

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE



Monochromátor s difrakční mřížkou

AUTOR

ADAM ROXER

VEDOUcí PRÁCE

ING. JAN ŠÍSTEK, PH.D.

V PRAZE, DNE 21. KVĚTNA 2014

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou prací na téma „Monochromátor s difrakční mřížkou“ vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a že jsem na konci práce uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 21. května 2014

.....

Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Šístkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou, odbornou a především obětavou pomoc a cenné rady při zpracování této bakalářské práce.

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektromagnetického pole

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Adam Roxer**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Obor: Komunikační technika

Název tématu: **Monochromátor s difrakční mřížkou**

Pokyny pro vypracování:

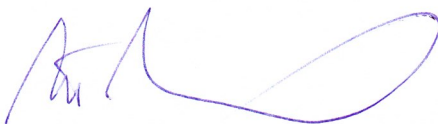
Popište běžně užívaná uspořádání tzv. monochromátorů s difrakčními mřížkami a jejich parametry. S vybavením dostupným na pracovišti zkonstruuje monochromátor vhodný pro měření spektrálních závislostí útlumu vícevidových vláken a demonstруйте jeho vlastnosti ve spojení s vhodným širokopásmovým zdrojem.

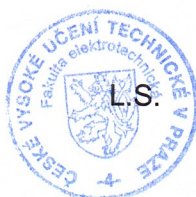
Seznam odborné literatury:

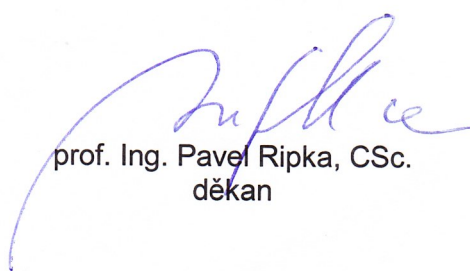
- [1] Fuka, J., Havelka, B.: Optika – fyzikální kompendium (IV. díl). Praha, SNTL 1961.
- [2] Hui, R., Sullivan, M.: Fiber Optic Measurement Techniques. 1st ed., Elsevier, 2009, ISBN 978-0-12-373865-3.

Vedoucí: Ing. Jan Šístek, Ph.D.

Platnost zadání: LS 2014/2015


prof. Ing. Miloš Mazánek, CSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 17. 12. 2013

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá různými koncepcemi monochromátorů využívajících difrakční mřížky jako disperzního elementu, popisuje jejich vlastnosti a dále se zabývá měřením útlumu optických vláken. Cílem praktické části je sestavení monochromátoru se znalostmi získanými v teoretické části a také při počítačové simulaci v programu OSLO. Po sestavení a sladění monochromátoru je provedena jeho analýza a je použit pro měření spektrální závislosti útlumu plastového optického vlákna.

Klíčová slova: monochromátor, difrakční mřížka, plastové optické vlákno, spektrální závislost útlumu, uměření útlumu, OSLO, Czerny–Turner

Summary

This bachelor thesis deals with various conceptions of monochromators based on a diffraction grating as a dispersion element, describes their attributes and concerns with measurements of the optical fiber attenuation. The main goal of this thesis is to design and construct a monochromator with the knowledge got in the theoretical part and during the computer simulation by OSLO. After its assembling and tuning up, the analysis is performed and the completed monochromator is used for measuring of the spectral dependence of the plastic optical fiber attenuation.

Index Terms: monochromator, diffraction grating, plastic optical fiber, spectral dependence of the attenuation, attenuation measurement, OSLO, Czerny–Turner

Obsah

1 Úvod	2
2 Teorie	3
2.1 Difrakční mřížka	3
2.1.1 Mechanizmy rozkladu světla	3
2.1.2 Pojem difrakční mřížka	3
2.1.3 Mřížková rovnice	4
2.1.4 Typy difrakčních mřížek	5
2.1.5 Ryté mřížky	6
2.1.6 Holografické mřížky	7
2.1.7 Replikované mřížky	8
2.2 Monochromátory s difrakční mřížkou	10
2.2.1 Využití mřížek v optických spektrálních analyzátorech	11
2.2.2 Czerny–Turnerův monochromátor	14
2.2.3 Fastie–Ebertův monochromátor	15
2.2.4 Monk–Gilliesonův monochromátor	15
2.2.5 Littrowův monochromátor	16
2.2.6 Optické vady monochromátorů	17
2.3 Útlum optických vláken	18
2.4 Měření útlumu optických vláken	20
2.4.1 Metoda dvou délek	20
2.4.2 Metoda vložených ztrát	21
2.4.3 Metoda měření zpětného rozptylu	22

