

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

NÁVRH ZRCADLOVÉHO KOLIMÁTORU PRO SVĚTELNÝ SVAZEK VYSTUPUJÍCÍ Z KABELU KŘEMENNÝCH VLÁKEN KRUHOVÉHO PRŮŘEZU

DESIGN OF A MIRROR COLLIMATOR FOR A LIGHT BEAM OUTGOING FROM A SILICA
FIBRES BUNDLE OF A CIRCULAR CROSS SECTION.

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JIŘÍ VODÁK

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

doc. RNDr. MILOSLAV OHLÍDAL, CSc.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav fyzikálního inženýrství

Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jiří Vodák

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

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

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

Návrh zrcadlového kolimátoru pro světelný svazek vystupující z kabelu křemenných vláken kruhového průřezu

v anglickém jazyce:

Design of a mirror collimator for a light beam outgoing from a silica fibres bundle of a circular cross section.

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Externím zdrojem světla pro zobrazovací digitální spektrofotometr zkonstruovaný na ÚFI FSI VUT v Brně je monochromátor TRIAX 320. Rozbíhavý světelný svazek z výstupní štěrby tohoto monochromátoru se volně šíří vystíněným prostorem mezi monochromátorem a spektrofotometrem. Z důvodu zvýšení světlotěsnosti a snadnější justáže soustavy monochromátor – spektrofotometr je nezbytné propojit výstupní štěrbinu monochromátoru a vstupní rovinu zobrazovací soustavy uvnitř spektrofotometru kabelem křemenných vláken (Předpokládá se měření i v UV oblasti spektra). Svazek záření vystupující z kabelu je rozbíhavý. Pro jeho další zpracování zobrazovací soustavou spektrofotometru je nutno jej kolimovat zrcadlovým kolimátorem.

Cíle bakalářské práce:

Na základě rešerše odborné literatury provést rozbor problému, který bude základem pro konstrukci zrcadlového kolimátoru svazku záření vystupujícího z kabelu křemenných vláken.

Seznam odborné literatury:

GLÉZL, Štefan, KAMARÁD, Josef, SLIMÁK, Ivan: Přesná mechanika. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1992. 720 s.

Vedoucí bakalářské práce: doc. RNDr. Miloslav Ohlídal, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 26.11.2009

L.S.

prof. RNDr. Tomáš Šíkola, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Abstrakt

Inovativní metodou ke zkoumání optických vlastností tenkých vrstev je metoda zobrazovací spektroskopické reflektometrie. Na rozdíl od spektroskopické reflektometrie umožňuje tato metoda zkoumání vlastností větších ploch vzorků. Na Ústavu fyzikálního inženýrství byl zkonstruován zobrazovací spektrofotometr, u kterého byla plánovaná zkoumaná plocha vzorků až 25 mm x 25 mm. Této velikosti však nebylo dosaženo. Předkládaná práce se zabývá návrhem úprav celého zařízení tak, aby bylo dosaženo uvedených rozměrů studované plochy povrchu. Řešení spočívá v navržení nové optické přenosové soustavy mezi zdrojem monochromatického světla a spektrofotometrem. Ta bude využívat optický kabel křemenných vláken uspořádaných takovým způsobem, že vstupní světelný svazek obdélníkového průřezu je transformován na svazek kruhového průřezu. Z kabelu pak vystupuje kuželový světelný svazek, který bude možné efektivněji kolimovat.

Summary

Imaging spectroscopic reflectometry is an innovative method for studying optical properties of thin layers. This method allows as studying large areas of thin layers. Imaging spectrophotometer designed in The Institute of Physical Engineering was supposed to allow measurements along areas of about 25 mm x 25 mm. However this area was not achieved. To achieve desired dimensions of the area under study it is necessary to redesign the optical transmission setup between a source of monochromatic light and the imaging spectrophotometer. The old spectrophotometer design consists only of a mirror collimator not sufficient enough to collimate a rectangle shaped light beam on the output of the monochromator. The new design will consist of optical cable of silica fibers transforming the rectangle input light beam into a light cone which will be easier to collimate by a mirror collimator.

Klíčová slova

návrh kolimační soustavy, optická vlákna, zobrazovací spektrofotometrie,

Keywords

design of collimating setup, optical fibers, imaging spectrophotometry

VODÁK, J. *Návrh zrcadlového kolimátoru pro světelný svazek vystupující z kabelu křemenných vláken kruhového průřezu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 20 s. Vedoucí doc. RNDr. Miloslav Ohlídál, CSc.

Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou práci vypracoval samostatně za odborného vedení mého vedoucího práce doc. RNDr. Miloslava Ohlídala, CSc. Dále prohlašuji, že všechny prameny, ze kterých jsem čerpal jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Jiří Vodák

Děkuji tímto mému vedoucímu práce doc. RNDr. Miloslavu Ohlídalovi, CSc. za odborné vedení, rady a konzultace při zpracovávání téma bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Radomíru Malinovi, Ph.D. za praktické rady a pomoc při uskutečněných měřeních.

Jiří Vodák

OBSAH

1	Úvod	2
2	Spektrofotometr	3
2.1	Spektroskopická reflektometrie	3
2.2	Konstrukce spektrofotometru	3
3	Specifikace navrhované osvětlovací sestavy	4
3.1	Základní problém	4
3.2	Požadavky na získaný svazek	4
3.3	První nástin	5
3.4	Rozšíření problému	6
4	Zemax	7
5	Optický návrh sestavy s kolimátorem	8
5.1	Sestava před vstupem optického kabelu	8
5.1.1	Výstupní štěrbina monochromátoru	8
5.1.2	Vstup optického kabelu	9
5.1.3	Divergence svazku monochromátoru	9
5.1.4	Postup návrhu sestavy před vstupem optického kabelu	10
5.2	Sestava za výstupem optického kabelu	15
5.2.1	Výstup optického kabelu	15
5.2.2	Kolimátor	16
6	Závěr	18

1. ÚVOD

V dnešní době je aplikační obor tenkých vrstev různých materiálů velmi široký (optický, elektronický, automobilový, fotovoltaický průmysl). Prostředky pro analýzu vlastností těchto vrstev jsou proto velmi významné. Jedním z nich je spektroskopická reflektometrie. S její pomocí jsme schopni určit tloušťku, index lomu a index absorpce tenké vrstvy. U většiny komerčních zařízení je studovaná plocha vrstvy velmi malá. Jedná se tedy o určování lokálních hodnot výše uvedených parametrů tenkých vrstev. Proto na Ústavu fyzikálního inženýrství byla realizována nová metoda zobrazovací spektroskopické reflektometrie. Tímto problémem se zabývala diplomová práce ing. V. Čudka [3], v rámci které byl navržen a realizován zobrazovací spektrofotometr schopný měřit průběh tloušťky a indexů lomu a absorpce studovaných vrstev v plánované ploše až 25 mm x 25 mm. Této velikosti studované plochy tenké vrstvy nebylo dosaženo. Důvodem byla skutečnost, že světelný svazek vystupující z monochromátoru (zdroj monochromatického světla pro zobrazovací spektrofotometr) je u stávajícího zobrazovacího spektrofotometru dostatečně kolimovaný (použitým zrcadlovým kolimátorem) jen při omezené výstupní štěrbině monochromátoru. Tím je dáno, že přístroj nevyužívá svůj plný potenciál. Úkolem této bakalářské práce je navrhnout vhodnější kolimační soustavu pro zobrazující světelný svazek, a to při využití optického kabelu křemenných vláken, která umožní nejen efektivnější přenos světla na delší vzdálenosti, ale také vzhledem ke své konstrukci zlepší kvalitu výsledného osvětlení vytvořeného novým zrcadlovým kolimátorem.

