí, že polarizaci v jakoli orientované ose (kolmé k ose šíření) můžeme rozložit na poměr složek s a p a definovat poměr mezi těmito složkami. Bude-li postupující záření lineárně polarizováno a to v hodnotě 45° , rozložení do složek s a p nám dá poměr roven 1. Čím blíže se dostáváme k některé ze složek polarizace, poměrná hodnota nabývá vyšší a vyšší hodnoty. Tento poměr (ne však v amplitudách, ale v intenzitní rovině)

označujeme jako extinkční poměr (ER- extinction ratio) a určuje nám míru polarizace záření. Čím vyšší je tento poměr, tím lépe nám polarizačně senzitivní prvky polarizují, resp. tím méně nám polarizačně nesenzitivní prvky depolarizují.

V praxi se vlastností polarizace hojně využívá například v litografii a to při výrobě a kontrole polovodičových prvků, nebo v oboru kryptografie.

Polarizaci obvykle popisujeme pomocí polarizační elipsy, zejména podle směru její hlavní poloosy a excentricity. Běžně se popisuje pomocí úhlu mezi hlavní poloosou a osou x a poměru délky poloos. Toto se užívá při geometrickém popisu polarizace, který má jen omezené využití.

Polarizaci však můžeme popsat také maticově, což může být výhodné pro transformaci záření skrz optické prvky. Celkovou informaci o stavu polarizace získáme pomocí amplitud a fáze ortogonálních složek vektoru elektrického pole v rovině polarizace, jak bylo použito výše. Informace o amplitudě a fázi bývají reprezentovány pomocí dvojdimenzionálního komplexního vektoru zvaného Jonesův vektor.

$$J = \begin{pmatrix} A_1 e^{i\varphi_1} \\ A_2 e^{i\varphi_2} \end{pmatrix}$$

Například pro lineárně polarizované světlo v libovolné ose má Jonesův vektor hodnotu $J = \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix}$, nebo pro pravotočivě kruhově polarizované záření je dán jako $J = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix}$.

Existuje několik způsobů, jak světlo polarizovat. Nejjednodušším způsobem je polarizace lomem, nebo odrazem. Při lomu světla do druhého prostředí dochází k polarizaci světla a to tak, že vektor intenzity elektrického pole E kmitá v rovině dopadu (je kolmý na vektor intenzity elektrického pole odraženého světla). Stejně tak dochází k polarizaci při odrazu. V těchto případech se jedná pouze o částečnou polarizaci, zvláštní vyjímku tvoří polarizace odrazem pod tzv. Brewsterovým úhlem, kdy bude odražený paprsek úplně lineárně polarizován. Velikost Brewsterova úhlu závisí na indexu lomu n_2 prostředí, na kterém dochází k odrazu světla. Pro jeho velikost platí rovnice

$$\operatorname{tg} \alpha_B = n_2.$$

Například pro sklo s indexem lomu 1,510 je velikost Brewsterova úhlu $56^\circ 29'$.

K polarizaci dochází také v anizotropních prostředích, kde tento jev označujeme jako dvojlom. Při dopadu optické vlny na anizotropní prostředí dochází ke vzniku dvou vln se vzájemně kolmými rovinami polarizace. Dvojlom lze pozorovat nejenom v materiálech

s přirozenou anizotropií, ale i v prostředích s anizotropií indukovanou elektrickým polem, magnetickým polem nebo mechanickým napětím [3].

Polarizované světlo můžeme získat také pomocí polarizačních prvků, tzv. polarizátorů. Tento způsob je nejpoužívanější v laboratorních prostředích. V závislosti na typu získané polarizace dělíme polarizátory na lineární, kruhové a eliptické. Kruhové a eliptické polarizátory bývají většinou kombinací lineárního polarizátoru a fázové destičky. Jako polarizátory většinou používáme polarizační hranoly (např. Nicolův hranol, Glan-Thompsonův hranol, Wollastonův hranol).

Fázové destičky jsou tenké planoparalelní destičky zhotovené z dvojlomného anizotropního materiálu a zavádějící definovaný dráhový rozdíl, tj. rozdíl optických drah mezi dvěma ortogonálně a lineárně polarizovanými vlnami. Nejpoužívanějšími fázovými destičkami jsou čtvrtvlnná fázová destička (zavádí dráhový posun o $\pi/2$) půlvlnná fázová destička (zavádí dráhový posun o π). Čtvrtvlnná destička umožňuje změnit lineárně polarizované záření na levotočivě kruhově polarizované záření a světlo pravotočivě kruhově polarizované na lineárně polarizované. Půlvlnná fázová destička dokáže stáčet rovinu lineárně polarizovaného světla, v krajním případě tedy změnit s polarizované světlo na světlo polarizované v rovině p . Půlvlnná destička dále dokáže měnit pravotočivě kruhově polarizované světlo na levotočivě kruhově polarizované světlo.

Polarizace nachází své aplikace v mnoha různých oborech, a proto je rozhodně zajímavé uvažovat polarizační jevy jako součást našeho modelu.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 NÁVRH MODELU NAVAZOVÁNÍ

Předmětem této kapitoly je nastínit technickou ideu sestavy, kterou se chystáme realizovat. Nejprve se budeme zabývat obecnou myšlenkou návrhu modelu a diskusí nad možnostmi, které nám navržená sestava může přinést. Rádi bychom v návaznosti na tuto část poskytli také drobnou exkurzi do fyzikální podstaty realizovaného modelu.

V dalším se budeme zabývat návrhem jednotlivých komponent vhodných pro realizaci a diskusí nad jejich vhodností pro daný úkol.

4.1 Obecná myšlenka modelu navazování výkonu do optického vlákna

Jak bylo nastíněno v úvodu, tento model by měl sloužit z obecného pohledu studentům k vizuální představě navázání výkonu do optického vlákna. Tohoto má být docíleno v první řadě pomocí použití zdroje světla v podobě koherentního záření generovaného laserem na vlnové délce viditelné části elektromagnetického spektra. Důvody pro volbu laseru jako zdroje záření jsme si nastínili v kapitole 1. Pro realizaci se jeví nejvhodnějším použitím vlnové délky 532nm, tedy zeleného světla. Důvody pro volbu právě této vlnové délky budou vysvětleny později. Ke zmíněné vizuální představě dále poslouží sférická čočka známé ohniskové vzdálenosti a optické vlákno se známou numerickou aperturou, přizpůsobeno zvolené vlnové délce. Dále je možné vhodně nastínit vzájemnou provázanost ohniskové vzdálenosti čočky a numerické apertury optického vlákna.

Důležitou funkcí navrhovaného modelu má být studium propustnosti optického vlákna. Tohoto bude docíleno, uchytíme-li čelo optického vlákna do držáku, obsahujícího dva stupně volnosti pohybu a to rotační a lineární posuvy v ose x (horizontální osa příčně ložená vůči směru svazku). Díky těmto posuvům jsme schopni natáčet optické vlákno vůči laserovému svazku o přesně definovaný úhel a studovat úbytek energie do vlákna navázané. Pro korektní studium propustnosti je nutné obohatit sestavu o PM a senzor, díky nimž budeme schopni zaznamenávat hodnoty vlákna prošlého výkonu.

Jako nadstandardní volbu můžeme sestavu také obohatit o prvky, které nám umožní studium polarizace. Umístíme-li za laser polarizační hranol a půlvlnou fázovou destičku a dále před sensor polarizační hranol, jsme schopni v sestavě sledovat propustnost nejenom výkonu jako celku, ale také propustnost jednotlivých složek lineárně polarizovaného světla. Tímto je možné studentům poskytnout také „sondu“ do problému polarizace.

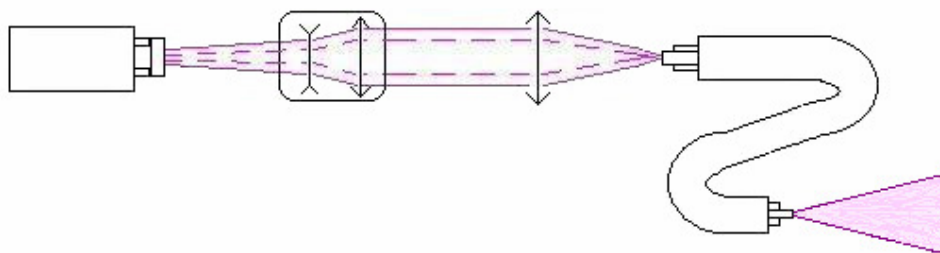
Jako další nadstandardní variantu můžeme sestavu dále obohatit o čtvrtvlnnou fázovou destičku umístěnou za fázovou destičkou $\lambda/2$. Fázový prvek o tloušťce vrstvy nelineárního krystalu $\lambda/4$ nám umožní studium fázového posuvu mezi jednotlivými složkami polarizace s a p .

4.2 Variace modelu

Pro přehlednost můžeme tedy možnosti naší sestavy shrnout do 3 bodu:

4.2.1 Model pro navazování výkonu do vlákna

Tato sestava, jak bylo vysvětleno, bude obsahovat pouze základní prvky, potřebné pro vizuální demonstraci navázání výkonu do optického vlákna. Tedy laser \rightarrow karusel s filtry + BE + aperturní clona \rightarrow čočka pro navázání \rightarrow optické vlákno. Sestavu ukazuje schéma na obrázku 7.

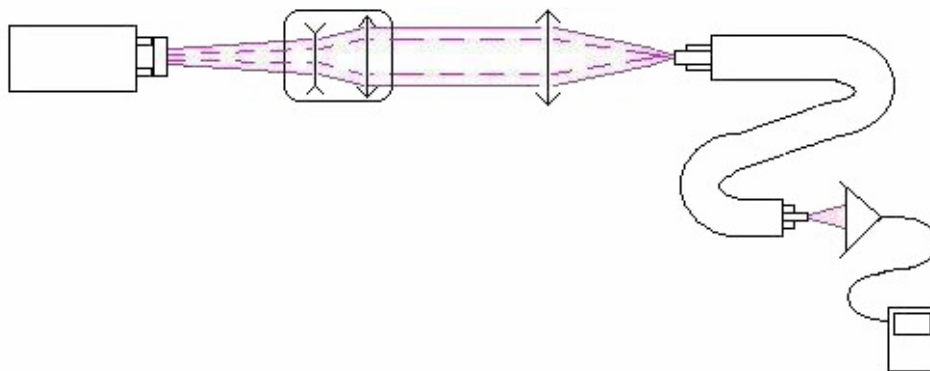


Obrázek 7: Schéma modelu pro navazování výkonu do vlákna

4.2.2 Model pro studium propustnosti

Tato sestava bude schopna mapovat propustnost optického vlákna. Toto můžeme studovat jak pro svazek dopadající pod úhlem daným ohniskovou vzdáleností fokusační čočky, tak pro kolmý dopad, tedy svazek dopadající kolmo na čelo optického vlákna. Tohoto stavu můžeme dosáhnout vyjmutím čočky z cesty záření. Pomocí senzoru PM jsme schopni zaznamenávat hodnoty výkonu a stanovit propustnost optického vlákna.

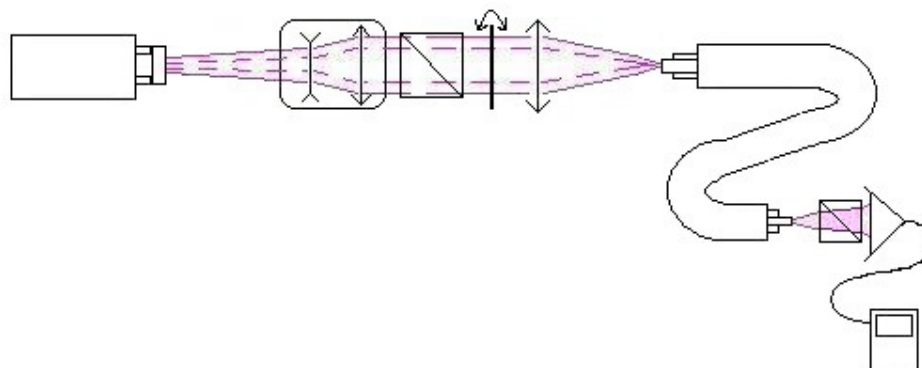
Dále pomocí úhlového a lineárního posuvu jsme schopni natáčet čelo vlákna o definovaný úhel vůči dopadajícímu svazku. Pomocí PM jsme schopni definovat úbytek přeneseného výkonu v závislosti na vzrůstajícím úhlu dopadu. Schéma sestavy pro studium propustnosti můžeme vidět na obrázku 8.



Obrázek 8: Schéma modelu pro studium propustnosti

4.2.3 Model pro studium polarizace

Jak bylo dříve nastíněno, další modifikací sestavy je aplikace polarizačních prvků, které nám umožní studovat nejenom propustnost jako funkci celkového výkonu, ale také závislost na polarizačních složkách. Můžeme určit např. propustnost jednotlivých složek lineárně polarizovaného světla, nebo extinkční poměr polarizačních složek. Sestavu pro studium polarizace můžeme vidět na obrázku 9. Sestava pro studium polarizace obsahuje tyto komponenty: laser → karusel s filtry + BE + aperturní clona → PBS → půlvlnná fázová destička → čočka pro navázání → optické vlákno → PBS → PM.



Obrázek 9: Schéma pro studium polarizace

Zde první PBS určuje vstupní složku polarizace, $\lambda/2$ fázový člen umožňuje natáčení roviny lineárně polarizovaného světla a druhé PBS určuje množství přeneseného světla námi definované polarizační složky.