3 Experiment	23
3.1 Úvod	23
3.2 Popis klíčových prvků	24
3.2.1 Širokopásmový zdroj záření	24
3.2.2 Zrcadla	25
3.2.3 Difrakční mřížka	26
3.2.4 Optická vlákna	28
3.2.5 Optoelektronický převodník	28
3.2.6 Řízení natáčení mřížky	28
3.2.7 Osciloskop	29
3.2.8 Optický spektrální analyzátor	30
3.3 PC simulace mřížkového monochromátoru	31
3.4 Konstrukce monochromátoru	34
3.4.1 Výpočty geometrie	35
3.4.2 Postup nastavení monochromátoru	37
3.5 Výsledky a měření hotového monochromátoru	41
3.5.1 Určení spektrální šířky	41
3.5.2 Měření útlumu plastového optického vlákna	41
4 Závěr	45

Seznam použitých symbolů

d	perioda mřížky
m	řád interferenčního maxima
n	index lomu
α	úhel dopadajícího paprsku
$\alpha(\lambda)$	koeficient útlumu (měrný útlum)
β	úhel difraktované paprsku
$\beta(\lambda)$	útlum
Δ	dráhový rozdíl
λ	vlnová délka
Ω_m	úhel akceptance

Seznam použitých zkratek

CCD	Charge-Coupled Device, typ obrazového snímače
FPGA	Field Programmable Gate Array, programovatelná hradlová pole
OSA	Optical Spectrum Analyzer, optický spektrální analyzátor
OSLO	Optics Software for Layout and Optimization, optický simulační program
OTDR	Optical Time Domain Reflectometry, optická časová reflektometrie
POF	Plastic Optical Fiber, plastové optické vlákno
VLS	Varied Line-Space, mřížky s různou vzdáleností vrypů

1 Úvod

Spektrální závislost útlumu optických vláken je velmi užitečnou charakteristikou při návrhu optického komunikačního kanálu a její znalost umožňuje výběr správné spektrální oblasti pro použití, ve které bude útlum a také disperzní vlastnosti daného vlákna odpovídat kladeným požadavkům.

Pro měření útlumu je třeba použít laditelný monochromatický zdroj světelného záření, který s pomocí monochromátoru vybere ze zdroje se širokým spektrem jenom jeho úzkou část. Mezi základní dva optické prvky umožňující rozklad světla na jednotlivé spektrální složky patří optický hranol a difrakční mřížka. Difrakční mřížka nabízí oproti optickému hranolu vyšší prostorovou disperzi a menší prostorovou náročnost, v komerčních přístrojích je tak využívána častěji a proto se tato práce věnuje právě mřížce.

Úkolem této bakalářské práce je popsat principy rozkladu polychromatického světla, vlastnosti jednotlivých typů monochromátorů a metody měření útlumu v teoretické části. V praktické části bude mřížkový monochromátor simulován pomocí počítače a bude sestaven s využitím motorového rotačního stolku. Po celkovém sladění bude monochromátor použit pro měření spektrální závislosti útlumu plastového optického vlákna a výsledky budou porovnány s daty výrobce.

2 Teorie

2.1 Difrakční mřížka

Zamýšlený monochromátor sloužící k měření útlumu optických vláken je založen na rozkladu světla pomocí difrakční mřížky. Popisu mřížky se věnuje tato kapitola a na ní naváže kapitola popisující funkci celého monochromátoru.

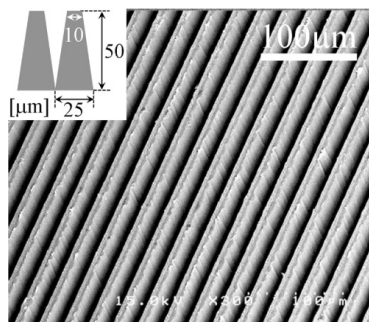
2.1.1 Mechanizmy rozkladu světla

Nejběžnějšími optickými prvky pro vlnový rozklad světla jsou difrakční mřížka a disperzní hranol. Oba prvky používají různé vlnově selektivní mechanismy. Mřížky se v současných monochromátorech využívají častěji, a proto se jim věnuje tato práce. Více informací k disperzním hranolům lze nalézt v lit. [8], kap. 5.1 až 5.16 .

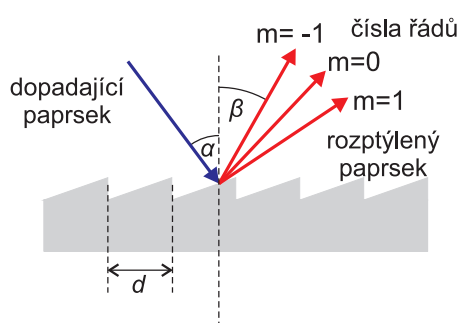
2.1.2 Pojem difrakční mřížka

Difrakční mřížka ([1] str. 131–138, [2] str. 567–577, [3]) je plošná struktura s pravidelnou řadou vrypů anebo jiných struktur představujících nehomogenitu, na které dochází k rozptylu dopadajícího záření do širokého rozsahu úhlů. Pokud uvažujeme pravidelnou strukturu vrypů, při ozáření monochromatickým a kolimovaným (nerozbíhavým) svazkem vznikají ostrá maxima jednotlivých difrakčních řádů. Teorie difrakční mřížky je založena na Huygensově principu elementárních vlnění a Youngově principu interference.