2. SPEKTROFOTOMETR

Aby bylo možné správně realizovat kolimační zařízení pro spektrofotometr, je nejprve nutné si přiblížit, na jakých principech je vystaven přístroj a jak funguje.

2.1. Spektroskopická reflektometrie

Přístroj, který je potřeba upravit (zdokonalit), je konstruován pro studium tenkých vrstev právě za pomoci spektroskopické reflektometrie. Tato metoda je založena na měření závislosti odrazivosti při konstantním úhlu dopadu světla, v tomto případě 0° . Tedy, že povrch vzorku je osvětlen světlem různých vlnových délek, kde každá vlnová délka vytvoří jiný interferenční obrazec, který je dán průběhem lokálního indexu lomu, lokálního indexu absorpce a průběhem tloušťky vrstvy. Také je závislý na úhlu dopadu světla, jak bylo zmíněno, konstrukčně je zajištěn kolmý dopad světelného svazku na studovaný vzorek. Z výsledných měření je nakonec možné rekonstruovat průběh tloušťky vrstvy v měřené oblasti, lokální index lomu a lokální index absorpce tenké vrstvy.

2.2. Konstrukce spektrofotometru

Spektrofotometr byl realizován v rámci diplomové práce Ing. V. Čudka [3], která byla součástí projektu GA ČR č. 101/04/2131 (Realizace laboratorního vzoru digitálního spektrofotometru pro širokou spektrální oblast). Spektrofotometr se skládá z monochromátoru Jobin Yvon Triax 320 jako zdroje monochromatického světla o nastavitelné vlnové délce a kamery Hamamatsu ORCA II jakožto detekčního zařízení. Optická sestava mezi těmito dvěma prvky je pak dílem Ing. Čudka. Světlo z monochromátoru vystupuje nastavitelnou štěrbinou jako divergentní svazek tvaru daného právě štěrbinou a je následně kolimován pomocí kulového zrcadla. Tento svazek je poté zpracován sestavou zrcadel, křemenných děličů a osvětluje studovaný vzorek při úhlu dopadu 0° . Osvětlená část povrchu s vrstvou je zobrazována kulovým zrcadlem na čip zmíněné CCD kamery (sestava děličů je doplněna kompenzačními členy, které zabraňují posuvu obrazu na čipu CCD kamery při změně vlnové délky, tj. eliminují disperzi děličů.) Celá sestava je navržena tak, aby bylo možné zkoumat vzorek až o rozměrech 25 mm x 25 mm. Toto také měla být výhoda celého zařízení, ale této maximální plochy se nepodařilo dosáhnout.

3. SPECIFIKACE NAVRHOVANÉ OSVĚTLOVACÍ SESTAVY

Aby bylo možné přejít k návrhu nové osvětlovací sestavy, případně provést optimalizaci stávající, je potřeba určit, v čem spočívají úskalí dosavadní konstrukce a co je třeba na ní změnit.

3.1. Základní problém

Jak bylo zmíněno v úvodu této práce, stávající osvětlovací sestava zobrazovacího spektrofotometru je nedostatečná. Její zásadní nedostatek spočívá v kolimátoru, který je tvořen jedním kulovým zrcadlem. Kolimovaný svazek si je možné představit tak, že se jeho paprsky protínají v nekonečnu, jedná se proto o zobrazení do nekonečna. Podle zobrazovací rovnice:

$$\frac{2}{r} = \frac{1}{a'} + \frac{1}{a}.$$

Kde r je poloměr zrcadla, a' je obrazová a a je předmětová vzdálenost. Pro kulové zrcadlo z toho vyplývá, že se předmět musí nacházet v předmětovém ohnisku zrcadla. V ideálním případě by zdrojem světla měl být bod na ose (Pozn.: problematika geometrické optiky je popsána např. v [4], zobrazení zrcadly str. 178, v celém textu je pak dodržována také stejná znaménková konvence jako ve zmíněném svazku, str. 99). Výstup monochromátoru je realizován pomocí nastavitelné štěrbinou, která se bodu na ose blíží pouze tehdy, když je téměř uzavřená. To je zase limitující pro intenzitu vystupujícího světla, což negativně ovlivňuje expozici CCD čipu a snímky jsou pak zatíženy značným šumem. Průměr kolimátorem vytvořeného svazku je závislý na poloměru použitého zrcadla a hlavně na divergenci kolimátorem zpracovávaného svazku. Stávající kolimátor takto vytváří svazek menší, než je potřeba pro osvětlení celé plánované plochy vzorku. Zobrazení interference na povrchu vrstvy se proto nezobrazuje na celou plochu CCD čipu kamery a pak není využita její plná kapacita.

3.2. Požadavky na získaný svazek

Byly tedy specifikovány problémy stávajícího osvětlovacího systému a nyní je potřeba určit, jaké by měly být jeho nové parametry. V první řadě by svazek měl být kolimovaný a dostatečně velkého průřezu, aby bylo možné využít celou plochu CCD čipu (12,5 mm x 12,5 mm) a studovat tedy vzorky o rozměrech až 25 mm x 25 mm. Tato transformace rozměrů je umožněna využitím zobrazovací sestavy spektrofotometru, kdy je zobrazení na čip CCD kamery realizováno mimo jiné kulovým zrcadlem při zvětšení 1:2. Přestože je tvar svazku vystupujícího z monochromátoru dán výstupní štěrbinou, která má obecně tvar obdélníku, svazek použitý k měření bude kruhového průřezu. To je dáno vlastnostmi optického kabelu křemenných vláken, který bude použit v nové sestavě. Protože bude svazek kruhového průřezu, měl by v ideálním případě jeho průměr odpovídat úhlopříčce čtvercového vzorku. Tento rozměr je možné určit jednoduše pomocí Pythagorovy věty:

3. SPECIFIKACE NAVRHOVANÉ OSVĚTLOVACÍ SESTAVY

$$D = \sqrt{l^2 + l^2} = \sqrt{2} \cdot l = \sqrt{2} \cdot 25 = 35,36 \text{ mm.} \quad (3.1)$$

D je hledaný průměr svazku a l je délka strany čtverce. Pro další výpočty byly pak užívány hodnoty 36 mm, aby se k osvětlení nepoužívaly okraje svazku.

Již několikrát byla v předešlých odstavcích zmíněna potřeba užití kolimovaného svazku. Bylo by vhodné objasnit, proč je ho zapotřebí. Požadavek na kolimovaný svazek, tedy aby všechny paprsky světla ve svazku byly rovnoběžné, je dán následující skutečností:

- při vyhodnocování interferenčního jevu na vrstvě předpokládáme kolmý dopad rovinné vlny na vrstvu,
- použití divergentního světelného svazku při zobrazení interferenčního jevu ve vrstvě na CCD čip by vedlo k energetickým ztrátám.

Měřený interferenční jev na zkoumané vrstvě závisí nejen na hledaných hodnotách indexu lomu, indexu absorpce a tloušťce vrstvy v daném místě, ale závisí rovněž na vlnové délce použitého světla. Metoda zobrazovací spektrofotometrie získává potřebné údaje i ze změny interferenčního jevu s měnící se vlnovou délkou. Z toho vyplývá i potřeba měření v co největším rozsahu vlnových délek. Veškeré použité optické prvky ve spektrofotometru musí být schopny pracovat v širokém spektru vlnových délek. Z tohoto důvodu je nevhodné použití refraktivních optických prvků kvůli disperzi světla ve skle. Tento problém odpadá u reflexních prvků. Vše bude tedy pokud možno konstruováno za použití zrcadel. Je však třeba dbát na to, aby použitá zrcadla měla co nejrovnoměrnější odrazivost v rámci použitého spektra (aby nedocházelo ke ztrátám intenzity pro některé vlnové délky). Z běžných odrazivých materiálů je pro tuto aplikaci vhodný prakticky pouze hliník, neboť u zlata i stříbra výrazně klesá odrazivost při vlnových délkách pod 400 nm, zatímco zobrazovací spektrofotometr je stavěn pro použití ultrafialového záření o vlnových délkách už od 200 nm. Široké spektrum použitých vlnových délek samozřejmě ovlivnilo i volbu materiálu optického kabelu. Ten je z křemenného skla (obdobně jako dříve zmíněné děliče), protože běžná skla nepropouští UV záření v dostatečném rozsahu. Dalším požadavkem je, aby měl svazek homogenně rozloženou intenzitu v celém průřezu. Tento parametr není zásadní, protože je možné rozdílnost intenzity v průřezu kompenzovat softwarově odečtením obrazu referenčního vzorku získaného za stejných podmínek. Nicméně i tento požadavek je dobré zohlednit pro lepší přesnost získanou přístrojem.