Možnosti modelu dle varianty 3.2.3. se dají zahrnout do 3 bodů:

1. Měření propustnosti polarizačních složek s a p : Ze sestavy odejmeme $\lambda/2$ fázový člen i druhé PBS. PBS hranol nastavíme tak, aby propouštěl maximum p polarizovaného světla (parazitní světlo vychází z hranolu v horizontální ose). Změříme výkon za prvním PBS a následně změříme výkon prošlý optickým vláknem. Podílem výkon za optickým vláknem / výkon za prvním PBS získáme propustnost p složky lineárně polarizovaného světla. Otočíme-li PBS hranoly o 90 stupňů tak, aby parazitní světlo vystupovalo z hranolu ve vertikální ose, získáváme za prvním hranolem s polarizované světlo. Stejným způsobem změříme propustnost s složky lineárně polarizovaného světla. Hodnoty propustnosti budou přibližně stejné, neboť žádná z komponent není ve své podstatě na rovinu polarizace senzitivní. Hodnoty by měly být obdobné i jako hodnoty propustnosti z bodu 2. Rozdíl v propustnosti u složek polarizace můžeme demonstrovat, vrátíme-li druhé PBS za výstup optického vlákna (stejně orientované, jako první PBS) a vneseme-li do cesty laserového záření jakýkoli druh tenze. Tlak v materiálu způsobí změnu homogenity materiálu. Takto pozměněná struktura materiálu stočí rovinu polarizace, což v důsledku uvidíme jako úbytek energie na PM. Tento úbytek je

způsoben PBS hranolem, na který v důsledku tenze dopadlo méně světla polarizovaného v podporované rovině polarizace.

2. Měření extinkčního poměru: Do sestavy vložíme $\lambda/2$ fázový člen. PBS hranoly natočíme tak, aby propouštěly maximum p polarizovaného světla. Rotace fázové destičky způsobí natáčení roviny polarizace světla, což znamená, že natočíme-li fázovou destičku tak, aby polarizovala v rovině p , dostaneme na výstupu výkon odpovídající výkonu při měření propustnosti p polarizovaného světla. Otočíme-li však fázovou destičku o 45 stupňů, způsobíme otočení roviny polarizace do roviny s , což způsobí, že druhé PBS v ideálním případě nepropustí žádné světlo na detektor a extinkční poměr, určený jako poměr prošlé složky p vs. prošlé složky s , se bude limitně blížit k nekonečnu. Velikost ER však reálně takto vysokou nemůžeme dostat, neboť do hry vstupuje mnoho parazitních prvků, které způsobí, že hodnota ER, respektive hodnota výkonu s polarizovaného světla nebude zanedbatelná. Parazitními prvky myslíme zejména reálnou hodnotu kvality polarizovatelnosti PBS hranolu, dále pak neideální kvalita polarizovatelnosti fázové destičky, nebo vliv depolarizace prostředí.
3. Měření fázového posunu: Jako případné nadstandardní obohacení sestavy bychom mohli dále do sestavy přidat $\lambda/4$ fázovou destičku, která nám může umožnit studovat fázový posun (zpoždění) mezi složkami polarizace s a p . Toto však již považujeme za variantu, která pro studenta okrajově zasahujícího do oblasti fyziky nemá velkého přínosu, proto se těmito rozšířeními nebudeme dále zabývat.

Výše popsané reprezentuje fyzikální podstatu chování systému. Nezanedbatelnou je však vizuální stránka reprezentace. Natáčení roviny polarizace pomocí $\lambda/2$ fázové destičky umožňuje spojitě přelévání výkonu mezi složkami polarizace, které můžeme, díky filtraci PBS hranolem, krásně vidět právě za tímto hranolem. To znamená, umístíme-li za oba výstupy PBS hranolu stínítko (pevnou překážku), můžeme natáčením fázové destičky vidět přelévání výkonu mezi oběma výstupy (vytvořili jsme tzv. hustotní filtr). Právě takovouto vizuální reprezentaci považuji za jeden z výrazných přínosů pro studenty, neboť poskytnutí názorné představy práce s laserovým zářením může vnést příjemnou a nesmazatelnou stopu do paměti studentů.

Výše popsané chování a vizuální přínos byl prakticky realizován a je demonstrován v powerpointové prezentaci, která je součástí diplomové práce.

4.3 Rozvaha nad jednotlivými sestavami modelu

V této kapitole se pokusíme popsat a nastínit vhodné vlastnosti jednotlivých komponent sestavy. Budeme postupovat dle cesty svazku, tedy začneme sestavou laseru, která obsahuje laser s dalšími komponentami, nezbytnými pro správnou funkci laseru v rámci modelu jako celku. Dále popíšeme sestavu čočky, sestavu optického vlákna, sestavu výstupu optického vlákna a následně výše zmíněné prvky pro možné studium jevů polarizace.

V rámci této kapitoly se nebudeme zabývat návrhem a doporučeními nákupu jednotlivých komponent a jejich kalkulaci, toto bude obsahem dalších sekcí.

4.3.1 Sestava laseru

První a nejdůležitější komponentou v sestavě je zdroj světla, v našem případě zdroj koherentního záření, laser. Laser je obecně volen v oblasti komunikaci z důvodu svých vlastností, zejména monochromaticnosti, směrovosti, koherence, výkonu aj. Monochromaticnost, schopnost vyzářovat světlo právě na jedné vlnové délce je pro oblast komunikací klíčová a to jak z důvodu modulace, tak i z důvodu přenosu záření a v něm kódované informace. Koherence, jako jedna z nejtypičtějších vlastností laseru značí, že záření postupuje prostorem při dodržení konstantní frekvence, směru šíření i fáze vlny. Právě tato vlastnost je nejdůležitější pro schopnost přenášet informaci. Nezanedbatelně důležitou vlastností laserových svazků je také zachování profilu rozložení výkonu při jeho šíření. Tento profil má u většiny používaných laserů Gaussovské rozložení. Laserový svazek při svém šíření zvětšuje svoji střední šířku (FWHM- full width in half maximum) a to v důsledku rozbíhavosti svazku, avšak jeho profil zůstává při šíření zachován. I my budeme při výběru zdroje záření preferovat svazek s Gaussovským profilem (TEM₀₀).

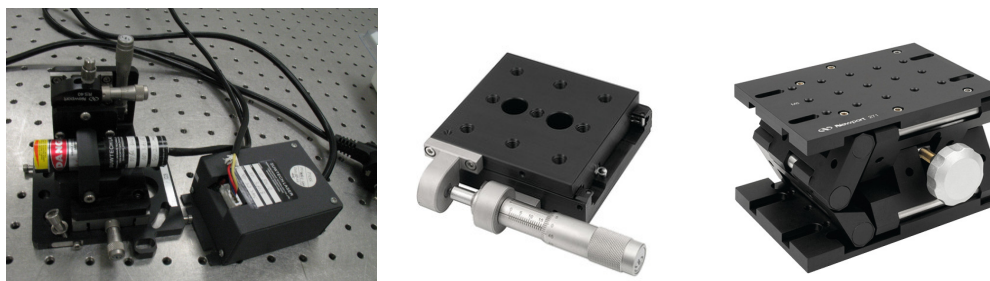
V případě našeho modelu se jeví jako nejvhodnější využít vlnové délky 532nm. Tato vlnová délka není typická pro oblast komunikaci, avšak v našem případě je důležitější otázka demonstrace navázání a právě zelené světlo se jeví pro názornost jako nejvýhodnější. Dalším důležitým kritériem je cenová dostupnost, neboť vlnová délka 532nm umožňuje volbu polovodičových laserů, kterých je na trhu velké množství a jsou finančně dostupné.



Obrázek 10: Varianta laseru pro použití v modelu

[http://www.phototech.com/main/products_jg/pdf/new/DPGL-3005F.pdf]

Laser je nutno uchytit, proto další komponentou je držák pro jeho uchycení. Tento by v optimální konfiguraci měl obsahovat 2 úhlové posuvy v osách x a y pro justáž osy svazku. Pro úplnou manipulovatelnost nastavení osy svazku je vhodné zajistit ještě 2 lineární posuvy v ose x a y. Tohoto docílíme kombinací zvedacího stolku a stolku s lineárním posuvem.



Obrázek 11: Uchycení laseru + varianta lineárního a zvedacího stolku [www.newport.com]

Další důležitou komponentou sestavy laseru je BE, tedy rozšiřovač, který nám potlačí divergenci svazku, zajistí zaměření svazku na nekonečno. Díky tomuto můžeme v pozdějších úvahách kalkulovat s ohniskovou vzdáleností čočky. Za BE by měla být dále aperturní clona, která nám umožní redukovat svazek na námi volitelný průměr. Aperturní clona však není nezbytnou nutností, neboť samotnou volbou parametru beam expanderu můžeme být schopni zajistit vhodný průměr svazku pro užívání.



Obrázek 12: Rozšiřovač svazku (Beam expander) [<http://www.beamexpander.com/532nm.html>]

Intenzitu samotného laseru není možno korigovat, tento září s intenzitou stanovenou výrobcem. Poslední komponentou sestavy laseru proto může být karusel s filtry, který nám zajistí redukci výkonu laseru. Karusel má obvykle 6 volných polí pro filtry. Vhodné může být zaplnění 5 polí, 3 filtry s rozdílnou hustotou, třetí pak clonou pro úplné zatemnění svazku a jedno pole nechat prázdné. Filtry redukovaný výkon je vhodné používat například při nastavení, justáži sestavy. Při použití filtrů je vždy třeba dbát na bezpečnost. Odražený svazek musíme mít vždy pod kontrolou, aby nemohlo dojít k nekontrolovanému zásahu oka a jiných míst, což by mohlo způsobit popálení nebo jinou nevratnou zdravotní újmu.



Obrázek 13: Karusel s filtry

Zmíněné členy vzájemně propojujeme pomocí spojovacího materiálu. Vybereme-li komponenty standardní dle katalogu typických firem (Newport, Standa aj.), propojení komponent bude zajištěno šrouby rozměru M6. Laser přimontovaný k držáku připevníme k lineárnímu stolku tak, aby lineární stolek byl schopen posouvat laserem v ose x (horizontální osa příčně ložená vůči směru šíření svazku). Celou sestavu připevníme k vertikálnímu stolku. Za laser připevníme karusel s filtry a vhodně zajistíme odraz z filtru

do pevného absorpčního tělesa. Za karusel s filtry umístíme BE. Připevnění BE by mělo proběhnout pomocí vhodně navržené a vyrobené mechaniky, aby bylo zajištěno optimálního vstupu svazku do BE. Zde je třeba dbát zvýšenou ostražitost při pozdější justáži sestavy, neboť vstupní úhel svazku do BE zajistí správné vyvážení světla z něj. Za BE dále připevníme aperturní clonu, tato je opět uchycena ve vhodně navržené a vyrobené mechanice.

Při volbě vhodného BE je třeba mít na paměti vlnovou délku, na které chceme pracovat (v našem případě 532nm) a dále průměr vstupního svazku (známe dle volby laseru) a průměr výstupního svazku (ten je dán zvětšením Beam Expanderu). Při volbě filtru je třeba uvažovat opět vlnovou délku, na které pracujeme a pak propustnost filtru. Propustnost filtru volíme dle intenzity laseru tak, aby bylo možné redukovat výkon na hodnotu, která je vhodná pro delší práci.

4.3.2 Sestava fokusační čočky

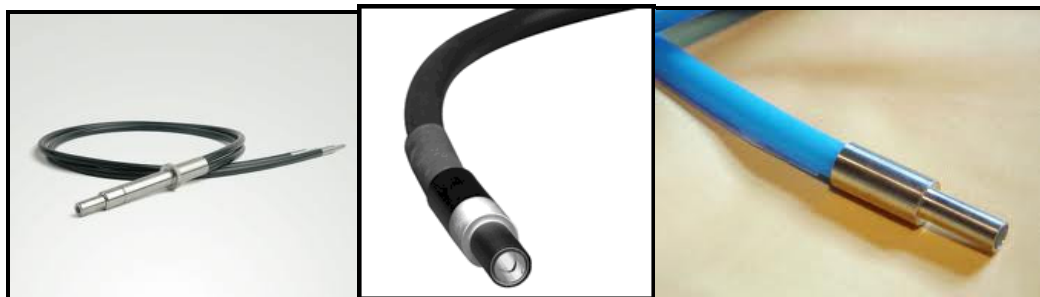
Tato sestava slouží v modelu k navázání záření do optického vlákna. Nejdůležitějším prvkem je čočka, specificky spojka s ohniskovou vzdáleností definovanou tak, aby vyhovovala numerické apertuře vlákna. Tedy aby se fokusovaný svazek přenášel vláknem pod definovaným úhlem vyhovujícím podmínkám totální reflexe ve vlákně. Diskuzi nad numerickou aperturou a jejím vztahem k ohniskové vzdálenosti se budeme podrobněji věnovat v následující kapitole. Další nezbytný parametr při výběru čočky bude samozřejmě vlnová délka, resp. interval vlnových délek, pro které je čočka opatřena antireflexní vrstvou. Dalším parametrem je pak samozřejmě mechanický rozměr čočky, její průměr. K parametrům čočky se vrátíme také v příští sekci, neboť pro rozvahu nad parametry čočky je vhodné znát parametry optického vlákna. Obecně však můžeme říci, že čím delší bude ohnisková vzdálenost čočky, tím více se vektory paprsků laserového svazku blíží rovinné vlně a tím jednodušší bude splnění požadavků totální reflexe ve vlákně.

Čočku je třeba pevně uchytit do mechaniky. Mechaniku je možno navrhnout a vyrobit, nebo vhodně vybranou přímo koupit od vhodného dodavatele. Pokud by ohnisková vzdálenost čočky byla velmi malá (v řádu jednotek až desítek milimetrů), bylo by vhodné držák čočky opatřit lineárním posuvem osy z (osa šíření svazku). Pokud bude ohnisková vzdálenost delší, pak není třeba tohoto posuvu, neboť jeho interval je v řádu milimetrů až jednotek centimetrů a tudíž je stejně nezbytné pohybovat celou sestavou fokusační čočky.