Mřížka sestává většinou z rovinné destičky vhodného materiálu, na níž je vytvořena pravidelná řada lineárních světlo-rozptylujících útvarů (nejběžněji vrypů, může jít ale i o vyvýšené linky či o holografické útvary) se vzájemnou vzdáleností srovnatelnou s vlnovou délkou zkoumaného světla. Základní dělení difrakčních mřížek je na mřížky reflexní, které jsou vytvořeny na povrchu odrazné plochy a mřížky transmisní, kterými paprsky dopadajícího světla procházejí. Dále v textu jsou popisovány pouze mřížky reflexní.



Obrázek 1: Mikroskopický detail povrchu difrakční mřížky, převzato z [10]



Obrázek 2: Rozklad světla na reflexní mřížce do různých směrů (řádů)

Základním parametrem difrakční mřížky je mřížková konstanta, také označovaná jako perioda mřížky d . Mřížková konstanta udává vzdálenost sousedních vrypů (viz obr. 2) a pro popis mřížek se častěji uvádí její převrácená hodnota, tedy počet vrypů na jednotku délky. U běžných difrakčních mřížek nabývá hodnot 300 až 2000 vrypů/mm. Čím je toto číslo vyšší, tím dochází k výraznějšímu jevu difrakce.

2.1.3 Mřížková rovnice

Předpokládejme kolimované záření dopadající na mřížku pod úhlem α vzhledem k ose mřížky. Optický přijímač vidí záření pod úhlem β . Dráhový rozdíl Δ mezi dvěma paprsky je možné vyjádřit jako

$$\Delta = d(\sin \beta - \sin \alpha). \quad (1)$$

Maximální intenzity nabývá záření tehdy, je-li dráhový rozdíl roven celému násobku vlnové délky a paprsky interferují se stejnou fází. Základní vlnová rovnice mřížky je tedy

$$m\lambda = d(\sin \beta - \sin \alpha), \quad (2)$$

kde $m \in N_0$ je řád interferenčního maxima. Maximum nultého řádu $m=0$ je vždy nerozložené a jedná se o odražený paprsek dle zákonů geometrické optiky, na rozdíl od všech spekter řádů $m \neq 0$.

Z mřížkové rovnice je patrná závislost úhlu difrakce na vlnové délce. Optické záření různých vlnových délek je rozptýleno do různých úhlů. Složky světla kratších vlnových délek daného řádu při daném úhlu dopadu α difraktují do menšího úhlu β než složky delších vlnových délek. Čím blíže jsou vrypy u sebe, tím dochází k většímu úhlovému rozestupu jednotlivých maxim difrakčního obrazce.

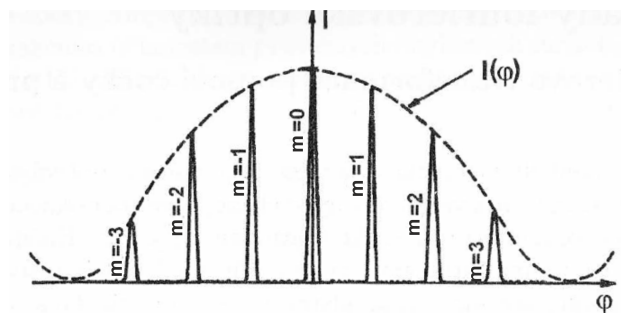
Úhlová disperze mřížky udává závislost změny úhlu rozptýleného paprsku na změně vlnové délky uvažovaného paprsku a je dána vztahem [1]:

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{m}{d \cos \beta}. \quad (3)$$

Mřížková rovnice nevyovídá o intenzitě spekter různých řádů. Největší intenzita světla je ve spektru nultého řádu a rozdělení intenzit je obálka spekter různých řádů, kdy maxima se vyskytuje právě tehdy, když se interferující paprsky setkají se stejnou fází. Schematicky znázorňuje rozdělení intenzit obr. 3.

2.1.4 Typy difrakčních mřížek

V optické praxi se využívá více struktur povrchů. Nejčastěji jsou používány mřížky mající strukturu rovnoběžných vrypů, anebo jiných pravidelných struktur. Povrch mřížky bývá většinou rovinný, ale používají se i mřížky s konkávním povrchem.



Obrázek 3: Rozdělení intenzit světla jednotlivých řádů, převzato z lit. [5]

Profil vrypů má velký vliv především na intenzitu difrakce. Zatímco ryté mřížky mají profily trojúhelníkové anebo lichoběžníkové, holografické mřížky mají profil ve tvaru sinusovky, která vzniká interferencí dvou paprsků a záznamem na fotosenzitivní emulzi.

Mřížky mohou být prvotní či replikované – vyrobené otiskem jiné mřížky.