3.3. První nástin

Hlavním úkolem návrhu měla být pouze kolimace světelného svazku vycházejícího z optického kabelu křemenných vláken, jehož materiál je zvolen s ohledem na využití co nejširšího pásma vlnových délek. Myšlenka celé úpravy zařízení spočívala v tom, že na výstup monochromátoru se umístí vstup optického kabelu. Vlákná kabelu jsou na jeho vstupu uspořádána do obdélníku, dále jsou v kabelu náhodně promíchána a na výstupu uspořádána do kruhu. Tím se zajistí homogenita intenzity v průřezu výstupního světelného svazku. Takto vytvořený kužel světla by se pak zpracoval kolimátorem ve svazek rovnoběžný. Vzhledem k potřebě kolimovat světlo ze širokého oboru vlnových délek, jak již bylo zmíněno, bude použit kolimátor zrcadlový. Ten by se tedy skládal z jednoho či více zrcadel, pravděpodobně sférických, případně parabolických, pomocí kterých by se vytvořil potřebný kolimovaný svazek.

3.4. Rozšíření problému

Zásadním parametrem pro navržení kolimátoru je rozbíhavost vstupního svazku, protože od ní se odvíjejí všechny ostatní parametry sestavy, která má vytvořit kolimovaný svazek určitého průměru. Prvním krokem tedy bylo po navázání svazku z monochromátoru alespoň orientačně změřit rozbíhavost svazku vystupujícího z optického kabelu křemenných vláken, aby bylo možné získat představu o uspořádání jednotlivých optických součástí v sestavě. Měření samotné však poukázalo na nový problém. Použitý optický kabel není přímo kompatibilní s výstupem monochromátoru. Fakt, že jej není možné přímo připevnit ke konstrukci monochromátoru, nebyl příliš neočekávaný, ale vstup kabelu je výrazně jiných rozměrů než výstupní štěrbina monochromátoru. Je tedy potřeba nejprve světelný svazek vystupující z monochromátoru upravit ke vstupu do optického kabelu, jinak by došlo k velké ztrátě intenzity světelného svazku, což by bylo nevhodné. Kvůli nízké intenzitě by expozice kamery musela být delší a měření by bylo více zatíženo šumem.

4. ZEMAX

Celý návrh optické sestavy byl vytvářen za pomoci specializovaného softwaru, a proto bude vhodné tento nejprve přiblížit. Jak zní název této kapitoly, jedná se o program Zemax. Zemax je nástroj pro navrhování optických systémů umožňující nejen simulovat navrženou optickou sestavu, ale také ji podle požadavků uživatele optimalizovat (optimalizace spočívá ve využití matematických iteračních metod k získání co nejlepšího výsledku, jde o minimalizaci tzv. merit funkce, ve které figurují podstatné parametry optimalizovaného optického systému). Pro zvýšení efektivity nabízí tento program více režimů práce. K návrhu byly používány dva z nich, sekvenční a nesequenční (tyto jsou pojmenovány přesně podle způsobu jejich funkce). Sekvenční mód pracuje tím způsobem, že již při návrhu je dané, jakým způsobem jsou za sebe jednotlivé optické plochy řazeny a program při vyhodnocování optické sestavy postupuje sekvenčně, od jedné plochy ke druhé. Výhodou tohoto módu je větší rychlost práce a širší možnosti optimalizace. Na druhou stranu, pokud uživatel umístí některou lámavou plochu nevhodně (například pokud je vnořena do jiné či „zaclání“), program toto nezjistí a všechny světelné paprsky vždy prochází plochami v pořadí, v jakém byly nadefinovány. Tyto vady jsou však jednoduše detekovatelné, a proto není problém se touto vyhnout. Z důvodu nutnosti návaznosti pořadí jednotlivých ploch tento režim neumožňuje např. vícenásobný průchod svazku jednou lámavou (resp. odrazivou) plochou nebo rozdělení svazku do více větví. Nesequenční mód nabízí mnohem širší možnosti, ale za cenu ztráty rychlosti výpočtu. V tomto módu není přesně definované pořadí optických ploch. Simulace optické sestavy probíhá trasováním jednotlivých paprsků vycházejících ze zdroje (ten je přesně definován uživatelem). Pro získání co největší přesnosti je tedy potřeba trasovat velké množství paprsků, což je výpočetně náročný proces. Na druhou stranu tento režim umožňuje návrh, či simulaci takřka jakýchkoliv optických zařízení s takřka neomezenými možnostmi. Při návrhu optické sestavy pro spektrofotometr bylo použito obou módů, většinou sekvenčního jako rychlý prvotní návrh s následným vymodelováním sestavy v nesequenčním módu pro lepší zmapování vytvořené světelné stopy.

5. OPTICKÝ NÁVRH SESTAVY S KOLIMÁTOREM

V předchozích oddílech byly určeny požadavky na finální svazek světla (který bude použit v zobrazovací sestavě spektrofotometru), kterých je potřeba dosáhnout, nebo se k nim co nejvíce přiblížit. Nejprve bude vhodné parametry ještě jednou stručně vyjmenovat. Svazek tedy musí být:

- kolimovaný pro široké spektrum vlnových délek,
- vhodný k osvětlení plochy 25 mm x 25 mm, jeho průměr by tedy měl být 36 mm,
- musí mít homogenně rozloženou intenzitu světla ve svém průřezu.

Celá konstrukce přenosové sestavy z monochromátoru do spektrofotometru bude stavěna tak, aby tyto požadavky byly co nejlépe splněny. Protože hlavní nosný prvek je optický kabel, jehož parametry jsou již dány, vlastní konstrukce se bude skládat ze dvou částí: sestava před vstupem optického kabelu a sestava za jeho výstupem. Sestava na vstupu optického kabelu křemenných vláken slouží k zobrazení výstupní štěrbinu monochromátoru na vstup optického kabelu (pro přenos co největší intenzity zdrojového monochromatického osvětlení). Část za výstupem kabelu bude již samotný kolimátor, pomocí něhož bude vytvořen požadovaný rovnoběžný svazek.

5.1. Sestava před vstupem optického kabelu

Konstrukce celé přenosové sestavy není pouze závislá na požadavcích na výstupní svazek, ale také se odvíjí od vlastností již existujících součástí celého systému. Z tohoto důvodu byla nejprve navrhována sestava na výstupu monochromátoru. Ta není ani tak závislá na požadavcích na výsledný kolimovaný svazek, jako na parametrech monochromátoru a optického kabelu. Tyto klíčové parametry jsou:

- rozměry výstupní štěrbinu monochromátoru,
- rozměry vstupu optického kabelu,
- divergence svazku (na rozdíl od výše uvedených by bylo možné v některých případech tento parametr neuvažovat).

Rozměry výstupní štěrbinu monochromátoru byly uvedeny jeho výrobcem, ale divergenci vystupujícího svazku bylo nejprve potřeba změřit. Rozměry vstupu optického kabelu bylo třeba také určit, a to z parametrů daných výrobcem.