4.3.3 Sestava optického vlákna

Další sestavou v cestě laserového záření je sestava optického vlákna. Sestava obsahující optické vlákno a příslušné stupně volnosti pro možnost korekce a nastavení čela optického vlákna vůči laserovému svazku.

Nejdůležitější komponentou je samozřejmě optické vlákno s odpovídajícími parametry. Zde musíme při výběru vhodného vlákna uvážit několik parametrů. Důležitá je samozřejmě opět volba vlnové délky, resp. intervalu vlnových délek, pro které dosahuje optické vlákno požadovaných parametrů. Další důležitou volbou jsou parametry jádra optického vlákna a to jak průměr optického vlákna, tak jeho index lomu, resp. typ rozložení indexu lomu. Pro náš případ bude optimální jádro se skokovou změnou indexu lomu a velkým průměrem jádra. Velký průměr jádra není vhodnou volbou, budeme-li uvažovat použití v komunikacích. Avšak v našem případě, kdy zvláště důležitá je pro nás demonstrační stránka, je velký průměr vlákna výhodou. Tuto podmínku jednoznačně splňuje oblast optických vláken zvaných světlovody.



Obrázek 14: Některé varianty světlovodů [www.newport.com, www.lumatec.de]

Jedním z nejdůležitějšího parametru optického vlákna je numerická apertura, velikost „vějíře“ světla, který je vlákno schopno pojmout. Numerická apertura závisí na indexu lomu jádra i obalu (bezrozměrné číslo), v aplikaci na optická vlákna je však většinou udávána ve stupních. Tato hodnota ve stupních udává kužel světla, který je schopno optické vlákno pojmout a zachovat jeho bezztrátový přenos.

Proto budeme-li navrhovat parametry fokusační čočky, musíme nejdříve uvažovat výběr optického vlákna, neboť numerická apertura se stává limitujícím faktorem pro výběr čočky (navíc optických vláken je menší výběr na trhu). Vybereme-li optické vlákno o definované hodnotě numerické apertury, pak volíme čočku tak, aby její ohnisková

vzdálenost nebyla kratší, než je přípustné numerickou aperturou vlákna. Tedy aby kužel světla daný ohniskovou vzdáleností čočky měl menší vrcholový úhel než udává NA.

Přesnému výběru komponent se budeme více věnovat v sekci kalkulace, nicméně pro osvětlení výše popsaného uvedeme příklad. Jak bylo zmíněno, pro náš model se hodí použít optické vlákno s velkým průměrem vlákna. Jádru může být tvořeno různým materiálem. Zvolíme-li světlovod s kapalinovým jádrem (liquid lightguide), pak takové je, jak napovídá název, tvořeno tekutinou. Taková vlákna slouží k transportu světla. Vybereme-li tedy např. Liquid Lightguide dle nabídky z firmy Newport (např. model 77555), pak takové má $NA = 0,59$ (při 300 – 650nm, průměr jádra 0,12 palců). Neboť platí $NA = n \cdot \sin \alpha \Rightarrow \arcsin(NA/n) = \alpha \Rightarrow \alpha \approx 36^\circ$ (kde pro index lomu n uvažujeme vzduch, tedy $n = 1$). Maximální přípustný úhel dopadu laserového paprsku na čelo světlovodu je 36° . Pro úplnost, kužel světla, který takto můžeme navázat, má vrcholový úhel 72° . V literatuře i praxi se můžeme setkat s oběma typy zápisu, tzn. $NA = 0,59 \approx 36^\circ$.

Dále uvažujeme-li průměr svazku 6mm fokusovaného přes čočku, pak pro mezní úhel nám vychází $tg 36^\circ = 3 / f$ (kde f je ohnisková vzdálenost) $\Rightarrow f = 4,1$ mm. Ohniskovou vzdálenost čočky v tomto případě nemůžeme volit kratší než 4,1 mm, neboť by nedošlo k navázání okrajového záření. Vzhledem k tomu, že je pro nás důležitá názornost a nikoli kompaktnost sestavy, pak je odvozená podmínka jednoduše splnitelná, neboť najít v nabídce čočku ohniskové vzdálenosti vyšší než 4,1mm nebude vůbec obtížné. Přesto tato úvaha má svůj význam v případě optických vláken pro užití v komunikacích, protože kupříkladu jednomodové vlákno v oblasti komunikací má běžně hodnotu NA v intervalu 0,10 – 0,14.

Optické vlákno upevníme do mechaniky. Tuto mechaniku připevníme na rotační stolek, čímž zajistíme rotační stupeň volnosti v ose x. Rotační stolek dále přichytíme k lineárnímu stolku, čímž zajistíme kompenzační lineární posuv osy x. Celou sestavu připevníme k vertikálnímu stolku, čímž máme zajištěn posuv v ose y. Z hlediska ceny lze vertikální stolek nahradit mechanikou o pevných rozměrech, neboť pohyb osy y nám může zajistit vertikální posuv sestavy laseru.

4.3.4 Sestava výstupu optického vlákna

Sestava zmíněná v předchozí sekci nám zajistí uchycení optického vlákna, resp. jeho vstupní části. Další sestavou v modelu musí být uchycení výstupu optického vlákna, vyvázání laserového záření a analýza výstupních parametrů.

Výstup optického vlákna uchytíme do držáku. Jako vhodný držák můžeme použít optomechanické držáky z nabídek standardních dodavatelů. Za vlákno uchycené do držáku umístíme senzor také uchycený do držáku. Držák senzoru je dodáván přímo se senzorem. Senzor umístíme za vlákno do vzdálenosti takové, aby výstupní svazek dopadal celý na plochu senzoru, tj. čím blíže, tím lépe.

Senzor je dále konektorem napojen na PM. Při používání PM musíme dbát na správné zadání vstupních parametrů, používanou vlnovou délku, rozsah měření a dále zda-li je k senzoru využitý přídavný filtr (slouží pro redukci výkonu při použití výkonu vyššího, než je saturační mez senzoru).

4.3.5 Ostatní sestavy a prvky modelu

Předchozí sekce nám poskytly náhled na nejdůležitější sestavy našeho modelu. Nyní se podíváme na další prvky nezbytné pro dokončení a funkčnost modelu a dále na prvky pro realizaci nadstandardních možností modelu.

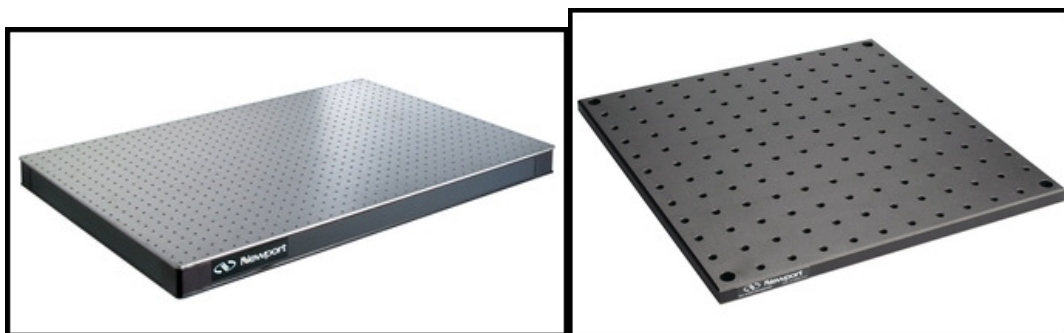
Nezbytnou součástí modelu je základní deska, na kterou připevníme výše popsané sestavy. Tuto navrhujeme zajistit u standardních výrobců (Newport, Standa) nebo vyrobit na zakázku. Nejvhodnější variantou je samozřejmě pneumatický antivibrační laboratorní stůl. Avšak tento je značnou finanční investicí, která by nutně nemusela znamenat úměrně ceně značnou výhodu (cena se pohybuje v řádu stovek tisíc korun).



Obrázek 15: Antivibrační stůl s aktivním tlumením [www.newport.com]

Vzhledem k charakteru prováděných měření není takový stůl nutný a je možné doporučit nákup jednodušší varianty. A to buď základní desku zvanou breadboard, jejíž cena se pohybuje o řád níže než v případě optických stolů, nebo případně nejjednodušší

variantu aluminium plate, kde se dostáváme v ceně opět o řád níže. Při volbě aluminium plate je vhodné vzhledem k velikosti modelu volit rozměr cca 300mm x 600mm.



Obrázek 16: Základní deska- varianty breadboard a aluminium plate [www.newport.com]

Pro uchycení je třeba zajistit spojovací materiál, většina komponent je standardizovaná pro použití šroubů M6, nicméně tyto bude třeba zajistit v různých délkách. Pro vhodné uchycení doporučuji používat šrouby v kombinaci s pružnou a plochou podložkou. Nákup spojovacího materiálu však navrhujeme nechat na později, neboť tento je běžně dostupný a je vhodné jej nakupovat až v pozdější fázi projektu.

Dále se zmíníme o nadstavbových sestavách pro realizaci modelu pro studium polarizace, jak bylo popsáno v sekci 4.2.3. Základními prvky jsou fázová destička a polarizační hranoly. Fázové destičky jsou optické prvky, které jsou schopny zavádět fázový posuv mezi polarizačními složkami. V aplikacích je nejčastěji využíván fázový posuv o $\pi/2$ resp. π , tzn. o čtvrtinu resp. polovinu vlny. Takové fázové prvky nazýváme čtvrtvlnné, resp. půlvlnné destičky (Quarter resp. half waveplates). Čtvrtvlnná destička má schopnost měnit typ polarizace, tzn. lineárně polarizované světlo přemění na světlo kruhové polarizace a naopak záření kruhové polarizace se mění na lineárně polarizované. Naproti tomu půlvlnná fázová destička má schopnost natáčet rovinu polarizace lineárně polarizovaného světla. Dále se fázové destičky dělí podle způsobu aplikace a procesu výroby na jednořádové (Zero-order), víceřádové (multiple-order) a další menší kategorie. Jednořádové destičky jsou vhodné pro širší pásmo vlnových délek a lepší termální stabilitu, avšak jsou složitější na výrobu, což značí i vyšší cenu. Naproti tomu víceřádové fázové destičky je třeba použít striktně pro danou vlnovou délku. Pro naše účely bude dostačující půlvlnná destička víceřádová.

Dalším optickým prvkem modelu při úvaze studia polarizace je polarizační hranol. PBS je optický prvek, schopný rozložit lineárně polarizované světlo na poměr horizontálně a

vertikálně polarizovaných složek. Tyto složky jsou od sebe separovány a nadále se pohybují svými drahami. Základním parametrem polarizačních hranolů je extinkční poměr (ER-extinction ratio), míra separovatelnosti složek polarizace. Kvalita extinkce se liší s metodou výroby hranolu. Můžeme rozlišovat hranoly vyrobené různými metodami např. tmelené hranoly, sesávané hranoly, Brewstrový hranoly aj. Pro naše účely je dostačující využití tmelených hranolů, které jsou i na trhu nejdostupnější variantou.

Půlvlnnou destičku uchytíme do držáku, který umožňuje rotační pohyb destičky kolmo vůči svazku. Tyto držáky jsou standardně dodávány a jejich výbavou je i posuv v ose y. Jsme tak schopni dobře nastavit destičku vůči svazku.

Obdobně i PBS hranoly uložíme do vhodného úchyty. První hranol v uchycení můžeme vložit za BE, což značí, že tento hranol bude mít funkci polarizátoru. Druhý hranol umístíme mezi výstup optického vlákna a sensor. Tento hranol bude sloužit jako analyzační. Pomocí tohoto uspořádání jsme schopni realizovat polarizační měření popsaná v kapitole 4.2.3.

Další prvky modelu mohou být justážní komponenty, které nám zaručí přesné nastavení sestavy před jejím použitím. Pro určení přesné polohy cesty svazku potřebujeme znát přesnou polohu alespoň 2 míst v sestavě. Pro tyto styčné plochy vytvoříme přípravky, které budou určovat přesnou polohu pro nastavení. Určit však tyto styčné plochy není jednoduchý úkol a je nejlépe toto provést, až budeme znát přesné rozložení modelu. Poté budou vybrány pevné polohy (polohy bez stupňů volnosti), pro které budou přípravky vytvořeny. A následně budou přípravky navrženy tak, aby bylo možné je připevnit na tyto styčné plochy.