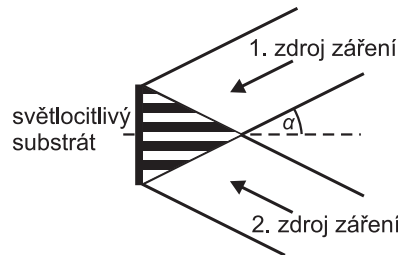
2.1.5 Ryté mřížky

Nejstarším a stále nejčastěji využívaným procesem výroby prvotních mřížek pro spektroskopické nástroje je mechanické rytí základního materiálu, kterým bývá buď optické sklo anebo kovová deska. Rytí probíhá pomocí diamantového hrotu, který je pečlivě vybrán a vybroušen dle požadavků na tvar jednotlivých vrypů. Celé rycí zařízení musí být instalované ve stálém prostředí a musí být dokonale ukotveno tak, aby nedocházelo k vibracím, a to především těm, které jsou snadno přenášeny na rycí hrot. Změny v poloze nesmí přesáhnout pár nanometrů během celého procesu rytí a také výkyvy teplot musí být co nejmenší. Ryté mřížky mají delší proces výroby, neboť každý vryp je vyrýván diamantem jednotlivě a tak např. pro mřížku s rozměry 100×100 mm s hustotou 1000 vrypů/mm je celková dráha, kterou musí diamant vyrýt až 10 km, a tak samotné rytí může trvat až několik týdnů. Ryté mřížky mohou být vyrobeny i ve velkých rozměrech až 420×320 mm.

Pro speciální účely se vyrábí VLS (Varied Line-Space) difrakční mřížky s různou, ale přesně definovanou vzdáleností vrypů.

2.1.6 Holografické mřížky

Holografické difrakční mřížky jsou vytvářeny pomocí interference dvou koherentních svazků, které do speciální světlocitlivé emulze vytvářejí strukturu sinusoidálních obrazců.



Obrázek 4: Základní princip výroby holografické mřížky

Vlnová délka použitého záření a úhel, který spolu svírají interferující svazky, určují rozteč interferenčních proužků, a tedy mřížkovou konstantu, která je rovna hodnotě

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \alpha}, \quad (4)$$

kde je λ vlnová délka použitého záření a α je úhel, pod kterým záření na substrát dopadá. Po expozici se nechá emulze vyvolat a poté je na povrchu mřížky nanesená kovová odrazná vrstva.

Holografické mřížky díky možnému simultánnímu procesu výroby a krátké době expozice, která trvá od několika minut po několik desítek minut, vynikají několikanásobně kratší dobou výroby než mřížky ryté. Vzhledem k požadavkům na kvalitu optické záznamové soustavy a poklesu optického výkonu směrem od středu záznamového substrátu mívají rozměry menší než mřížky ryté.

Holografická metoda výroby může dosahovat vyšší přesnosti vrypů a proto se holografické mřížky vyznačují menším výskytem nežádoucích rozptylových jevů.

2.1.7 Replikované mřížky

Proces výroby rytých mřížek je časově a také technicky velmi náročný, a tak se většina běžných mřížek vyrábí procesem replikace. Při replikaci dochází k otisku vrypů základní, vzorové mřížky do vrstvy vhodného, velmi přilnavého materiálu. Ten se poté vytvrdí a vzniká replikovaná mřížka, jejíž vrypy jsou inverzní k vrypům vzorové mřížky. Na povrchu reflexní mřížky je nanесena tenká vrstva hliníku, anebo se pro lepší přenosové vlastnosti ve vybraných spektrálních oblastech využívá stříbra či zlata. Průřez replikací je přiblížen na obr. 5. Kvalita replikované mřížky je srovnatelná s originálem mřížky, která byla použita jako vzor pro replikaci. Jelikož je proces replikace velmi spolehlivý, je možné z jedné ryté mřížky vyrobit 5 až 10 kvalitních mřížek R , které se dále využívají k replikaci, a to ve 3 až 9 generacích g . Z jedné vzorové mřížky je tak možné vyrobit R^g mřížek, což představuje pro $R = 10$ a $g = 9$ až 10^9 replikovaných mřížek. Takový počet difrakčních mřížek není samozřejmě využitelný a tak se vybírají jen mřížky nejvyšší kvality a ostatní kusy se dále nereplikují. Pro $R = 5$ a $g = 3$ dostáváme 125 mřížek, což je již realističtější množství. Více o procesu replikace lze nalézt v lit. [3] v kap. 5.



Obrázek 5: Replikační sendvič ilustrující proces replikace

Proces výroby replikovaných mřížek je možné popsat v následujících krocích:

1. Výběr prvotní mřížky dle požadovaných parametrů a kvality jejího povrchu a vrypů.
2. Nanesení nepřilnavého přípravku, který usnadní oddělení replikované mřížky od vzorové. Vzhledem k nutnosti co nejpřesnějšího otisku musí být tato vrstva velmi tenká a co nejrovnoměrněji nanесená.