5.1.1. Výstupní štěrbina monochromátoru

Výstupní štěrbina monochromátoru je elektricky ovládaná, je možné nastavovat její šířku, a to v tisíci krocích, kde největší možné otevření představuje 2 mm. Na výšku má štěrbina stejný rozměr, ten se však již nedá zmenšit. Jelikož se tento čtverec, respektive

obdélník, bude zobrazovat optickou sestavou na vstup optického vlákna, je potřeba určit, na jakou hodnotu šířky štěrby je třeba tuto sestavu navrhnout. Menší štěrbina zaručuje vyšší monochromaticnost světelného svazku, ale na úkor jeho intenzity. Z praktických zkušeností dřívějších měření s použitím původní optické sestavy přístroje se ukazuje nejvýhodnější nastavení na 300 kroků, tedy na rozměr 0,6 mm

5.1.2. Vstup optického kabelu

Aby byla zachována co největší intenzita světelného svazku vycházejícího z monochromátoru, je potřeba, aby co největší část vystupujícího svazku dopadala na plochu o rozměrech vstupu optického kabelu. Proto je třeba znát rozměry této části kabelu. Optický kabel, pro který je optická sestava navrhována, se skládá z 19 vláken, které jsou na jednom konci poskládány do obdélníku a na druhém konci jsou promíchány a seskupeny do kruhu. Každé vlákno má průměr 200 mikrometrů a vzdálenost mezi středy vláken je 240 mikrometrů. Z těchto informací je možné určit rozměry vstupní štěrby kabelu na 0,2 mm x 4,5 mm. Vlákná jsou uspořádána nad sebe v jednom sloupci.

5.1.3. Divergence svazku monochromátoru

Pokud se při návrhu optické sestavy uvažuje pouze zobrazení v paraxiálním prostoru, není potřeba znát divergenci svazku. Parametry, které ovlivňují zobrazení, jsou pouze předmětová a obrazová vzdálenost a ohnisková vzdálenost zrcadla. Aby však byly zaručeny co nejmenší ztráty intenzity světla, je potřeba, aby zobrazovací sestava zachytila všechny paprsky vycházející ze štěrby monochromátoru, a to je možné zaručit pouze v případě známé divergence svazku. Divergenci výstupního svazku monochromátoru bylo proto nejprve potřeba změřit. Měření probíhalo při plně otevřené štěrbině, tedy 2 mm x 2 mm. V tomto nastavení nebyl svazek omezen štěrbinou, ale jedním ze zrcadel uvnitř samotného monochromátoru, které bylo kruhového průřezu. Měřený svazek měl tedy také kruhový průřez. Divergenci svazku je možné určit jako vrcholový úhel komolého kužele, kdy podstavy jsou stopy vytvořené svazkem ve dvou místech na ose svazku v různých vzdálenostech a výška kužele je rozdíl jejich poloh. Změřením průměru světelné stopy vytvořené na stínítku ve dvou různých vzdálenostech byly získány všechny parametry potřebné pro výpočet divergence svazku. K tomuto bylo použito jednoduché sestavy. Podélně s osou výstupního svazku byla umístěna optická lavice a na koník bylo upevněno stínítko. Vzdálenost poloh byla zajištěna pomocí zarážek na optické lavici, vzdálenosti od štěrby není třeba znát:

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{D_2 - D_1}{2 \cdot L} \Rightarrow \phi = \operatorname{arctg} \frac{D_2 - D_1}{2 \cdot L} \quad (5.1)$$

kde D_2 je větší podstava kužele, D_1 je menší podstava kužele a L je výška komolého kužele. Polohy stínítka byly od sebe vzdáleny konstantní hodnotu 80 mm, více neumožňovala ani optická lavice, ani omezený prostor u monochromátoru.

Naměřené hodnoty lze nalézt v tabulce 5.1 Z těchto hodnot byla určena hodnota divergence na $(3,2 \pm 0,2)^\circ$. Hodnota $\pm 0,2^\circ$ představuje nejistotu typu A určenou z 5 opakovaných měření.

Jednalo se v zásadě o orientační měření, protože pouhý obraz světelné stopy na stínítku neumožňuje přesné měření jeho průměru. V tomto případě byly okraje osvětleného kruhu

5.1. SESTAVA PŘED VSTUPEM OPTICKÉHO KABELU

Poloha 1 / mm	Poloha 2 / mm	Divergence / °
8,6	26	3,10
8,2	25,5	3,09
8,1	27,7	3,49
8,4	25,9	3,12
8,1	27,5	3,46

Tabulka 5.1: Naměřené průměry stop světelného svazku na stínítku ve dvou různých polohách, z nich určené úhly divergence světelného svazku

vyznačovány na stínítku tužkou, což bylo obtížné a nepřesné. Zvýšení přesnosti měření by bylo možné dosáhnout např. využitím CCD kamery nebo expozicí fotografické desky.

5.1.4. Postup návrhu sestavy před vstupem optického kabelu

Z rozměrů výstupní štěrby monochromátoru a vstupu optického kabelu je zřejmé, že tato první část sestavy bude zobrazovat štěrbinu výstupu monochromátoru na vstup optického kabelu se zmenšením. První návrh spočíval v užití nejjednoduššího optického zobrazení užitím sférického zrcadla:

Jedno sférické zrcadlo

Používaná šířka štěrby monochromátoru je 0,6 mm a této šířce odpovídá šířka vstupu optického kabelu rovná 0,2 mm. Jde tedy o zobrazení 1:3. Vzhledem k tomu, že tohoto zvětšení je možné docílit jakýmkoli sférickým zrcadlem, byla sestava navrhována pro několik komerčních zrcadel z katalogu firmy Thorlabs, Inc. [1] (str. 685) v programu Zemax. V témže programu byly i sestavy vyhodnocovány. Předběžné hodnoty rozměrů sestavy byly určeny s využitím geometrické optiky:

$$\beta = -\frac{a'}{a} \quad (5.2)$$

$$\frac{2}{r} = \frac{1}{a'} + \frac{1}{a} \quad (5.3)$$

Kde a je předmětová vzdálenost, a' je obrazová vzdálenost, β je zvětšení zobrazení a r je poloměr zrcadla. Z této soustavy dvou rovnic o dvou neznámých (známy jsou požadované zvětšení a poloměr, ten je dán rozměry komerčně prodáváných zrcadel) se lehce určí rozestavení komponent.

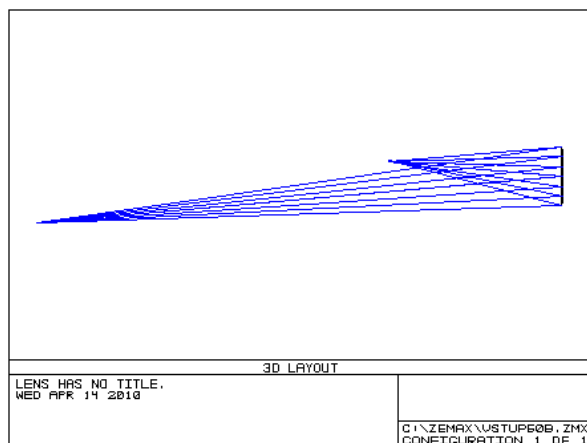
Poloměr / mm	a / mm	a' / mm
25	50	16,67
50	100	33,33
75	150	50
100	200	66,67
150	300	100
200	400	133,3