5 REALIZACE MODELU

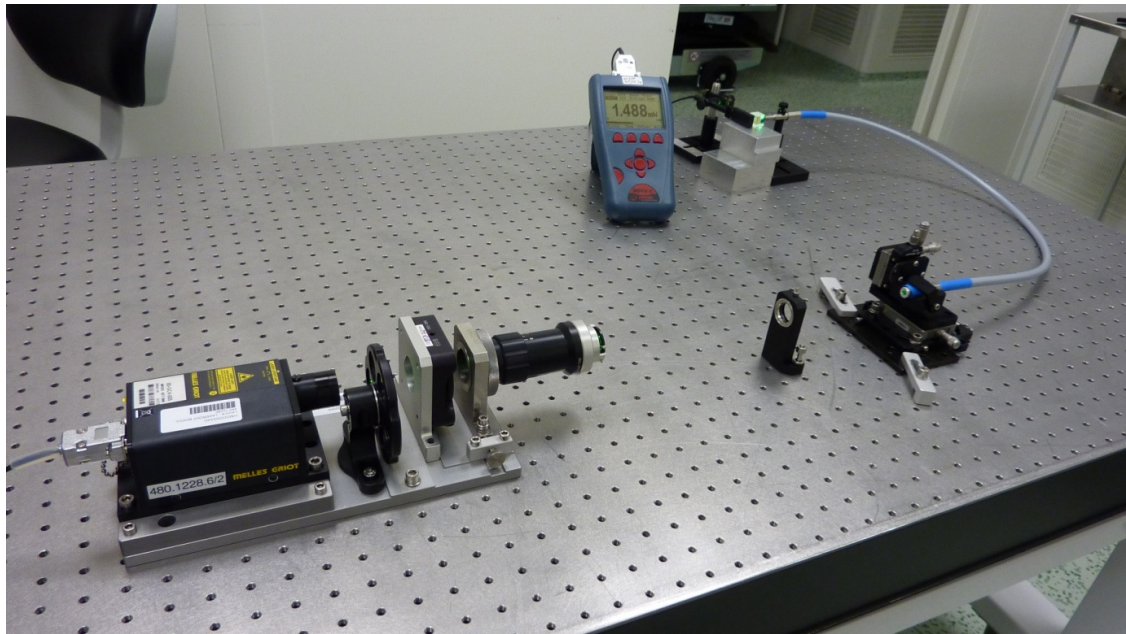
Kapitola 4 nás podrobně seznámila s modelem navazování laserového svazku do optického vlákna a s jeho fyzikální myšlenkou. Ukázala nám jednotlivé podsestavy a komponenty vhodné pro realizaci.

Pro dokonalou a správnou interpretaci a představu o navrhovaném modelu bylo třeba vyzkoušet, zda-li může model dle návrhu popsaného výše fungovat a je možné na takovém modelu provést všechna navrhovaná měření.

Realizace byly vytvořeny dvě, původní varianta pracující v oblasti 266nm a varianta druhá pracující ve viditelné oblasti na 532nm (zelené světlo). Popisem této realizace se v dalším textu budeme věnovat podrobněji. Tato varianta se jednoznačně ukázala jako názornější, neboť za specifických podmínek umožnila i vizualizaci paprsku a jeho průběhu sestavou. Dále si popíšeme i zmíněnou realizaci v DUV (deep ultraviolet) a krátce srovnáme obě realizace.

5.1 Realizace 532nm

Jak bylo zmíněno při popisu modelu, jako nejdostupnější a nejnázornější se ukazuje realizovat model za použití laseru na vlnové délce 532nm, tzn. zelené světlo z viditelné oblasti spektra. Zdroje koherentního záření na této vlnové délce jsou dobře dostupné. I při naší realizaci jsme využili právě takového zdroje záření a zpracovali realizaci dle navržených bodů 4.2. (viz. obrázek 17).



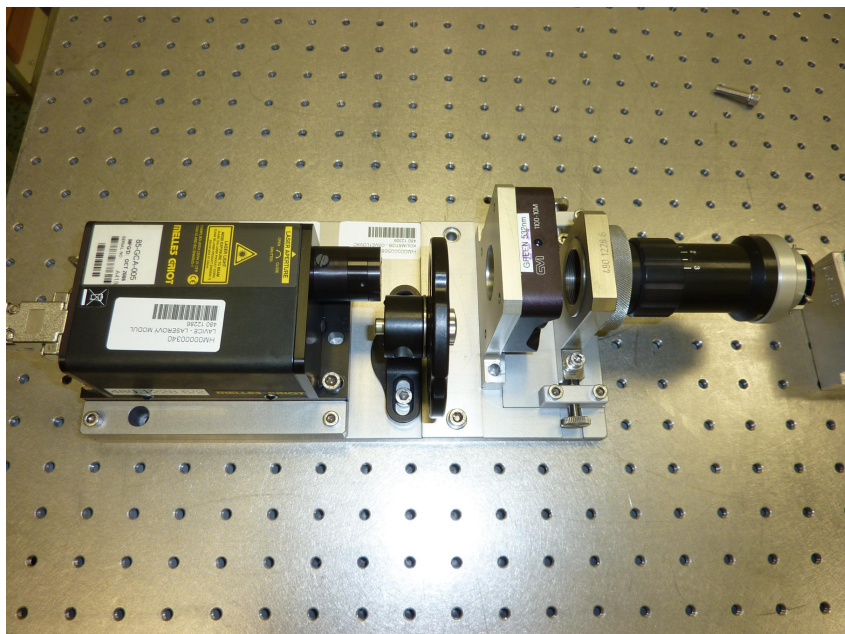
Obrázek 17: Uspořádání realizace 532nm

Mimo popis realizace popsany v následujících dvou kapitolách byla dále zpracována powerpointová prezentace a demonstrační video. Tyto mohou posloužit jako výukový a názorný aparát pro studenty v případě, že nedojde k realizaci v rámci UTB.

5.1.1 Popis komponent

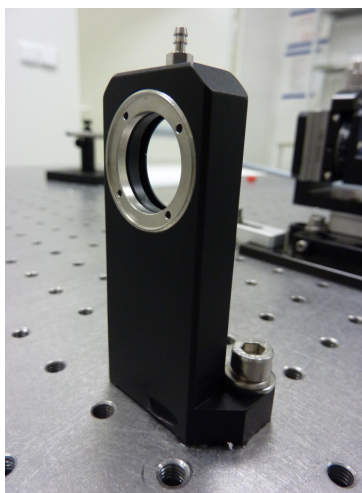
Nyní se budeme věnovat popisu komponent použitých při realizaci. Jak bylo okrajově zmíněno výše, základem pro realizaci byl zdroj koherentního záření (laser) pracující na vlnové délce 532nm. Pro realizaci je jednoznačně dostačující jednoduchý polovodičový laser (polovodičová dioda) doporučený v kapitole 4. V našem případě byl použit laser od firmy Melles Griot (85-GCA-005), jak je vidět na obrázku 18.

Dále byl použit karusel s filtry a $\lambda/2$ fázová deska uchycená v rotačním držáku. Karusel s filtry umožňuje skokově redukovat intenzitu záření. $\lambda/2$ fázová deska umožňuje natáčet rovinu lineárně polarizovaného záření generovaného laserem. Poslední komponentou byl rozšiřovač svazku, který nám transformuje divergentní svazek o velmi malém průměru na svazek výrazně širší se směrem šíření rovinné vlny. Toto nám umožní přesně definovat chování svazku po průchodu čočkou, jak bylo popsáno v kapitole 4.3.3. Na výstupu rozšiřovače je umístěna aperturní clona, která nám umožňuje redukovat průměr svazku za rozšiřovačem na požadovaný rozměr.



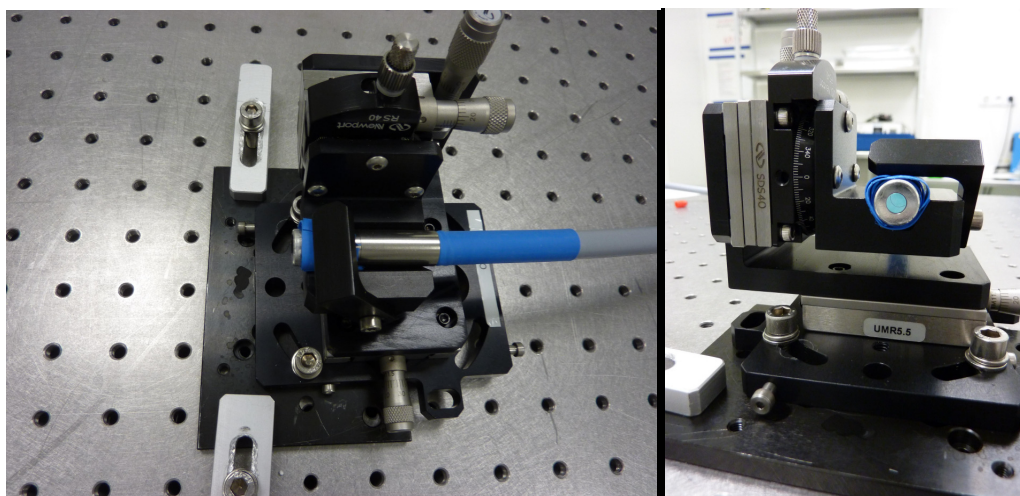
Obrázek 18: Laser použitý pro realizaci

Za sestavou laseru byla umístěna čočka uchycená ve vhodné mechanice (viz. obrázek 19). Čočka byla pro názornost volena s větší ohniskovou vzdáleností ($f = 20\text{cm}$). Taková čočka jednoznačně vyhovuje požadavkům pro navázání. Umístění čočky od rozšiřovače není kritické, neboť za rozšiřovačem se svazek pohybuje jako rovinná vlna, tzn. svazek je nedivergentní (není rozbíhavý ani sbíhavý). Čočku bylo třeba vycentrovat, aby optická osa čočky byla souměrná s osou svazku. Toho jsme docílili vyrovnáním zpětného odrazu od první plochy čočky.



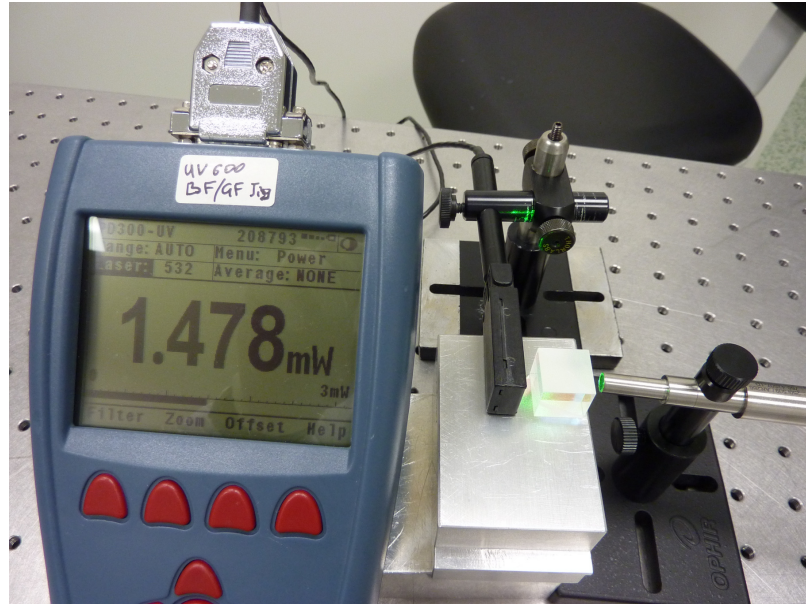
Obrázek 19: Čočka uchycená v mechanice

Dále byla v sestavě umístěna mechanika pro uchycení optického vlákna (světlovodu), viz obrázek 20. Mechanika uchycení umožňovala pohyb ve čtyřech stupních volnosti nutných k preciznímu nastavení vstupu do optického vlákna. Jako optické vlákno byl zvolen světlovod (Liquid lightguide od firmy Lumatec- Series 300). Umístění čela optického vlákna a celé mechaniky od optické čočky není kritické, čelo vlákna není nutné mít přímo v ohnisku, neboť pro navázání je nejdůležitější úhel dopadu na čelo vlákna a tento je stejný pro celý interval akceptovatelného průměru svazku. Mezní hodnoty tohoto intervalu můžeme jednoduše odvodit za pomoci paprskové optiky a využití relací v pravoúhlém trojúhelníku jako $X = b * f / a$, kde X je mez intervalu, b je poloměr vlákna, a je poloměr svazku dopadajícího na čočku a f je ohnisková vzdálenost. Čelo optického vlákna musí být tedy umístěno v intervalu $[f - X ; f + X]$.



Obrázek 20: Mechanika uchycení optického vlákna

Výstup optického vlákna byl uchycen do stojanu (viz obrázek 21). Za optickým vláknem bylo umístěno stínítko, PM, nebo PM v kombinaci s polarizačním analyzátozem a to dle zvolení příslušné varianty modelu. Tomuto se budeme podrobněji věnovat v následující kapitole týkající se realizací jednotlivých variant modelu.



Obrázek 21: Výstup optického vlákna

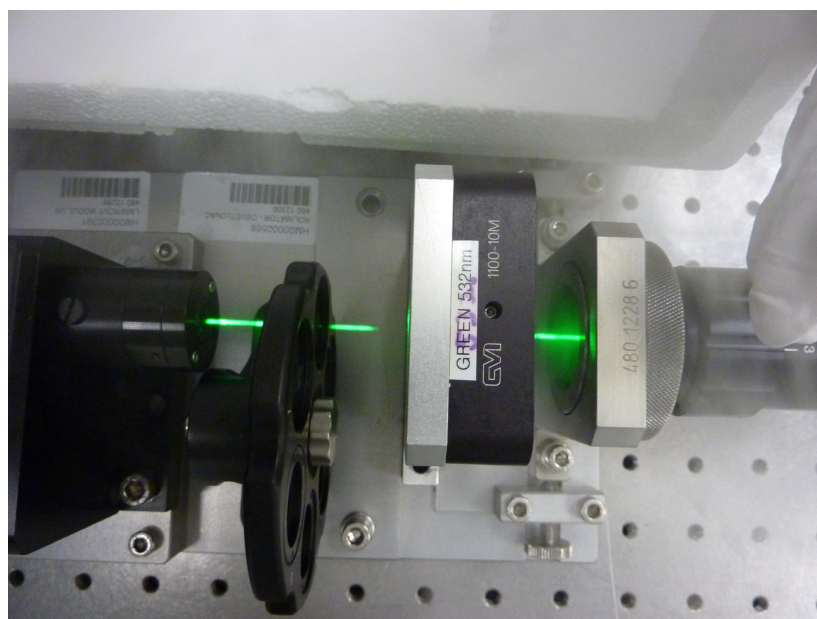
5.1.2 Varianty realizovaného modelu

Realizovaný model připustil a umožnil realizovat všechny varianty modelu dle kapitoly 4.2. Základní variantou popsanou v kapitole 4.2.1. je realizace samotného navazování do optického vlákna (světlovodu). Tato varianta má za úkol seznámit studenty s povahou laserového záření a jeho transformaci skrz přenosové soustavy (viz obrázek 22).