3. Aplikace reflexního povrchu v podobě tenké kovové vrstvičky, většinou z hliníku. Tato vrstva musí být velmi přesná a využívá se proto pokovení ve vakuové komoře, kde je nanášený kov zahřát na teplotu varu a na požadovaném povrchu zkondenzuje. Tloušťka reflexní kovové vrstvy je okolo 1 μm .
4. Nanesení vhodného pryskyřicovitého materiálu v tekuté podobě, který umožňuje následné vytvrzení. Tato vrstva tvoří základ nosného povrchu replikované mřížky.
5. Vytvrzení pryskyřice, buď za pokojové teploty anebo pro urychlení při teplotě vyšší. Existují i pryskyřice umožňující vytvrzení pomocí UV záření.
6. Posledním bodem je oddělení mřížek od sebe a následná kontrola kvality jejich povrchů.

2.2 Monochromátory s difrakční mřížkou

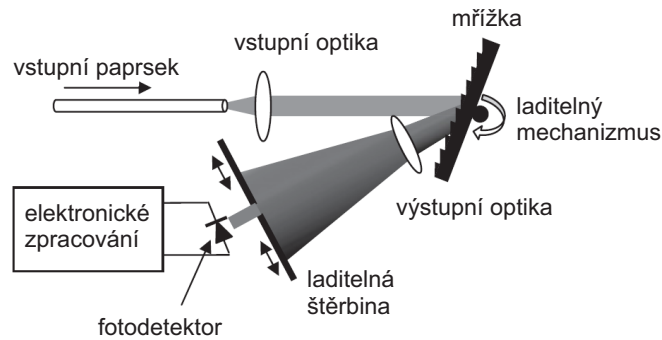
Monochromátor je laditelné zařízení sloužící pro získání monochromatického světla ze světla polychromatického (může jít o diskrétní čáry i o spojité spektrum). Ideálním výstupem monochromátoru je světlo o vlnové délce λ . V praxi propouští monochromátor světlo se střední vlnovou délkou λ a šířkou pásma $\Delta\lambda$ okolo této střední vlnové délky, která je dle zvyklostí měřena v polovině amplitudy výkonu zdroje [6]. Monochromátor je nastavitelný pro výběr střední vlnové délky z určitého rozsahu a nachází tak uplatnění v optických spektrálních analyzátoch, měřicích přístrojích či dalších aplikacích, ve kterých je nutné použít laditelný monochromatický zdroj. Jako disperzního členu se nejčastěji využívá difrakční mřížky, popřípadě optického hranolu. Tato práce se věnuje monochromátorům s difrakční mřížkou. O monochromátorech využívajících hranolu jako disperzního elementu je možné nalézt více v lit. [4].

Kontrolovatelné disperse je možné docílit pouze v případě kolimovaného vstupního světla. Vystupuje-li měřený signál z optického vlákna (svazek se tedy rozbíhá), je možno docílit kolimace v užším spektrálním oboru čočkou, v širokém pak nejlépe konkávním (ideálně parabolickým) zrcadlem. Složitější monochromátory mohou využívat i konkávní mřížku, u které nutnost použití kolimační soustavy odpadá. Pro vysokou účinnost a vhodné optické vlastnosti se nejčastěji používají kolimační zrcadla.

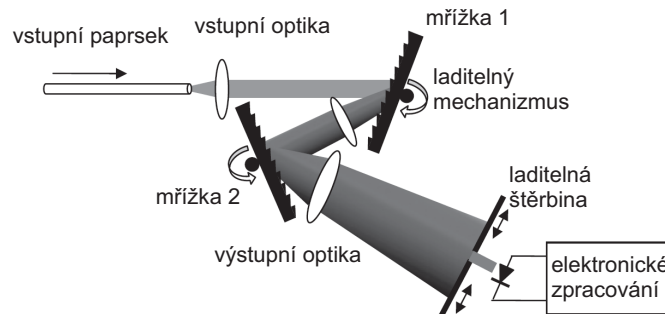
Možností, jakými lze uspořádat monochromátor, existuje mnoho. Jednotlivá uspořádání se liší především rozestavením, počtem a typem optických prvků a výběrem difrakční mřížky. Mezi často používaná uspořádání tzv. jednoduchých monochromátorů s rovinnou difrakční mřížkou se řadí monochromátory Czerny–Turnerův, Fastie–Ebertův, Monk–Gillesonův či Littrowův, které budou popsány v následujících kapitolách. Více k monochromátorům lze nalézt v lit. [4] či v [3], která popisuje i složitější monochromátory s konkávní mřížkou.

2.2.1 Využití mřížek v optických spektrálních analyzátoch

Optické spektrální analyzátoch (dále jen OSA) využívají monochromátor jako zdroj laditelného monochromatického záření. Základní schéma OSA založeného na jednoduchém monochromátoru s jednou difrakční mřížkou je na obr. 6, resp. OSA se dvěma mřížkami na obr. 7.