Tabulka 5.2: Předmětová a obrazová vzdálenost pro vybraná zrcadla

Výsledné hodnoty a a a' pro vybrané poloměry zrcadel jsou v tabulce 5.2

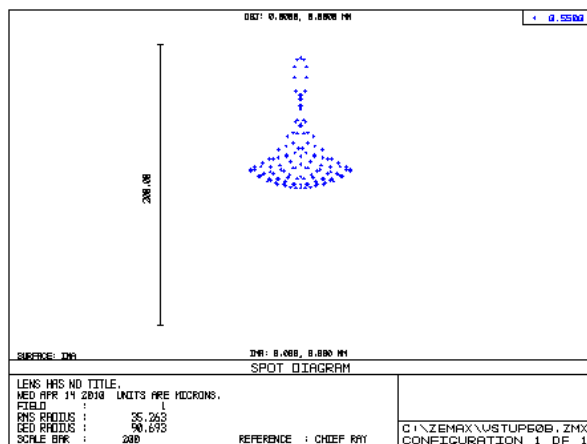
5. OPTICKÝ NÁVRH SESTAVY S KOLIMÁTOREM

Tuto nejjednodušší sestavu bude vhodné také využít k porovnání výstupu obou módů Zemaxu, a to pro lepší představu o výsledcích v dalším postupu. Na obrázku 5.1 je znázorněna optická sestava vyobrazená v sekvenčním módu. Ze zdrojového bodu světla prochází paprsky sestavou až do místa obrazu.



Obrázek 5.1: Sestava s jedním zrcadlem v sekvenčním módu

Na obrázku 5.2 lze pak dále vidět tzv. spot diagram, který znázorňuje, jak bude vypadat výsledný obraz bodu ležícího na optické ose. Každý bod v diagramu znázorňuje jinou trasu světelného paprsku. Odtud je zřejmé, že bod se v první řadě nezobrazí jako bod (což je očekávané, neboť nejde o ideální optickou sestavu), ale také, že celý obraz bude zatížen nejvýrazněji komou.

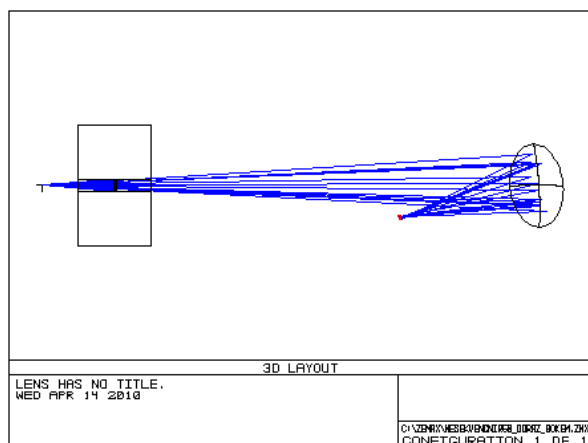


Obrázek 5.2: Spot diagram jednoho sférického zrcadla

Sekvenční režim Zemaxu nabízí také další možnosti vyhodnocení optické sestavy (např. klasifikaci zobrazovacích vad), je tedy ideální pro návrh zobrazovací sestavy. Neumožňuje ale např. přesnou definici světelného zdroje (rozbíhavost svazku atd.), nebo rozdělení svazku, případně vícenásobný lom/odraz na jedné optické ploše a je proto méně vhodný pro iluminační aplikace. K tomuto účelu je vhodnější nesequenční režim.

Ten také umožňuje vyobrazit sestavu realističtěji, obzvláště díky možnosti modelování takřka libovolných tvarů lámavých či odrazných ploch, čemuž napomáhá i možnost vložení modelů takovýchto ploch z různých CAD nástrojů. Na obrázku 5.3 je možné vidět štěrbinu před zdrojem (tu by v sekvenčním módu nebylo možné vymodelovat, byť jde o jednoduchý útvar) a půjde tedy zkoumat přímo světelnou stopu vytvořenou zobrazením štěrbinu. Světelná stopa se vykresluje pomocí „detektoru“ (lze si ho představit jako stínítko), který

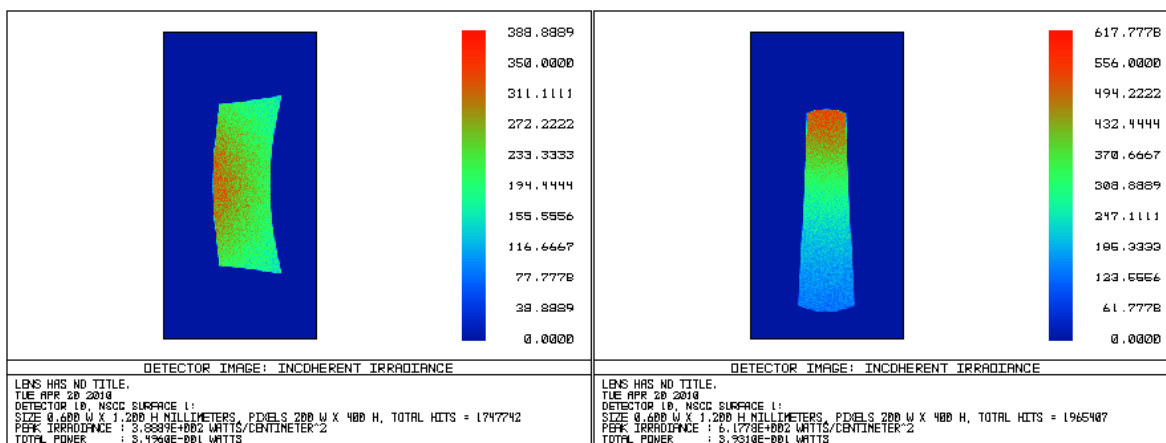
5.1. SESTAVA PŘED VSTUPEM OPTICKÉHO KABELU



Obrázek 5.3: Sestava s jedním zrcadlem v nesequenčním režimu

je možné si obdobně jako zdroj světla přesně podle potřeby definovat (na předcházejícím obrázku je detektor umístěn vpravo dole, kvůli malé šterbině má rozměry pouze 0,4 mm x 1,6 mm, větší by byl zbytečný a špatně by se vyhodnocovala detekovaná světelná stopa). Získaný obraz rozložení intenzity také velmi pěkně koresponduje se zjištěnou komou ze sekvenčního módu.

U všech výsledných obrazů bylo možno pozorovat jako nejvýraznější vadu komu, která vzniká hlavně z důvodu nutnosti vyosení sestavy. Lepších výsledků dosahovala zrcadla s kratší ohniskovou vzdáleností. Z důvodů vyrobiteľnosti a montáže bylo zvoleno zrcadlo o poloměru 50 mm (přesněji – 50 mm dle zvolené konvence, tedy konkávní zrcadlo). Sestava však měla vážné nedostatky. Sestava obracela paprsky zpět k monochromátoru (jak si lze povšimnout na obrázcích z 5.1.4) a tedy optický kabel by musel, pokud by bylo možné ho do omezeného prostoru vůbec připevnit, obracet směr svazku o 180°. Byl by tedy zbytečně zakřiven a docházelo by tak k větším ztrátám intenzity z důvodu nesplnění podmínky totálního odrazu v kabelu, tj. k nedodržení mezního úhlu vlivem velkého zakřivení vlákna. Toto se jednoduše napravilo zařazením rovinného zrcadla mezi výstupní šterbinu monochromátoru a kulové zrcadlo. Toto rovinné do svazku nevneslo vady a otočilo jej žadaným směrem. Vzhledem k nesymetrické optické sestavě se naskytla otázka, do jaké roviny celou sestavu umístit, jestli vést paprsek v horizontální nebo ve vertikální rovině.



Obrázek 5.4: Tvar světelné stopy při odrazu v jednotlivých rovinách. Vlevo v horizontální, vpravo ve vertikální.