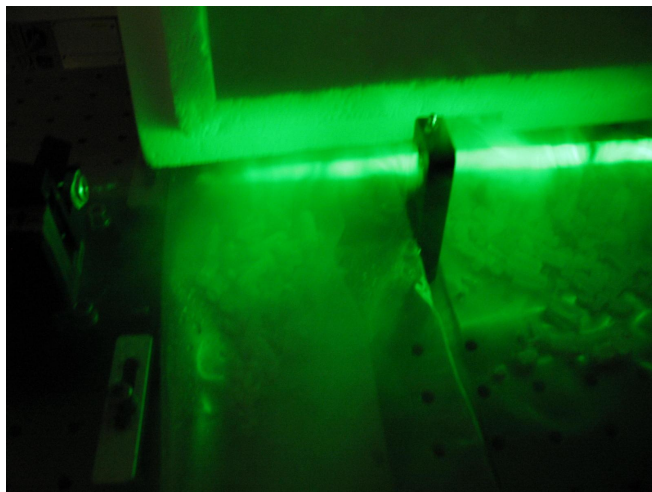
Obrázek 22: Obrázek realizace, průchod záření čočkou a navázání do vlákna

Student může názorně vidět chování laserového záření v „surovém“ stavu za laserem (viz. obrázek 23), kdy je krásně viditelný jak jeho Gaussovský profil, tak chování po průchodu BE, který jej dokáže transformovat na šíření v prostoru ve formě rovinné vlny.



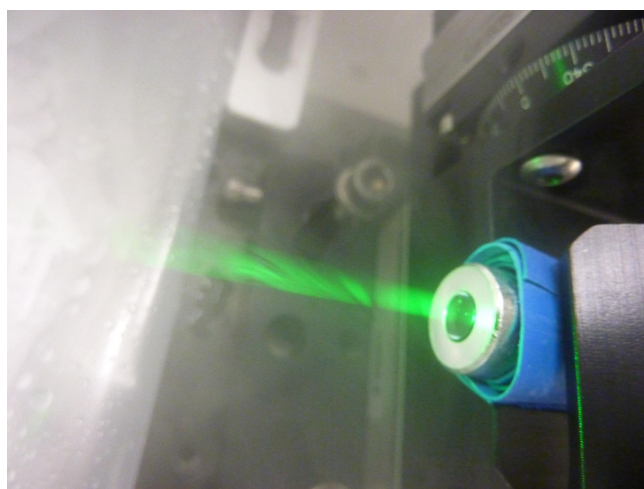
Obrázek 23: Obrázek realizace, průchod záření sestavou laseru

Tento bez změny postupující svazek je pak transformován čočkou, kde dochází ke změně vektorů šíření vlny a je tak možno sledovat charakteristickou sbíhavost.



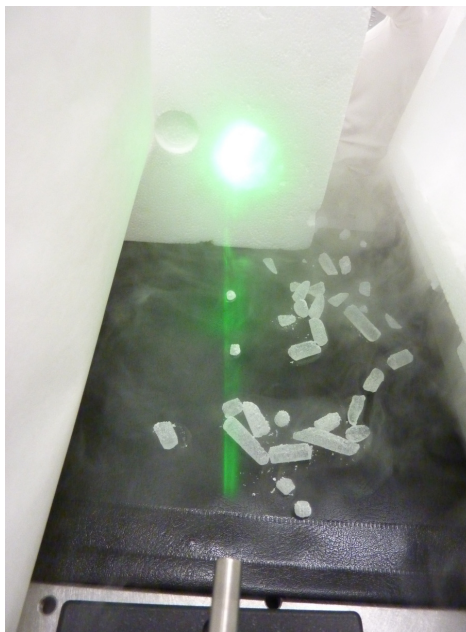
Obrázek 24: Obrázek realizace, průchod čočkou

Tato sbíhavost se mění na rozbíhavost v momentě dosažení pasu laserového svazku, dosažení roviny fokusace. Zde je pak v místě akceptovatelném uvedeným intervalem umístěno čelo optického vlákna. Toto je možné přesně vycentrovat a dosáhnout splnutí osy laserového svazku s osou optického vlákna. Toho můžeme dosáhnout justáží zpětného odrazu, nebo v preciznějším případě vytvořením vhodného justážního přípravku. Při splnutí obou zmíněných os dosáhneme optimální polohy pro navázání a přenesení maximálního výkonu.



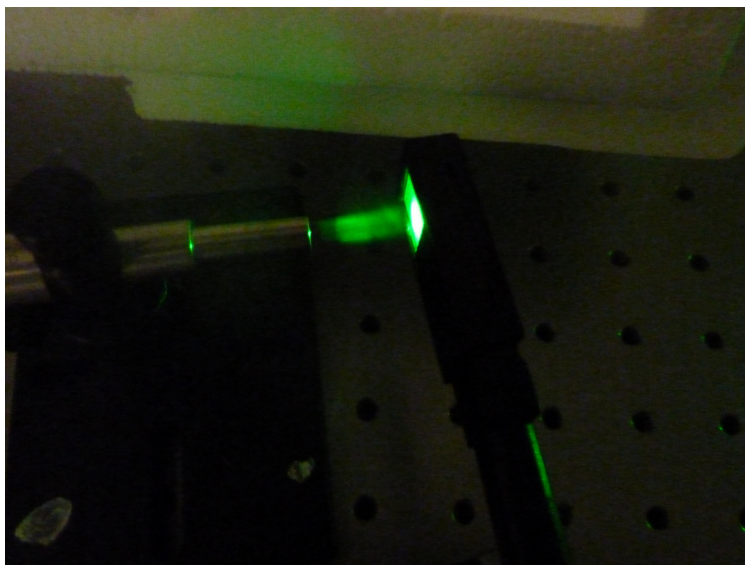
Obrázek 25: Obrázek realizace, detail navázání do vlákna

Umístěním stínítka za výstup optického vlákna můžeme vidět vyvázaný výkon promítnutý na toto stínítko (viz obrázek 26).



Obrázek 26: Obrázek realizace, výstup záření z vlákna

Rozšířenou variantou realizace je pak varianta popsaná v kapitole 4.2.2. PM jsme umístili za výstup optického vlákna tak, aby senzor PM pojmul všechny výstupní výkon. Máme-li správně nastavený PM, pak na jeho displeji vidíme aktuální hodnoty energie vyzařované z vlákna. Přejdeme-li k úchytu optického vlákna a pomocí posuvů tohoto držáku ladíme čelo optického vlákna, můžeme dosáhnout optimálního úhlu pro navázání. Právě justáž pomocí těchto mikroposuvů a kontrola výstupního výkonu pomocí PM jsou nejpřesnějším způsobem, jak precizně najít nejlepší polohu vlákna a nejvyšší míru přeneseného výkonu.



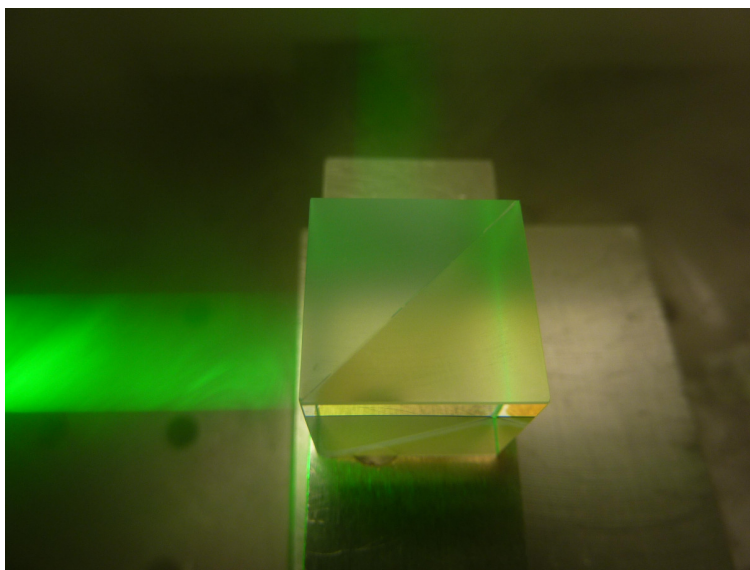
Obrázek 27: Obrázek realizace, výstup záření na PM

Již na podkladu tohoto realizovaného modelu by bylo možné vypracovat řadu úloh pro studenty, které by realizovali při praktické přípravě některého z fyzikálně laděných předmětů. Elementárním úkolem by mohlo být prosté navázání energie do vlákna, resp. dosažení maximálního navázaného a přeneseného výkonu. Dále je možno studovat ztráty při navázání i vyvázání vzniklé např. ohybem vlákna, tlakem na vlákno aj. Zpracování takovýchto úloh by také mohlo být zajímavým úkolem pro případného realizátora v rámci UTB.

Sestava byla dále rozšířena o polarizační prvky, aby bylo možno pojmout možnosti nabízené variantou modelu z kapitoly 4.2.3. Za laserem máme umístěnu $\lambda/2$ fázovou destičku, která nám umožňuje natáčet rovinou polarizace lineárně polarizovaného světla. Užitý laser je zdrojem lineárně polarizovaného záření. Nicméně pokud bychom chtěli zvýraznit míru polarizace, mohli bychom před $\lambda/2$ fázovou destičku vložit některý typ polarizačního hranolu, jak je uvedeno ve variantách modelu. Avšak zřejmou daní tohoto kroku je vždy částečná ztráta výkonu. V námi realizovaném případě jsme ponechali sestavu bez tohoto přídavného polarizátoru.

Polarizační hranol jsme však v modelu využily jako analyzátoru a to v první, demonstrační fázi jako prostředku pro vizualizaci polarizačních vlastností světla (viz obrázek 28). Umístíme hranol mezi rozšiřovač a čočku a vycentrujeme jeho polohu. Za oba výstupy hranolu umístíme stínítka a pomocí rotace $\lambda/2$ fázové destičky můžeme krásně vidět

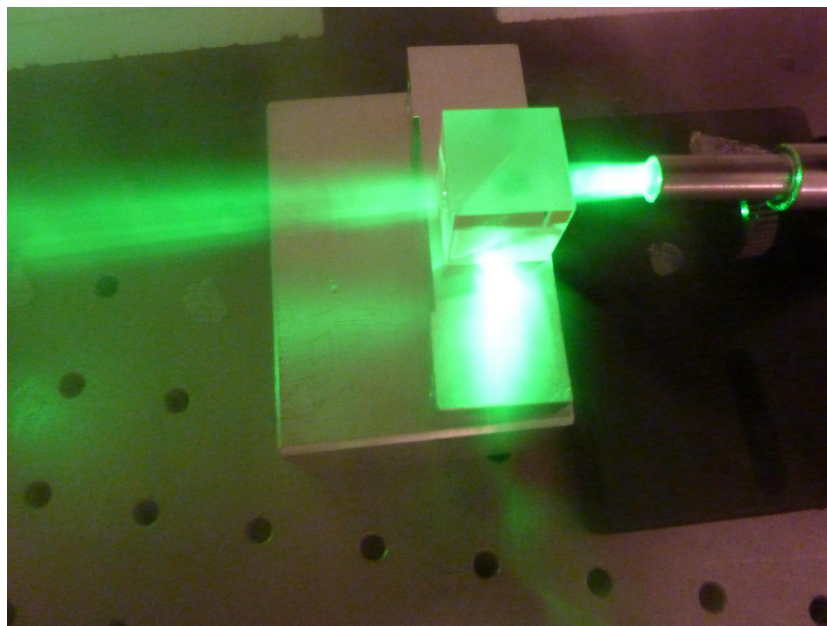
spojité přelévání výkonu mezi oběma větvemi vystupujícího záření. Můžeme tak najít příslušná maxima a minima fázové destičky, tzn. složky s a p lineárně polarizovaného záření.



Obrázek 28: Obrázek realizace, průchod záření PBS hranolem

Umístíme-li za tento PBS hranol PM, můžeme změřit extinkční poměr polarizačních složek s a p a to jako poměr maxima a minima propuštěného a na PM zaznamenaného výkonu. Tento poměr je ovlivněn zejména samotným laserem a jeho schopností generovat lineárně polarizované záření. Avšak důležitou roli hraje také kvalita použitých polarizačních prvků ($\lambda/2$ fázová destička, PBS hranol) a vliv depolarizace přenosové soustavy. Určení ER může být opět vhodnou úlohou pro studenty, aby částečně pochopily polarizační vlastnosti světla.

Umístíme-li tento PBS hranol i PM za optické vlákno (musí být umístěn blízko vlákna, neboť NA optického vlákna vytváří značně rozbíhavý svazek), umožníme tak měření polarizačních charakteristik za optickým vláknem (viz obrázek 29). Můžeme tak opět realizovat jak samotný projev polarizace viditelný na stínítku, tak zejména měření extinkčního poměru. Zejména vliv depolarizace může být dobře demonstrován při vnesení různých typů tenze na různá místa optického vlákna. Zde také můžeme srovnávat míru extinkčního poměru získaného před vláknem a za optickým vlákem.