Obrázek 6: Základní schéma OSA s jednou difrakční mřížkou, převzato z lit. [1]

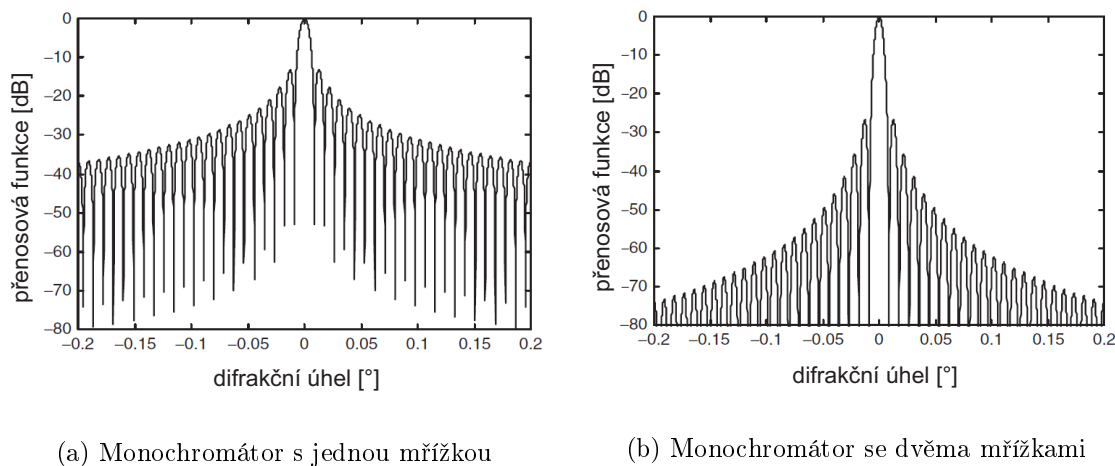


Obrázek 7: Základní schéma OSA se dvěma difrakčními mřížkami, převzato z lit. [1]

V jednoduchém uspořádání OSA je vstupní optický signál navázán nejčastěji pomocí optického vlákna a usměrněn pomocí spojné čočky na kolimovaný svazek, který dopadá na difrakční mřížku. Ta je buď ukotvena na otočném držáku s přesným pohonem, pak se jedná o sekvenční způsob snímání, anebo se využívá simultánní detekce pomocí lineárního CCD snímače, kdy je mřížka pevně ukotvena. Sekvenční uspořádání se vyznačuje delší dobou skenování spektra, nabízí ale vyšší rozlišení. Simultánní snímání je rychlejší, ale

spektrální rozlišení je omezeno počtem elementů CCD. V textu dále je popisováno a pro experiment bylo zvoleno snímání sekvenční. Difraktovaný svazek se pomocí čočky či zrcadla vhodně usměrní buď pomocí laditelné štěrbině anebo otáčením mřížky se vybere paprsek požadované vlnové délky, který se dále zpracovává fotodetektorem na elektrický signál. Signál z fotodetektoru je poté zesílen, navzorkován, zaznamenán a zobrazen na obrazovce analyzátoru. V dalších krocích se provede měření postupně celého spektra vstupního záření. Dle šířky štěrbině lze ovlivnit, jak velká část spektra (v nm) dopadne na fotodetektor a výsledné hodnoty lze převést na spektrální hustotu výkonu záření s jednotkou $\frac{\text{mW}}{\text{nm}}$, případně $\frac{\text{dBm}}{\text{nm}}$. Další uspořádání OSA lze nalézt v lit. [1] v kap. 2.1.3.

Na obr. 8 je uvedena přenosová funkce výkonu v závislosti na difrakčním úhlu β monochromátorů s jednou i dvěma mřížkami. Porovnáním grafů lze vyčíst vyšší potlačení bočních vlnových délek u monochromátoru s více mřížkami, který tak dosahuje vyšší přesnosti výběru požadované vlnové délky, a tedy i vyššího rozlišení.



Obrázek 8: Přenosová funkce základního monochromátoru s jednou a dvěma mřížkami, 1000 vrypů/mm, převzato z lit. [1]