Toto dilema bylo jednoznačně vyřešeno porovnáním modelů obou případů, respektive porovnáním získaných simulovaných světelných stop na detektoru. Na obrázku 5.4 lze

porovnat oba případy, vlevo je stopa svazku vedeného v horizontální rovině, vpravo pak v rovině vertikální. Měřítka intenzity na obou detektorech sice nejsou shodná, ale lze jasně vidět, že rozsah intenzity u svazku vedeného v horizontální rovině je výrazně menší. U vedení svazku ve vertikální rovině dokonce směrem dolů ubývá až k nule, zatímco u vodorovného vedení svazku je stopa pevně ohraničena.

Vzhledem k požadavku na pokud možno konstantní intenzitu v celém průřezu svazku vstupujícího do kabelu bylo upřednostněno vedení svazku v rovině horizontální. Toto vedení má také výhodu z hlediska výrobního a montážního. Získaný obraz se již začal blížit vstupu optického vlákna, naneštěstí poměr stran štěrbin monochromátoru je jiný, než stejný údaj pro vstup optického kabelu. Tento problém by bylo možné vyřešit nastavením štěrbin na stejný poměr stran jako má vstup optického kabelu, toto však není vhodné řešení kvůli značnému snížení intenzity svazku (poměr délek stran vstupu kabelu je výrazně odlišný, než je u použité štěrbin nastavené na 0,6 mm x 2 mm). Sestava byla navrhována podle šířky výstupní štěrbin monochromátoru a podle šířky vstupu kabelu. Zobrazení štěrbin monochromátoru na vstup optického kabelu je v poměru 1:3, tedy potřebné zvětšení tohoto zobrazení je přibližně $-0,333$. To však nevyhovuje výškám štěrbin a vstupu kabelu, protože pro ty je třeba zvětšení $-2,25$. Štěrbin monochromátoru o výšce 2 mm se má zobrazit na 4,5 mm vysoký vstup optického kabelu. Nejrychlejším řešením sejevilo nahrazení rovinného zrcadla válcovým, tedy přidáním prvku, který by „roztáhl“ svazek ve svislé ose.

Sférické a cylindrické zrcadlo

Protože bylo potřeba zvětšit obraz ve svislém směru, jako nejvhodnější sejevilo použití válcového zrcadla vypuklého s osou v horizontální rovině. Tím dojde k rozšíření svazku pouze ve vertikálním směru bez ovlivnění zobrazení ve směru vodorovném. Nevýhodou válcového zrcadla se ukázala jeho nedostupnost. Nebylo možné nalézt žádného výrobce, který by nabízel ve svém sortimentu přímo cylindrická zrcadla. Naštěstí jsou dostupné alespoň čočky válcového tvaru a nejschůdnější cestou se tedy jeví pokovení právě cylindrické čočky (např. [1] str. 661 – 669)

Náhradou rovinného zrcadla cylindrickým bylo skutečně dosaženo kýženého výsledku, avšak určení parametrů cylindrického zrcadla je v tomto případě zbytečně komplikované z důvodu zpracovávání svazku dvěma zrcadly ve svislém směru. Sice by bylo možné využít kapacit Zemaxu pro usnadnění návrhu, jak je naznačeno v dalším textu, ale takto „záplatovaná“ sestava by se obtížně seřizovala. Je proto vhodné zkusit nalézt vhodnější alternativu.

Dvě cylindrická zrcadla

Zbytečná komplikovanost sestavy se sférickým a cylindrickým zrcadlem vedla k použití dvou cylindrických zrcadel s navzájem kolmými osami. Tato zrcadla by zobrazovala nezávisle v horizontálním a vertikálním směru. Zmíněné uspořádání umožňuje celý problém řešit pomocí zobrazovacích rovnic pro jednotlivá zrcadla (pro jedno zrcadlo v horizontální, a druhé ve vertikální rovině).

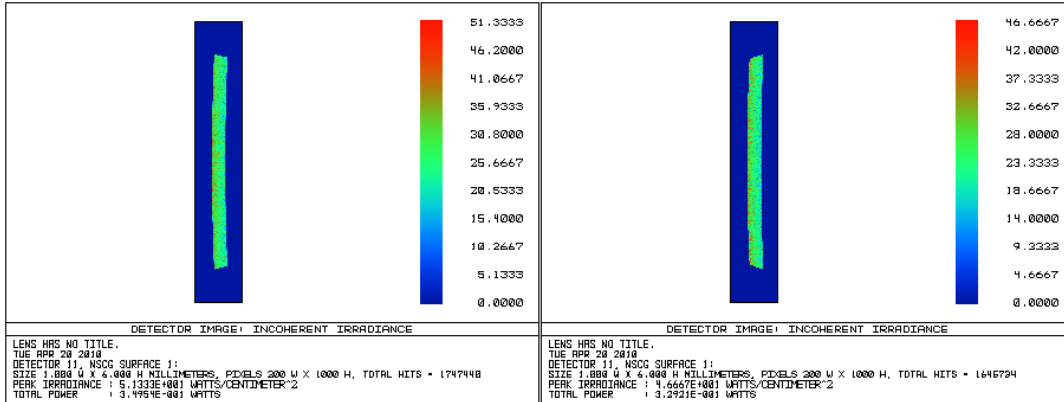
$$\beta_a = -\frac{a'}{a} \quad (5.4)$$

5.1. SESTAVA PŘED VSTUPEM OPTICKÉHO KABELU

$$\beta_b = -\frac{b'}{b} \quad (5.5)$$

$$a' + a = b' + b \quad (5.6)$$

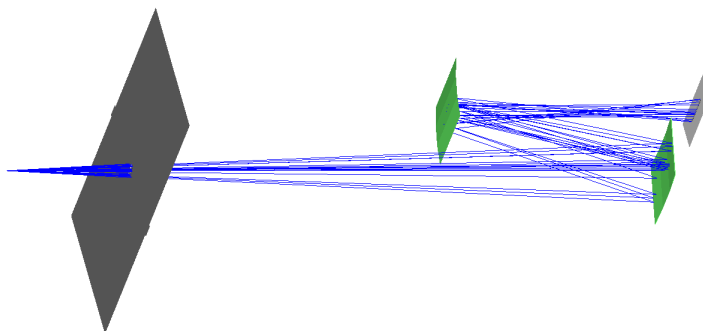
Nicméně je nezbytné, aby obě zrcadla zobrazovala do stejného bodu, tedy součet předmětové a obrazové vzdálenosti musí být pro obě zrcadla stejný. Respektováním tohoto faktu a užitím rovnic pro zvětšení zrcadel vznikne soustava tří rovnic pro čtyři neznámé (5.4), (5.5) a (5.6), kde a' a a jsou obrazová a předmětová vzdálenost jednoho zrcadla, b' a b jsou obrazová a předmětová vzdálenost druhého zrcadla. β_a a β_b jsou pak požadovaná zvětšení jednotlivých zrcadel. Řešení této soustavy je možné s vyžitím jedné z proměnných jako parametru. Změnou parametru lze dosáhnout toho, aby mohlo být jedno zrcadlo komerční výroby. Z důvodu provázanosti druhé zrcadlo již obecně nemůže být komerční a bylo by ho třeba nechat vyrobit podle vypočtených parametrů. Navíc z důvodu velké odlišnosti požadovaných zvětšení jednotlivých zrcadel by předmětová vzdálenost jednoho zrcadla byla výrazně větší než u druhého, a to by velmi zkomplikovalo i konstrukci celého systému. Tomuto se lze naštěstí vyhnout. Jedno ze zrcadel již navrženo je, původně navržené sférické zrcadlo zobrazovalo šířku štěrbinu monochromátoru přesně podle potřeby. Díky tomu, že cylindrické zrcadlo mění zobrazení pouze v rovině kolmé na jeho osu, je možné pro něj použít parametry sférického zrcadla. Cylindrické zrcadlo tedy bude mít poloměr -50 mm a zvětšení v této rovině bude $-1/3$. Návrh druhého cylindrického zrcadla je již výrazně komplikovanější. Toto zrcadlo, upravující zobrazení ve svislé rovině, musí vytvářet požadovaný obraz na stejném místě jako první cylindrické zrcadlo. Jak je popsáno v odstavci výše, výsledkům soustavy rovnic (5.4), (5.5) a (5.6) odpovídá konstrukčně náročná sestava. Naštěstí v této aplikaci je potřeba pouze zajistit přenos intenzity světelného svazku a deformace obrazu nehraje roli. Takto je možné se vyhnout návrhu podle zobrazovací rovnice. Využitím Zemaxu je možné umístit do sestavy zrcadlo (v tomto případě komerčně vyráběné) a pozorovat, jaký vliv má na vytvořený svazek a hlavně jakou stopu svazek vytvoří na detektoru. Jedinou nevýhodou oproti návrhu užitím zobrazovací rovnice je závislost výsledného obrazu na divergenci svazku vystupujícího z monochromátoru. Ta je však již známá z dřívějšího měření. Zemax umožňuje i tento fakt zakomponovat do simulované optické sestavy.