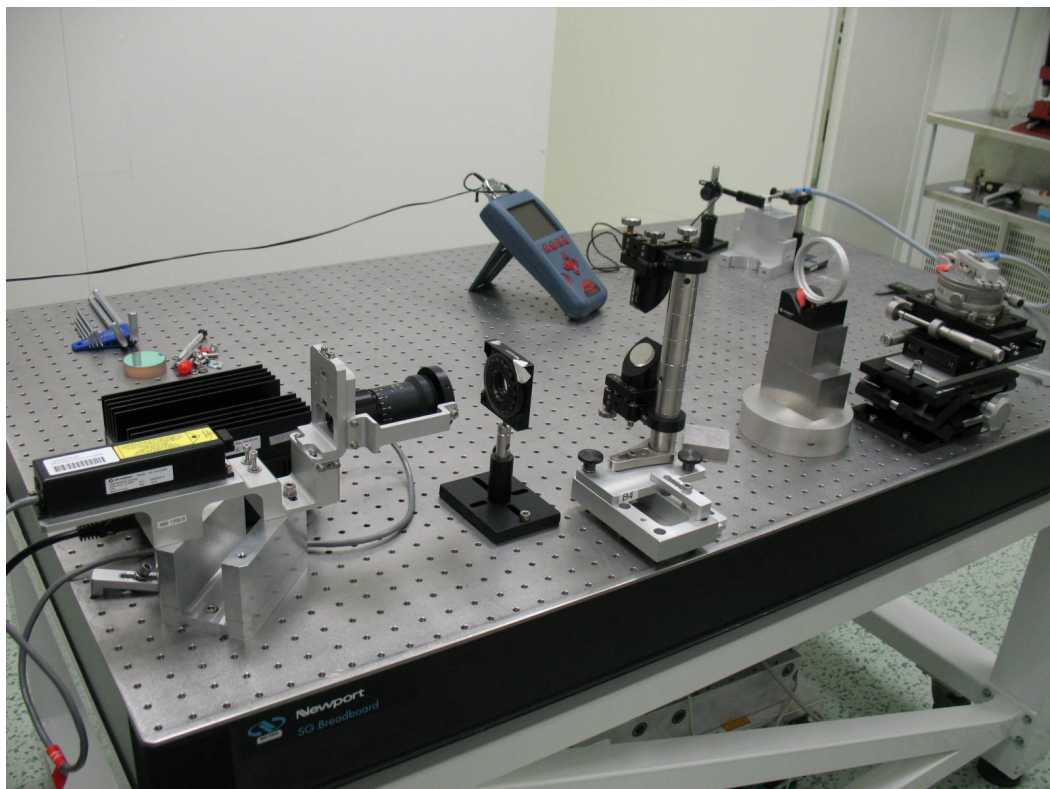


Obrázek 29: Obrázek realizace, výstup záření a průchod PBS hranolem, viditelná separace polarizačních složek polarizace

Jak bylo zmíněno dříve prostor pro vytvoření jednotlivých typů úloh přenechme jako vhodný úkol pro realizátora této sestavy na pracovišti UTB.

5.2 Realizace v DUV

Celá sestava realizovaná pomocí záření na vlnové délce 532nm a popsaná v kapitole 5.1. byla realizována také v oblasti DUV a to na vlnové délce 266nm. Neboť tato vlnová délka není z oblasti pro oko viditelné části spektra, ukazuje se jako méně názorná. Zejména zdravotní hledisko mluví jednoznačně proti této variantě. Přesto i tato realizace poskytla zpracování všech úkolů dle bodů 4.2. Dokonce vzhledem k větší dostupnosti prostředků pro realizaci byla na této vlnové délce realizována i nadstavbová úloha hledání fázového posuvu mezi složkami lineárně polarizovaného světla a to díky použití $\lambda/4$ fázového členu. Realizace na této vlnové délce je na obrázku 30.



Obrázek 30: Realizace DUV (266nm)

Na obrázku 30 realizace na vlnové délce 266nm můžeme vidět podobné uspořádání členů jako při realizaci v zelené oblasti spektra. Záření je generováno laserem na vlnové délce 266nm. Svazek je upraven rozšiřovačem a aperturou na nedivergentní svazek definovaného průměru. Tento pak prochází $\lambda/2$ fázovou destičkou, dále je redukována jeho výška kombinací zrcadel. Svazek dále prochází přes $\lambda/4$ fázovou destičku a dopadá na čočku (s výrazně menší ohniskovou vzdáleností než v případě realizace na 532nm). Čočka fokusuje svazek do optického vlákna a zajišťuje jeho vhodné navázání. Svazek po vyvázání z optického vlákna prochází přes polarizační hranol (analyzátor) a dopadá na detektor PM.

5.3 Diskuse nad realizací

Jak bylo popsáno výše, povedlo se navrhovaný model realizovat na dvou vlnových délkách. Jednoznačně výhodnější se ukázal model v oblasti 532nm. Podařilo se jak realizovat všechna měření navrhovaná dle bodu 4.2., tak se také podařilo vhodnými prostředky vizualizovat svazek. Tento model se dá v plné míře doporučit také pro realizaci

v rámci UTB. Následující kapitola se bude zabývat kalkulací zmíněného modelu a měla by poskytnout představu o finanční náročnosti realizace.

6 KALKULACE

Tato kapitola se bude zabývat kalkulací modelu navrženého a realizovaného výše a měla by poskytnout ucelenou představu o finanční náročnosti realizace uvažovaného modelu. Ke kalkulaci můžeme přistoupit z různých pohledů, obecně však platí, že základem by mělo být vytvoření tzv. kusovníku (jinak zvaného BOM- bill of material). Tento BOM obsahuje kompletní soupis materiálu nutného k zajištění. V našem případě k zakoupení. Tento BOM může mít pro přehlednost vytvořeny kusovníkové úrovně (BOM levels), které rozdělují jednotlivé položky do nižších celků, přesto však zachovávají ucelenou strukturu a podřízenost položek, sestav, až k nejvyššímu celku (jak můžeme vidět na obrázku 25).

Struktura kusovníku		
P/N	Popis	
A001	1. sestava nejvyšší úrovně A	
	B001	1. sestava nebo položka nižší úrovně B
		C001
		1. položka nejnižší úrovně C
A002	2. sestava nejvyšší úrovně A	
	B002	2. sestava nebo položka nižší úrovně B
		C002
		2. položka nejnižší úrovně C
		C003
		3. položka nejnižší úrovně C
	B003	3. sestava nebo položka nižší úrovně B
		C004
		4. položka nejnižší úrovně C

Obrázek 31: Struktura kusovníku

V našem případě bude mít tedy náš BOM na nejvyšší úrovni 5 položek a to nejvyšší celky sestav realizovaného modulu. Tyto jsou logickou cestou vybrány jako sestava laserového modulu, sestava fokusační čočky, sestava optického vlákna, sestava výstupu optického vlákna a základní deska modelu. Pro přehlednost je každá položka (celek, sestava, nákupní jednotka) označena názvem a také jedinečným číslem, tzv. PN (part number). Název nám o položce vypovídá její charakteristiku, název, objednávací číslo aj. PN unifikuje položku tak, aby nevznikla záměna s položkou stejného, či podobného názvu jinde v kusovníku. Navíc nám PN na první pohled definuje kusovníkovou úroveň, ve které se položka vyskytuje. V našem případě mají nejvyšší celky přiřazenu úroveň A (položky jsou pak A001 – A005). Dále v našem případě užíváme ještě úroveň B pro podsestavy a nižší celky a nejnižší úrovní v našem kusovníku je úroveň C.

Z obecného pohledu se nám v kusovníku budou vyskytovat položky nákupní (optické, mechanické aj.) a položky výrobní. Tyto položky je třeba ve vhodném programu (ProE,

AutoCad) navrhnout a výkresovou dokumentaci poté zadat vhodné firmě pro kalkulaci a výrobě. U zmíněných nákupových položek se v naší kalkulaci většinou opíráme o nabídku firmy Newport, která se zabývá dodávkou a distribucí prvků pro optoelektronické a optomechanické účely. Na stránkách této firmy jsou dostupné i ceny vybraných položek a je možné dobře provést potřebnou kalkulaci. Některé komponenty jsou pak vybrány u firem jiných (laser, beam expander aj.), zde je většinou nutné o cenovou nabídku zažádat.

Kusovník- model navazování	
P/N	Description
A001	Sestava Laserového modulu
A002	Sestava držáku fokusační čočky
A003	Sestava optického vlákna
A004	Sestava výstupu optického vlákna
A005	Základní deska modelu

Obrázek 32: Nejvyšší úroveň kusovníku

Nyní si blíže pohovoříme o položkách jednotlivých nejvyšších úrovní. U každého z vyšších celků navrhujeme vhodné komponenty a provedeme k tomuto výběru diskusi s důrazem na finanční nároky.

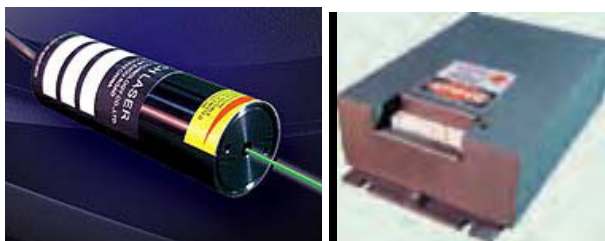
6.1 Sestava laserového modulu

Jak bylo zmíněno výše, první z nejvyšších úrovní našeho kusovníku je sestava laserového modulu, v našem případě jí přísluší PN A001. Tato sestava obsahuje 5 podsestav s úrovní B a k nim příslušející položky úrovně C. Podsestavy úrovně B jsou logicky vybrány tak, aby jejich nákup a následná montáž utvořili zřejmý celek uvažované sestavy. Kusovníková struktura sestavy laserového modulu je na obrázku 33.

Kusovník- model navazování					
P/N	Popis	Ks	Dodavatel + přímý odk	Cena	Cena (kč)
A001	Sestava Laserového modulu				
B001	Sestava laseru				
C001	Laser 532nm DPGL-3010F	1	Photop Suwtech, Inc.	10 000 Kč	10 000 Kč
C002	Laser power supply LDD-800A	1	Photop Suwtech, Inc.	2 000 Kč	2 000 Kč
C003	Laser mount	1			2 000 Kč
C004	V-Block VB-1	1	Newport	44 €	1 100 Kč
C005	Translation stage 9067-X-M	1	Newport	473 €	11 825 Kč
C006	Redukce pro uchycení Laser mount	1			3 000 Kč
B002	Karusel s filtry				
C007	sada filtru		Newport	185 €	4 625 Kč
C008	Karusel pro filtry		Newport	209 €	5 225 Kč
B003	Sestava L/2				
C009	L/2 fazova desticka	1	Newport	285 €	7 125 Kč
C010	Drzak Fazove desticky	1	Newport	194 €	4 850 Kč
C011	Redukce pro uchycení L2	1			1 000 Kč
B004	Sestava Beam expanderu				
C012	Beam Expander 532nm EXP0532-8X	1	Beam Expander	\$590	10 620 Kč
C013	Aperturní clona	1	Newport	95 €	2 375 Kč
C014	Redukce pro uchycení Beam Exp + Apertura	1			4 000 Kč
B005	Sestava základní desky				
C015	Základní deska	1			4 000 Kč
				Celková cena:	73 745 Kč
				Při kurzu CZK k EUR	25
				Při kurzu CZK k USD	18

Obrázek 33: Kusovníková struktura sestavy laserového modulu

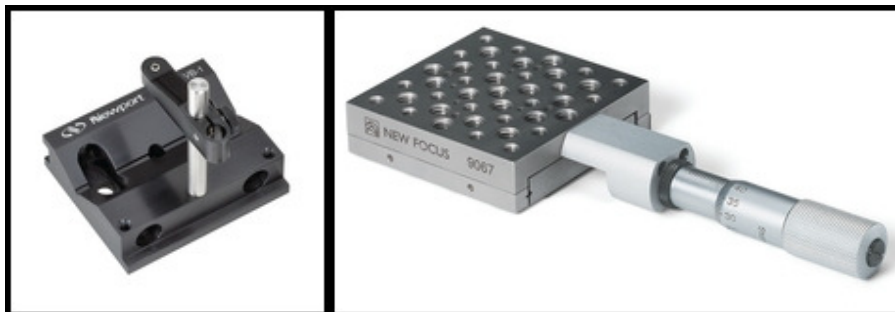
První sestavou úrovně B je sestava laseru obsahující laser, zdroj pro laser a mechanické prvky potřebné pro uchycení laseru a jeho nasměrování. Laser je v kalkulaci volen od firmy Suwtech. Mohli bychom jistě najít a zvolit kvalitnější a vhodnější laserový zdroj, avšak s ohledem na cenu a míru využití může být tato polovodičová dioda dostačující pro účely tohoto modelu. Přesto si vhodný kvalitnější zdroj uvedeme v závěrečné diskusi této kapitoly. Cenová náročnost této polovodičové diody není vysoká v porovnání s laserovými produkty jiných firem. K ceně laserové diody je třeba přidat částku za zdroj pro laser od stejné firmy. Tyto dva prvky tvoří neodmyslitelný celek (viz obrázek 34).



Obrázek 34: Laser a zdroj od firmy Suwtech

[http://www.phototech.com/main/products_jg/pdf/new/DPGL-3005F.pdf]

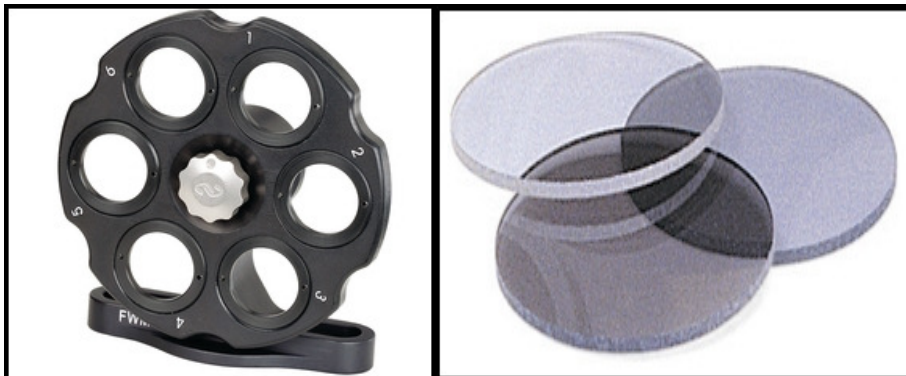
Další komponenty tohoto submodulu budou mechanické prvky sloužící k uchycení a částečnému pohybu laseru. Neboť je mechanika laseru kruhového tvaru, jako mechanika pro uchycení byl zvolen V-block, který zajistí vhodné uchycení tak, aby nedošlo k pohybu v průběhu práce s laserem. Dále uvažujeme nákup jednoho lineárního stolku, abychom byli schopni ovlivňovat příčnou osu lineárního směru záření. Tento lineární posuv aplikujeme na vodorovnou osu kolmou na směr šíření svazku.