V případě použití optického vlákna jako vstupního a výstupního členu je pro navázání optického výkonu důležitá numerická apertura. Ta popisuje schopnost vlákna navázat optický výkon do svého jádra vzhledem k úhlu působení záření. Vlákná s větším průměrem jádra snadněji navazují optický výkon a tak budou v této práci použita křemenná vlákna napevno upevněná ve vstupu a výstupu z monochromátoru a plastová vlákna s větším průměrem pro vlastní měření útlumu. Numerická apertura je definována vztahem

$$NA = n_0 \sin \Omega_m = \sqrt{(n_1)^2 - (n_2)^2}, \quad (5)$$

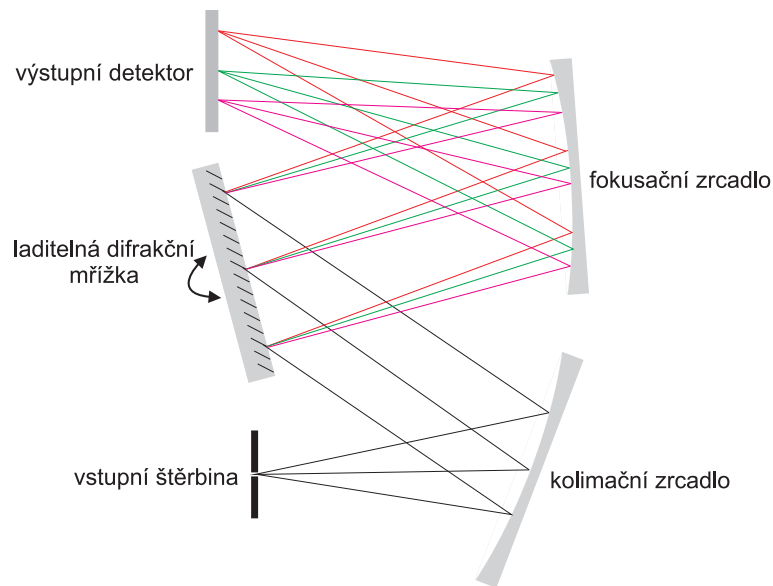
kde je n_0 index lomu materiálu, ze kterého paprsek navazuje, n_1 a n_2 index lomu jádra, resp. pláště a Ω_m je maximální úhel navázání (tzv. úhel akceptance).

2.2.2 Czerny–Turnerův monochromátor

Czerny–Turnerův monochromátor patří mezi nejčastěji využívané monochromátory. Tento monochromátor se skládá ze dvou statických konkávních zrcadel a lineární difrakční mřížky upevněné na otočném držáku. Jedno zrcadlo kolimuje paprsek vstupního světla a druhé zaostřuje (fokusuje) difraktované světlo z mřížky na výstupní detektor. Rozestavení jednotlivých komponent je zobrazeno na obr. 9. V případě použití kvalitních parabolických zrcadel se vyznačuje dobrou korekcí optických vad, především achromatismu a komy. Optické vady jako je astigmatismus či sférická aberace však přetrvávají. Symetrické uspořádání umožňuje částečnou korekci optických vad, k vyššímu potlačení komy vede složitější asymetrické uspořádání dle Rosendahlových kritérií [4]:

$$\frac{\cos^3 i}{\cos^3 \alpha} \sin \alpha = \frac{\cos^3 r}{\cos^3 \beta} \sin \beta, \quad (6)$$

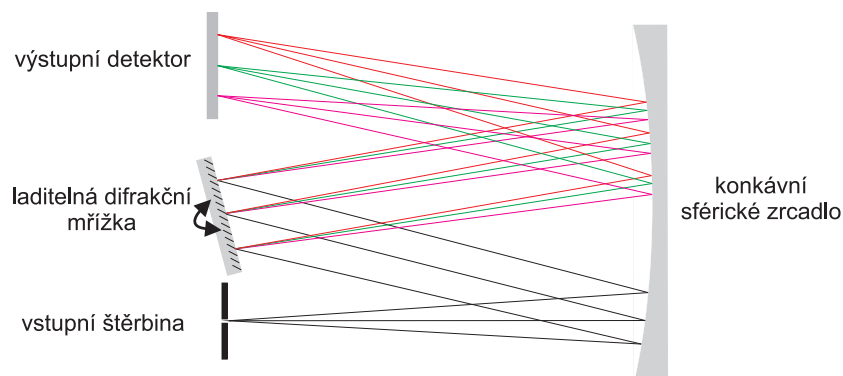
kde jsou i a r úhly dopadu a difrakce paprsku a α a β úhly paprsků dopadajících na kolimační zrcadlo a odraženého od fokusačního zrcadla.