Obrázek 5.5: Vlevo je stopa pro válcové a sférické zrcadlo, vpravo jsou použita dvě válcová zrcadla.

Hlavním přínosem těchto dvou cylindrických zrcadel bude jednodušší seřizování celého systému, protože zobrazení pomocí nich jsou navzájem téměř nezávislá. Sférické zrcadlo

použité dříve, jak již bylo zmíněno, by seřízení sestavy značně komplikovalo, protože ovlivňuje zobrazení ve všech rovinách procházejících svazkem.



Obrázek 5.6: Rozmístění cylindrických zrcadel (znázorněna zeleně) v sestavě.

Další výhodou je také drobné narovnání získané stopy na detektoru a tedy lepší podmínky pro vstup zpracovaného svazku do optického kabelu (viz obrázek 5.5). Zrcadlo upravující svazek v horizontální rovině bude mít poloměr $-51,7$ mm (tento údaj z katalogizované nabídky odpovídá nejlépe vypočteným -50 mm), druhé zrcadlo upravující svazek ve vertikální rovině bude mít ohniskovou vzdálenost $-103,4$ mm. Obě zrcadla budou plano–konkávní vyrobená pokovením cylindrických čoček ([1] str. 665). Na obrázku 5.6 je pak znázorněno rozmístění jednotlivých prvků v sestavě. Ze simulací v Zemaxu pak tomuto rozmístění odpovídají obrazové vzdálenosti $-73,9$ mm pro zrcadlo upravující zobrazení ve svislé rovině a $-103,5$ mm pro zrcadlo upravující zobrazení v horizontální rovině. Úhel odklonění optické osy je volen co nejmenší, a to 10° . Optická dráha světelného svazku pro obě zrcadla je rovna $138,1$ mm.

5.2. Sestava za výstupem optického kabelu

Sestava na vstupu optického kabelu je závislá na parametrech již existujících součástí spektrofotometru. Totéž platí i pro sestavu na výstupu optického kabelu. Při jejím návrhu je nutné respektovat především parametry světelného svazku vystupujícího z optického kabelu.

5.2.1. Výstup optického kabelu

Aby bylo možné získat rovnoběžný svazek určitého průměru, je třeba znát divergenci svazku vystupujícího z kabelu. Problémem návrhu této části je v první řadě fakt, že sestava na vstupu kabelu není ještě vyrobena a tak není známo, jaké parametry má svazek vystupující z optického kabelu. Tím tedy není možné jeho hodnoty změřit. Pro získání představy o parametrech světelného svazku vystupujícího z optického kabelu bylo provedeno orientační měření divergence tohoto svazku. Nejprve bylo užito světlo z monochromátoru bez jakýchkoli úprav svazku před vstupem do optického kabelu. Došlo tedy ke ztrátě intenzity svazku, ale podařila se změřit divergence světelného svazku přibližně rovná 7° . Výstupní svazek byl (stejně jako vstupní svazek) rotačně symetrický. Protože světelný svazek upravený navrhovanou sestavou před vstupem optického kabelu bude silně astigmatický

5.2. SESTAVA ZA VÝSTUPEM OPTICKÉHO KABELU

(má jinou rozbíhavost v navzájem kolmých rovinách), je potřeba zjistit, zda i toto nebude mít vliv na výstupní svazek. K tomuto účelu byl použit astigmatický laserový svazek (z polovodičového laseru LDM635, [1] str. 1079). Po průchodu kabelem byl výstup opět kuželového tvaru, pouze měl menší divergenci rovnou přibližně 4° . Toto je velmi pozitivní zjištění, neboť nyní je možné předpokládat, že výstup v zamýšlené sestavě, tedy s využitím vstupní části sestavy navržené v 5.1.4, bude mít opět tvar kužele. Z této informace je již možné dále vycházet.

5.2.2. Kolimátor

Kolimátor je zařízení pro vytvoření rovnoběžného světelného svazku. Jednou z možností při jeho návrhu je využít zobrazovací rovnice a představit si kolimovaný svazek jako zobrazení předmětu sestavou kolimátoru do nekonečna. Z toho vyplývá, že kolimovaný svazek lze vytvořit umístěním bodového předmětu do ohniska zrcadla (respektive čočky, avšak ta nepřichází v tomto návrhu do úvahy).

Úhel / °	f / mm	Úhel / °	f / mm	Úhel / °	f / mm
4,00	257,41	5,00	205,74	6,00	171,26
4,10	251,11	5,10	201,69	6,10	168,43
4,20	245,11	5,20	197,79	6,20	165,69
4,30	239,39	5,30	194,03	6,30	163,04
4,40	233,93	5,40	190,42	6,40	160,47
4,50	228,71	5,50	186,94	6,50	157,98
4,60	223,72	5,60	183,58	6,60	155,57
4,70	218,94	5,70	180,34	6,70	153,23
4,80	214,36	5,80	177,21	6,80	150,95
4,90	209,96	5,90	174,18	6,90	148,74
Divergence / °	f / mm	Úhel / °	f / mm	Úhel / °	f / mm
7,00	146,60	8,00	128,08	9,00	113,65
7,10	144,51	8,10	126,47	9,10	112,38
7,20	142,48	8,20	124,91	9,20	111,14
7,30	140,51	8,30	123,39	9,30	109,92
7,40	138,59	8,40	121,90	9,40	108,73
7,50	136,72	8,50	120,44	9,50	107,56
7,60	134,90	8,60	119,02	9,60	106,42
7,70	133,13	8,70	117,63	9,70	105,30
7,80	131,40	8,80	116,27	9,80	104,21
7,90	129,72	8,90	114,95	9,90	103,14

Tabulka 5.3: Ideální ohniskové vzdálenosti zrcadla kolimátoru pro různé divergence svazku

Tohoto je také využito v návrhu kolimátoru do spektrofotometru. Sice není známa přesná hodnota divergence vystupujícího světelného svazku z optického kabelu, ale známým faktem je, že svazek by měl být kónický. To znamená, že je rotačně symetrický a je tedy možné jej snadno kolimovat. Jelikož není možné předvídat divergenci svazku, který bude kolimován, bude nejlepší cestou nejprve sestavit optickou sestavu mezi monochromátorem a optickým kabelem křemenných vláken a následně změřit parametry světelného