Obrázek 35: Mechanika uchycení laseru + lineární posuvný stůl [www.newport.com]

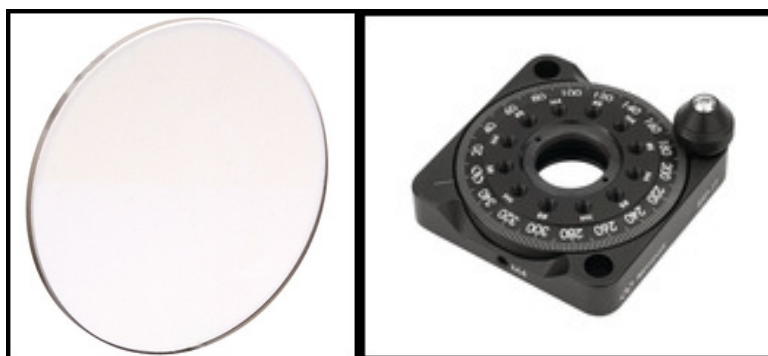
Dále je třeba vyprojektovat dvě mechanické položky. První jako redukci mezi V-blockem a lineárním stolkem, druhou jako redukci mezi lineárním stolkem a základnou sestavy laserového modulu. Druhou položku uvažujeme dle projektování základní desky. Při vhodném designu základní desky laserového modulu může být tato redukční mechanika případně i vynechána. Obecně je však nezbytné myslet na celkovou výšku umístění laseru, aby vyzařovaný laserový svazek byl v požadované výšce odpovídající výšce ostatních komponent modulu. Toto by mohlo být výrazně jednodušší přidáním dalšího (dalších) stupňů volnosti (lineárních, popř. úhlových posuvů). Každý takový posuv však výrazně zatěžuje rozpočtovou základnu, a proto se snažíme mít vždy posuvů právě jen nezbytný počet.

Druhou podsestavou úrovně B je karusel s filtry. Tato sestava obsahuje mechaniku karuselu (rotačního mechanického kola) s 6-ti pozicemi pro filtry. Jedno okno obvykle zůstává nezaplňeno, nebo by mělo být osazeno filtrem nulové hustoty. Dále máme také 5 pozic pro filtry různých hustot. Tyto filtry je možné nakupovat separátně a vytipovat filtry, které nám přímo vyhovují. Nebo můžeme, tak jako v našem případě, koupit sadu vhodných filtrů s širokým rozsahem hustoty. V našem případě se jedná o filtry s hustotou 0,04; 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5 OD. Filtry zamontujeme do filtrového kola pomocí vnitřních závitových kroužků. Umístění filtrů volíme s postupným zvyšováním hustoty, řazeno vzestupně.



Obrázek 36: Karusel pro filtry + sada filtrů [www.newport.com]

Třetí podsestavou úrovně B je sestava $\lambda/2$ fázové destičky. Tato sestava obsahuje mechaniku pro uchycení $\lambda/2$ fázové destičky v rotačním držáku, redukční mechaniku pro uchycení na základní desku a samotnou $\lambda/2$ fázovou destičku. Tuto jsme zvolili víceřádovou vyrobenou pro vybranou vlnovou délku 532nm z nabídky Newport. Držák, do kterého destičku uchytíme obdobným způsobem jako filtry do karuselu, umožňuje rotaci destičky v celém intervalu 360° s velkou citlivostí rotace.



Obrázek 37: Půlvlnná fázová destička + rotační držák [www.newport.com]

Čtvrtou podsestavou úrovně B je sestava BE. Tato sestava obsahuje samotný BE vybraný od firmy Beam expander se zvětšením 8 krát. Takové zvětšení nám zajistí dostatečné rozšíření svazku pro využití v sestavě. Následující komponentou je aperturní clona, která nám umožní selektovat požadovaný rozměr svazku. Aperturní clona je vybrána z nabídky firmy Newport. Dále je nutné k této sestavě vyrobit redukční mechaniku, která nám zajistí uchycení BE a aperturní clony v jeden celek. A také přichycení k základní desce.



Obrázek 38: BE + aperturní clona [www.newport.com]

Právě základní deska je pátou podsestavou úrovně B. Základní desku je třeba navrhnout velmi precizně a to tak, aby výška laserového svazku byla v požadované respektive vhodné výšce. Stejně také musí být základní deska navržena tak, aby i ostatní komponenty splňovali požadavky na výšku, aby laserový svazek procházel středem všech optických komponent. Toto platí samozřejmě i pro ostatní komponenty dále v našem modelu.

V součtu nám pak cena sestavy laserového modulu dává částku 73 745 Kč s ohledem na přepočítání měny. Zde uvažujeme, že ceny redukčních mechanik jsou odhadní, přesná cena by byla stanovena na základě vytvoření výkresů a obdržení nabídky od potenciálního výrobce. Celková cena sestavy není neúměrně vysoká, závisí zejména na volbě laserového zdroje záření. Zvolíme-li laser kvalitnější, odpovídající laseru z realizace modelu, pak musíme počítat s částkou lehce přesahující 100 000 Kč za tento laserový zdroj.

6.2 Sestava fokusační čočky

Jak bylo zmíněno výše, druhou z nejvyšších úrovní našeho kusovníku je sestava fokusační čočky, v našem případě jí přísluší PN A002. Tato sestava obsahuje 2 podsestavy s úrovní B a k nim příslušející položky úrovně C. V této sestavě jsou všechny komponenty vybrány z nabídky Newportu.

Kusovník- model navazování					
P/N	Popis	Ks	Dodavatel + přímý odk	Cena	Cena (Kč)
A002	Sestava držáku fokusační čočky				
B006	Sestava čočky				
C016	BK-7 Bi-Convex lens	1	Newport	43 €	1 075 Kč
C017	Držák čočky LH-1	1	Newport	16,30 €	408 Kč
B007	Sestava držáku fokusační čočky				
C018	Stojan pro čočku VPHV-2-F	1	Newport	10,40 €	260 Kč
C019	Vodící tyč M-SP-2	1	Newport	5,70 €	143 Kč
				Celková cena:	1 885 Kč
				Při kurzu CZK k EUR	25

Obrázek 39: Kusovník sestavy držáku fokusační čočky

První sestavou úrovně B je sestava čočky. Tato obsahuje optickou čočku a držák pro uchycení této čočky. Čočka byla vybrána z nabídky Newportu a to s vhodnými parametry pro naše využití. Jedná se o bi-konvexní čočku, je vrstvena pro vlnové délky 430nm – 700nm a její efektivní ohnisková vzdálenost je 100mm. Právě taková ohnisková vzdálenost je vhodným kompromisem pro náš model. Sestava čočky pak dále obsahuje mechaniku pro uchycení čočky.



Obrázek 40: Čočka + mechanika uchycení čočky [www.newport.com]

Druhou podsestavou úrovně B je sestava držáku fokusační čočky. Zde jsou jednotlivé komponenty vybrány tak, aby umožnily pohodlné uchycení sestavy čočky k základně. Mechanika jako celek nám po složení umožní pohyb čočky ve výškové ose a umožní nám sladit středovou výšku čočky s výškou laserového svazku.



Obrázek 41: Stojan pro uchycení čočky [www.newport.com]

Sestava fokusační čočky nám v kalkulaci dává částku 1885 Kč. Tato sestava je nejlevnější sestavou našeho modelu.

6.3 Sestava optického vlákna

Další sestavou s nejvyšší úrovní našeho kusovníku je sestava optického vlákna, v našem případě jí přísluší PN A003. Tato sestava obsahuje 2 podsestavy s úrovní B a k nim příslušející položky úrovně C.

Kusovník- model navazování					
P/N	Popis	Ks	Dodavatel + přímý odk	Cena	Cena (Kč)
A003	Sestava optického vlákna				
B008	Světlovod Lumatec Series 380, diam. 5mm, 1m	1	Lumatec	7 000 Kč	7 000 Kč
B009	Sestava uchycení světlovodu				
C020	Adaptive base plate	1			3 000 Kč
C021	Translation stage 9067-X-M	2	Newport	946 €	23 650 Kč
C022	translation mount	1			3 000 Kč
C023	Rotation stage M-RS40	1	Newport	333 €	8 325 Kč
C024	V-Block VB-1	1	Newport	44 €	1 100 Kč
C025	Rotation mount	1			2 000 Kč
				Celková cena:	48 075 Kč
				Při kurzu CZK k EUR	25

Obrázek 42: Kusovník sestavy optického vlákna

První podsestavou je samotné optické vlákno. Vybrali jsme optické vlákno (světlovod) od firmy Lumatec. Typ Series 380 je velmi vhodný pro naše účely díky své široké škále přenosových vlnových délek ve viditelné oblasti. U tohoto vlákna si můžeme volit jeho délku i průměr z několika variant. Vzhledem k realizaci v předchozí kapitole se ukazuje jako vhodná délka vlákna 1m a průměr jádra 5mm. Numerická apertura tohoto světlovodu je $NA = 36^\circ$. Jako případnou alternativu je možné vybrat také světlovod z nabídky firmy Newport.

Vhodný může být například Liquid light guide, 340-800nm, 0,2inch průměr, 2,4inch rádius, 39,4inch délka (Model 77568) v ceně 183 € [7].

Druhou podsestavou je poté sestava uchycení světlovodu. Pro samotné uchycení využijeme V-block navržený již pro uchycení laserové diody. Tento V-block bude připevněn na rotační stolek, také navrhnuty u firmy Newport. Tento rotační stolek nám umožní rotační pohyb čela optického vlákna a to tak, že jsme schopni precizně zaznamenávat míru pohybu ve stupních odečtem na stupnici rotačního stolku.

Rotační stolek je vhodně navrženou pravoúhlou mechanikou připevněn k jednomu ze dvou lineárních stolků sestavy. Tento lineární stolek nám umožní pohyb v y-ové ose, tzn. zajistí nastavení výšky optického vlákna a také jeho adaptaci na výšku laserového svazku. Tento lineární stolek se pomocí vhodně navržené pravoúhlé mechaniky připevní ke druhému lineárnímu stolku. Tento umožní kompenzaci rotačního stolku při naklánění čela optického vlákna a samozřejmě také pomůže při samotné adaptaci vlákna na vstup laserového záření do optického vlákna. Připevnění celé mechaniky k základně může být docíleno buď přímo, nebo pomocí vhodně navržené mechaniky.



Obrázek 43: Rotační stolek + lineární stolek + V-block [www.newport.com]

Cena sestavy optického vlákna je odhadnuta na 48 075 Kč. Drobné změny ceny jsou možné dle návrhu a kalkulace redukčních mechanik.

6.4 Sestava výstupu optického vlákna

Poslední výraznou sestavou s nejvyšší úrovní našeho kusovníku je sestava výstupu optického vlákna, v našem případě jí přísluší PN A004. Prvky této sestavy netvoří kompaktní celek jako u předchozích sestav. V sestavě jsou obsaženy 3 prvky úrovně B a to mechanika pro uchycení výstupu optického vlákna, PM a polarizační hranol.

Kusovník- model navazování					
P/N	Popis	Ks	Dodavatel + přímý odk	Cena	Cena (Kč)
A004	Sestava výstupu optického vlákna				
B010	Sestava stojanu pro optické vlákno				
C026	Držák vodící tyče M-VPH-2	1	Newport	8,50 €	213 Kč
C027	Vodící tyč SP-3	1	Newport	5,70 €	143 Kč
C028	Držák pro sensor CA-1	1	Newport	11,50 €	288 Kč
C029	Základna pro držák M-PS-A	1	Newport	9,50 €	238 Kč
B011	Powermeter + Sensor	1			
C030	Powermeter Ophir Nova II	1	ophir Nova II	36 470 Kč	36 470 Kč
C031	Photo-diod head PD300	1	Photo-diod head	21 240 Kč	21 240 Kč
B012	Polarizing beamsplitter 05BC16PC.3	2	Newport-CVI	482 €	12 050 Kč
			Celková cena:		70 640 Kč
			Při kurzu CZK k EUR		25

Obrázek 44: Kusovník sestavy výstupu optického vlákna

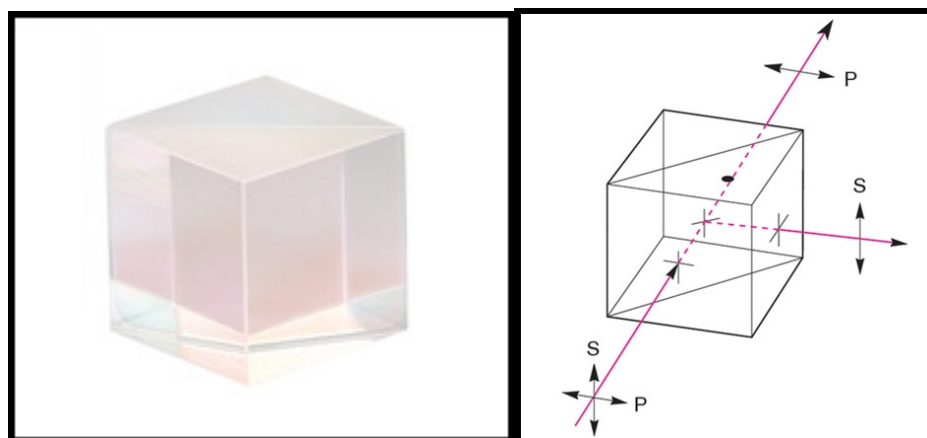
Mechanika výstupu optického vlákna je souborem čtyř komponent vybraných z nabídky Newportu tak, že jako celek tvoří pohyblivý stojan pro upevnění výstupu s nastavitelnou výškou. Vlákno je možno uchytit a využít volnosti tohoto stojanu, aby nedocházelo k tenzi na výstup ani průběh vlákna.

Druhou sestavou je PM. Jako vhodný typ PM je navržen typ Nova II od firmy Ophir. Tento univerzální a sofistikovaný přístroj je možné využívat v široké škále vlnových délek. Měření je možno zobrazit jak ve výkonové škále (od pW do tisíců W), tak ve škále energií (od pJ do stovek J). Hodnoty je možno zobrazovat analogicky i digitálně. Mnohé možnosti poté může otevírat možnost propojení přístroje s PC a tedy využití a zpracování měřených dat vhodně vytvořeným programem. Škála měřených vlnových délek i měřených výkonů je však omezena výběrem vhodného typu sensoru. Sensor má vždy užší interval nežli PM. Tudíž vhodná volba sensoru je nezbytná pro správné využití možností PM. Jako vhodný sensor je možné doporučit Photo-diod head PD-300 taktéž od firmy Ophir. Tento sensor pracuje v rozsahu vlnových délek 350nm – 1100nm a při výkonech menších než 3 mW. Sensor je však dodáván s hustotním filtrem, který umožní rozšířit jeho výkonový rozsah až k výkonům v řádech desítek až stovek mW. Foto PM a sensoru je na obrázku 38.



Obrázek 45: PM Ophir NOVA II + sensor PD-300 [www.newport.com]

Poslední důležitou součástí je PBS hranol. Vzhledem k návrhu modelu a výběru laseru s nižší kvalitou polarizace uvažujeme v kalkulaci se dvěma kusy hranolů. Pro naše potřeby byl vybrán PBS z nabídky Newport. Tento hranol je kubický o hraně 0,5 palce, tzn. 12,7mm. Tento rozměr je vzhledem k průměru optického vlákna dostačující. Vzhledem k tomu, že se vzrůstajícím rozměrem vzrůstá také cena, bereme rozměr hranolu vzhledem k průměru optického vlákna jako dostačující. Struktura hranolu je navržena právě pro práci při 532nm, kde je jeho extinkční poměr garantován jako 1000:1, což je velmi dobrá hodnota pro naše účely.



Obrázek 46: PBS hranol z nabídky Newport [www.newport.com]

Nejvyšší část ceny této sestavy tvoří PM a senzor. Cena celé sestavy je 70 640 Kč a je tak druhou nejdražší sestavou.

6.5 Sestava základní desky modelu

Pátou sestavou našeho modelu je sestava základní desky modelu. Varianty pro výběr základní desky modelu byly popsány v kapitole 4.3.5. V rámci kalkulace jsme zvolili nejjednodušší variantu a to Aluminium plate o rozměru 30cm x 60cm. Tento rozměr by měl pro pojmnutí sestav dostačovat. Přesto za zvážení rozhodně stojí zakoupení základní desky ve variantě breadboard. Levnější varianty breadboard o rozměru 60cm x 90cm se dají pořídit již okolo ceny 30 000 Kč, což vzhledem k velikosti je rozhodně ke zvážení.

Kusovník- model navazování					
P/N	Popis	Ks	Dodavatel + přímý odk	Cena	Cena (Kč)
A005	Základní deska modelu				
B013	Aluminium plate 300 x 600 M-SA2-12	1	Newport	261 €	6 525 Kč
B014	Spojovací materiál	1			2 000 Kč
				Celková cena:	8 525 Kč
				Při kurzu CZK k EUR	25

Obrázek 47: Kusovník sestavy základní desky modelu

Důležitou součástí celé sestavy modelu navazování zařízení do vlákna je spojovací materiál. Většinu komponent u firmy Newport je možné nakupovat v rozměrech metrických či palcových. V našem případě jsou všechny navrhované komponenty vybrány v metrické soustavě. Většinou jsou použity komponenty se spojovacími rozměry pro šrouby M4 a M6. Součástí spojovacího materiálu musí být tyto zmíněné šrouby a to v různých délkových rozměrech a podle návrhu redukčních komponent. Součástí spojovacího materiálu musí být také vhodné podložky, v našem případě je ideálního přichycení dosaženo s podporou kombinace pružné a ploché podložky. Vhodné se také jeví podložky DIN 127B a DIN 126 a to v rozměru M4 a M6.

Spotřební materiál jsme zahrnuly do sestavy základní desky a odhadli pro něj částku 2 000 Kč. Cena sestavy základní desky je 8 525 Kč, což není cena nijak vysoká. Nicméně stále platí, že by bylo vhodné doporučit zakoupení některého z breadboardů. Tento se vzhledem k velikosti dá uvažovat pro využití i k dalším podobným projektům.

6.6 Bilance nad cenou

V této kapitole si shrňme kapitoly předchozí a zejména jejich ceny. Kusovník na obrázku 48 shrnuje ceny jednotlivých sestav tak, jak byly stanoveny v předchozích kapitolách. Jako součet cen jednotlivých podsestav získáváme celkovou cenu modelu.

Kusovník- model navazování		
P/N	Popis	Cena
A001	Sestava Laserového modulu	73 745 Kč
A002	Sestava držáku fokusační čočky	1 885 Kč
A003	Sestava optického vlákna	48 075 Kč
A004	Sestava výstupu optického vlákna	70 640 Kč
A005	Základní deska modelu	8 525 Kč
	Celková cena:	202 870 Kč

Obrázek 48: Kusovník nejvyšších sestav

Celková cena našeho modelu je v základní verzi 202 870 Kč. Za tuto cenu je možné pořídit všechny komponenty a z nich složit kompletně celý model, který bude schopen splnit všechny body popsané v kapitole 4.2. Tato cena není příliš vysoká oproti původním předpokladům a mohla by být také únosná pro případnou realizaci.

Dle cenových možností a úvah o realizovatelnosti by bylo vhodné doporučit obohacení kalkulované sestavy o dvě změny. A to kvalitnější laser a vhodnější základní desku. Ve věci laseru bychom doporučili některý z DPSS laserů od firem Spectra Physics nebo Melles Griott. Tyto lasery se pohybují v ceně okolo 100 000 Kč. Při úvaze nad některým z těchto laserů by pak bylo nezbytné uvažovat změnu rozložení sestavy laserového modulu. Ve věci základní desky by bylo možné doporučit některý z breadboardů jako stabilní základnu i pro různé další experimenty.

Při uvažování těchto změn by se poté cena pohybovala okolo 350 000 Kč, avšak byl by získán zdroj záření i pracovní prostor použitelné pro další možné experimenty.

ZÁVĚR

V rámci diplomové práce se podařilo vytvořit model navazování laserového záření do optického vlákna. Tento model umožňuje praktickou realizaci a názornost procesů probíhajících při navazování záření.

Byly vytvořeny 3 varianty modelu dle úrovně obtížnosti realizovatelných měření, tj. model pro navazování výkonu do vlákna, model pro studium propustnosti, model pro studium polarizace. Také byly navrženy vhodné komponenty pro samotnou realizaci, tzn. sestava laseru, sestava fokusační čočky, sestava optického vlákna, sestava výstupu optického vlákna a jiné prvky modelu.

Dále se podařilo navržený model externě uskutečnit a to v míře všech tří navržených variant. Tato realizace proběhla primárně při vlnové délce 532nm, sekundárně pak v oblasti DUV (266nm).

V poslední části práce byla vytvořena kalkulace, která dává představu o finanční náročnosti realizace vytvořeného modelu. Dle cenových možností a úvah o realizovatelnosti by bylo vhodné použít kvalitnější laser a základní desku.

CONCLUSION

Model of the laser beam coupling into the optical fiber has been created in terms of this thesis. The model allows practical realisation and processes clearness which proceed by the radiation coupling.

Three options of the model by the difficulty of the measurements have been constructed i.e. model of the fiber coupling, model for transmission studies, model for polarisation studies. Useful components for the realisation have been proposed, i.e. laser assembly, focusing lens assembly, optical fiber assembly, optical fiber output assembly and other components.

Proposed options have been externally put into practice. Realisation was made primary at the 532nm wavelength, secondary at the DUV (266nm) part of the spectrum.

Costing has been made in the last part of the thesis. There would be better to use better quality of the laser and base plate by the cost options and realisation considerations.

SEZNAM ZKRATEK

BE	Beam expander, rozšiřovač svazku, kolimátor
BOM	Bill of material, soupis materiálu
DUV	Deep ultraviolet, oblast vlnových délek pod viditelnou částí elm. Spektra
ER	Extinction ratio, extinkční poměr
NA	Numerická apertura
OD	Optical density, optická hustota
PBS	Polarizing beamsplitter, polarizační hranol
PM	Powermeter, měřič výkonu
PN	Part number, číslo dílu

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Internetový zdroj: <http://ulb.upol.cz/prednasky/zua11/lasery.pdf>
- [2] Saleh, B. B. H., Teich, M. C.: Základy fotoniky 3, MATFYZPRESS, Praha 1994, ISBN 80-85863-02-2.
- [3] Vrbová, M.: Lasery a moderní optika, Prometheus, Praha 1994, ISBN 80-85849-56-9
- [4] Úlehla, L.: Navazování laserových svazků do optických vláken, Olomouc 2006. Diplomová práce na katedře optiky., PřF, UPOL.
- [5] Internetový zdroj: http://www.ray-optics.com/Polarization_Tutorial.pdf
- [6] Schröfel, J., Novotný, K.: Optické vlnovody, SNTL, Praha 1986.
- [7] Internetový zdroj: <http://www.newport.com>

PŘÍLOHA P I: KOMPLETNÍ KUSOVNÍK KALKULACE

Níže je uveden kompletní kusovník kalkulace včetně aktivních hypertextových odkazů.

Kusovník- model navazování				
P/N	Popis	Ks	Dodavatel + přímý odkaz	Cena (Kč)
A001	Sestava Laserového modulu			
B001	Sestava laseru			
C001	Laser 532nm DPGL-3010F	1	Photop Suwtech, Inc.	10 000 Kč
C002	Laser power supply LDD-800A	1	Photop Suwtech, Inc.	2 000 Kč
C003	Laser mount	1		2 000 Kč
C004	V-Block VB-1	1	Newport	1 100 Kč
C005	Translation stage 9067-X-M	1	Newport	11 825 Kč
C006	Redukce pro uchycení Laser mount	1	-	3 000 Kč
B002	Karusel s filtry			
C007	Sada filtrů		Newport	4 625 Kč
C008	Karusel pro filtry		Newport	5 225 Kč
B003	Sestava L/2			
C009	L/2 fázová destička	1	Newport	7 125 Kč
C010	Držák fázové destičky	1	Newport	4 850 Kč
C011	Redukce pro uchycení L/2	1		1 000 Kč
B004	Sestava beam expanderu			
C012	Beam expander 532nm EXP0532-8X	1	Beam Expander	10 620 Kč
C013	Aperturní clona	1	Newport	2 375 Kč
C014	Redukce pro uchycení beam exp + apertura	1	-	4 000 Kč
B005	Sestava základní desky			
C015	Základní deska laserového modulu	1	-	4 000 Kč
A002	Sestava držáku fokusační čočky			
B006	Sestava čočky			
C016	BK-7 bi-convex lens	1	Newport	1 075 Kč
C017	Držák čočky LH-1	1	Newport	408 Kč
B007	Sestava držáku fokusační čočky			
C018	Stojan pro čočku VPHV-2-F	1	Newport	260 Kč
C019	Vodící tyč M-SP-2	1	Newport	143 Kč
A003	Sestava optického vlákna			
B008	Světlovod Lumatec Series 380, diam. 5mm, 1m length	1	Lumatec	7 000 Kč
B009	Sestava uchycení světlovodu			
C020	Adaptive base plate	1	-	3 000 Kč
C021	Translation stage 9067-X-M	2	Newport	23 650 Kč
C022	translation mount	1	-	3 000 Kč
C023	Rotation stage M-RS40	1	Newport	8 325 Kč
C024	V-Block VB-1	1	Newport	1 100 Kč
C025	Rotation mount	1	-	2 000 Kč
A004	Sestava výstupu optického vlákna			
B010	Sestava stojanu pro optické vlákno			
C026	Držák vodící tyče M-VPH-2	1	Newport	213 Kč

C027	Vodící tyč SP-3	1	Newport	143 Kč
C028	Držák pro sensor CA-1	1	Newport	288 Kč
C029	Základna pro držák M-PS-A	1	Newport	238 Kč
B011	Powermeter + Sensor	1		
C030	Powermeter Ophir Nova II	1	ophir Nova II	36 470 Kč
C031	Photo-diod head PD300	1	Photo-diod head	21 240 Kč
B012	Polarizing beamsplitter 05BC16PC.3	2	Newport- CVI	12 050 Kč
			-	
A005	Základní deska modelu		-	
B013	Aluminium plate 300 x 600 M-SA2-12	1	Newport	6 525 Kč
B014	Spojovací materiál	1	-	2 000 Kč
			Celková cena:	202 870 Kč
			Při kurzu CZK k EUR	25
			Při kurzu CZK k USD	18