5. OPTICKÝ NÁVRH SESTAVY S KOLIMÁTOREM

Divergence/°	12	25	50	75	100	150	200	500
4	1,68	3,50	6,99	10,49	13,99	20,98	27,97	69,93
4,2	1,76	3,67	7,34	11,02	14,69	22,03	29,37	73,44
4,4	1,85	3,85	7,69	11,54	15,39	23,08	30,78	76,95
4,6	1,93	4,02	8,05	12,07	16,09	24,14	32,18	80,46
4,8	2,02	4,20	8,40	12,60	16,79	25,19	33,59	83,97
5	2,10	4,37	8,75	13,12	17,50	26,25	35,00	87,49
5,2	2,18	4,55	9,10	13,65	18,20	27,30	36,40	91,01
5,4	2,27	4,73	9,45	14,18	18,91	28,36	37,81	94,53
5,6	2,35	4,90	9,81	14,71	19,61	29,42	39,22	98,05
5,8	2,44	5,08	10,16	15,24	20,32	30,47	40,63	101,58
6	2,52	5,26	10,51	15,77	21,02	31,53	42,04	105,10
6,2	2,61	5,43	10,86	16,30	21,73	32,59	43,45	108,63
6,4	2,69	5,61	11,22	16,83	22,43	33,65	44,87	112,17
6,6	2,78	5,79	11,57	17,36	23,14	34,71	46,28	115,70
6,8	2,86	5,96	11,92	17,89	23,85	35,77	47,70	119,24
7	2,95	6,14	12,28	18,42	24,56	36,84	49,11	122,78
7,2	3,03	6,32	12,63	18,95	25,27	37,90	50,53	126,33
7,4	3,12	6,49	12,99	19,48	25,98	38,96	51,95	129,88
7,6	3,20	6,67	13,34	20,01	26,69	40,03	53,37	133,43
7,8	3,29	6,85	13,70	20,55	27,40	41,09	54,79	136,98
8	3,37	7,03	14,05	21,08	28,11	42,16	56,22	140,54
8,2	3,46	7,21	14,41	21,62	28,82	43,23	57,64	144,10
8,4	3,54	7,38	14,77	22,15	29,53	44,30	59,07	147,67
8,6	3,63	7,56	15,12	22,69	30,25	45,37	60,49	151,24
8,8	3,72	7,74	15,48	23,22	30,96	46,44	61,92	154,81
9	3,80	7,92	15,84	23,76	31,68	47,52	63,35	158,38
9,2	3,89	8,10	16,20	24,29	32,39	48,59	64,79	161,96
9,4	3,97	8,28	16,55	24,83	33,11	49,66	66,22	165,55
9,6	4,06	8,46	16,91	25,37	33,83	50,74	67,65	169,14
9,8	4,15	8,64	17,27	25,91	34,55	51,82	69,09	172,73

Tabulka 5.4: Průměry svazku pro ohniskové délky vybraných komerčních zrcadel, které odpovídají různým divergencím svazku (hodnoty v prvním řádku jsou ohniskové vzdálenosti v mm)

svazku vystupujícího z optického kabelu. Aby bylo možné si udělat představu o rozměrech kolimátoru (protože ho bude třeba umístit do skříně spektrofotometru), byl předpokládán rozsah divergencí zmíněného svazku od 4° až po 10° s krokem po $0,1^\circ$ (nejpravděpodobnější rozsah divergencí). Tabulka 5.3 ukazuje ohniskové vzdálenosti zrcadel ideálních pro vytvoření svazku o průměru 36 mm pro jednotlivé divergence světelného svazku. Tabulka 5.4 pak znázorňuje průměry vytvořených svazků pro různé divergence svazku vytvořené několika komerčně prodávanými sférickými zrcadly (z nabídky Thorlabs, inc. [1] str. 685).

6. ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo navržení úprav sestavy zobrazovacího spektrofotometru, která se skládá s vlastního měřicího zařízení a monochromátoru. Bylo požadováno, aby byla osvětlena co možná největší plocha studovaného vzorku při dodržení kvality měření. Protože vlastní měřicí zařízení je již postaveno tak, aby tato plocha byla s použitými prvky maximalizována, nebylo v něm třeba žádných zásahů. Část, která nejvíce omezuje potenciál spektrofotometru, je kolimátor nacházející se mezi monochromátorem a vlastním měřicím zařízením, který vytváří osvětlující rovnoběžný svazek. Stávající světelný svazek je vhodně kolimován pouze pro malé otevření výstupní štěrbiny monochromátoru (malé intenzity svazku) a také nemá dostatečný průřez pro osvětlení požadované oblasti povrchu celého vzorku. Návrh nové kolimační sestavy byl koncipován tak, aby se v co největší míře použily komerční optické prvky a aby celá sestava byla co nejvhodnější pro integraci do již hotového zařízení. V průběhu návrhu se objevil problém s navázáním světelného svazku do již zakoupeného optického kabelu (popsáno v 5.1), jehož vstup je značně jiných rozměrů než výstupní štěrbina monochromátoru. Dalším problémem je pak zpracování svazku světla samotným optickým kabelem, kdy není možné přesně předpovědět parametry světelného svazku z něj vystupujícího. Tím nelze bez dalšího měření navrhnout kolimátor, který by vytvořil nový, pro měření lépe vyhovující osvětlující svazek. Dalším krokem ve vývoji celého kolimačního systému bude realizace jeho části před vstupem optického kabelu, aby bylo možné určit, jaký svazek bude třeba kolimovat. Půjde tedy již o konstrukční návrh pravděpodobně doprovázený přesnějším měřením parametrů světelného svazku vystupujícího z monochromátoru, na nichž závisí parametry celé kolimační sestavy. Jistá nepřesnost měření divergence světelného svazku vystupujícího z monochromátoru by mohla být eliminována možností justáže jednotlivých optických prvků. Těmito prvky jsou dvě cylindrická zrcadla s navzájem kolmými osami, která umožňují nastavovat zobrazení téměř nezávisle ve dvou k sobě kolmých rovinách. Po realizaci části před vstupem optického kabelu a správném navázání světelného svazku do optického kabelu pak bude následovat měření na výstupu optického kabelu. Podle zjištěných údajů se zrealizuje kolimátor, jehož parametry byly již předběžně navrženy pro širší obor divergencí výstupních svazků.

LITERATURA

- [1] *Catalog Volume 20*. Newton, USA: Thorlabs, Inc., 2009. 1508 s.
- [2] Nam-Hyong Kim: *How to Create a Simple Non-Sequential System.*, ZEMAX Users' Knowledge Base, Publikováno 23.9.2005 URL: <<http://www.zemax.com/kb/articles/33/>> [cit. 24.5.2010]
- [3] ČUDEK, V.: *Návrh a realizace zařízení pro studium optické nehomogenity tenkých vrstev*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2005. 60 s. Vedoucí doc. RNDr. Miloslav Ohlídál, CSc.
- [4] FUKA, J; HAVELKA, B.: *Optika a atomová fyzika, část I. Optika.*, Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1961. 846 s. č.16–00–01
- [5] *TRIAX Series 180/190/320/550 User's Manual*. Instruments S.A., inc. a member of the Horiba Group, JOBIN YVON/SPEX Division, 1999. 49 s. Part number 81021 Rev B
- [6] *Zemax Optical Design Program User's guide, version 7.0.*, Tucson, USA: Focus software, inc., 1998. 386 s.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Označení	Legenda	Jednotka
a	předmětová vzdálenost	[mm]
a'	obrazová vzdálenost	[mm]
b	předmětová vzdálenost	[mm]
b'	obrazová vzdálenost	[mm]
D	průměr svazku	[mm]
D_1	průměr podstavy kužele	[mm]
D_2	průměr podstavy kužele	[mm]
f	ohnisková vzdálenost	[mm]
l	délka strany čtverce	[mm]
L	výška kužele	[mm]
r	poloměr	[mm]
β	zvětšení zrcadla	[1]
β_a	zvětšení zrcadla s předmětovou vzdáleností a	[1]
β_b	zvětšení zrcadla s předmětovou vzdáleností b	[1]