Obrázek 9: Czerny–Turnerovo uspořádání monochromátoru se dvěma zrcadly

2.2.3 Fastie–Ebertův monochromátor

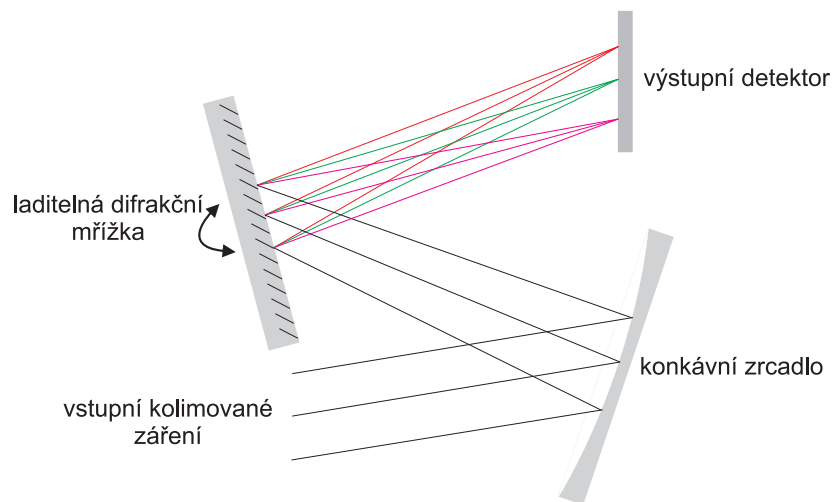
Monochromátor Fastie–Ebertův je zjednodušenou verzí monochromátoru Czerny–Turnerova a využívá pouze jedno společné konkávní zrcadlo pro kolimaci i fokusaci. Jeho uspořádání a průchod paprsků je znázorněn na obr. 10. Stejně jako Czerny–Turnerovo uspořádání částečně koriguje koma v tečné rovině. Správné nastavení tohoto monochromátoru je kvůli společnému zrcadlu mnohem obtížnější, a tak je v mnoha komerčních návrzích používáno spíše monochromátoru typu Czerny–Turner.



Obrázek 10: Ebert–Fastieho uspořádání monochromátoru s jedním společným zrcadlem

2.2.4 Monk–Gilliesonův monochromátor

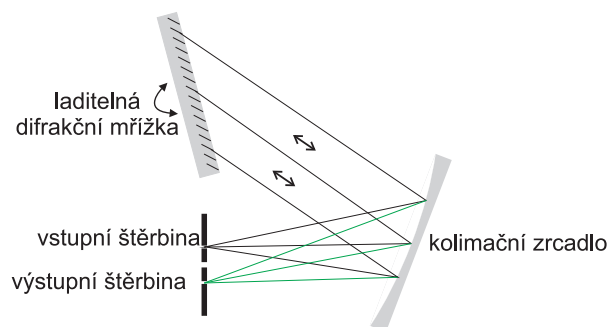
Toto uspořádání monochromátoru využívá pouze jedno konkávní zrcadlo, které je osvětlováno kolimovaným svazkem světelného záření, viz obr. 11. Konvergentní záření dopadá na mřížku ještě před ohniskem a difraktované záření poté dopadá do štěrbiny, která je uvnitř ohniska. Tento monochromátor se kvůli nekolimovanému záření dopadajícímu na mřížku vyznačuje velkou mírou chromatické aberace, přesto je pro svou jednoduchost využíván pro aplikace s nízkou náročností na rozlišení.



Obrázek 11: Monk–Gilliesonův monochromátor s mřížkou osvětlenou konvergujícím zářením

2.2.5 Littrowův monochromátor

Littrowův monochromátor se vyznačuje stejným úhlem dopadu α a úhlem difraktovaného paprsku β . Jeho uspořádání ukazuje obr. 12. Vstupní a výstupní štěrby jsou velmi blízko pod a nad disperzní rovinou, pro zřetelnost jsou ale v obr. 12 zobrazeny odděleně.



Obrázek 12: Littrowův monochromátor se stejnými úhly dopadu a difrakce

Mřížková rovnice 2 dostává díky stejným úhlům vstupního a výstupního paprsku tvar

$$m\lambda = 2d \sin \alpha. \quad (7)$$

2.2.6 Optické vady monochromátorů

Typické optické vady (aberrace) monochromátorů jsou koma, astigmatismus a sférická aberrace.

Koma je asymetrická vada zrcadla způsobená šikmým dopadem mimoosových paprsků, které se lámou nepravidelně. Obraz předmětu zatížený komou se projevuje poměrně složitým tvarem podobajícím se kometě. Minimalizace je možná volbou co nejmenšího úhlového odstupu od osy zrcadla a úplné eliminace komy se dosahuje použitím speciálních mimoosových zrcadel.

Astigmatismus způsobují šikmé paprsky, které se lámou odlišně v obou kolmých rovinách na osu zrcadla a bodový zdroj se tak zobrazuje jako úsečka anebo elipsa, která se ke krajům prodlužuje. Přeastřením se mohou protahovat kolmo na původní směr. Pro minimalizaci je možné použít toroidní zrcadla, která astigmatismus eliminují [27].

Sférická aberrace je způsobena odlišným lomem rovnoběžných paprsků blízkých optické ose a paprsků vzdálených od osy. Zaostřené paprsky neleží v jedné rovině a projevují se neostrotí. Sférickou aberaci lze minimalizovat použitím parabolických zrcadel a také uspořádáním paprsků co nejblíže optické ose či vhodným zacloněním.

2.3 Útlum optických vláken

Útlum se zpravidla vyjadřuje v decibelech, je závislý na vlnové délce λ použitého záření a můžeme jej definovat vztahem

$$\beta(\lambda) = -10 \log\left(\frac{P_2}{P_1}\right), \quad (8)$$

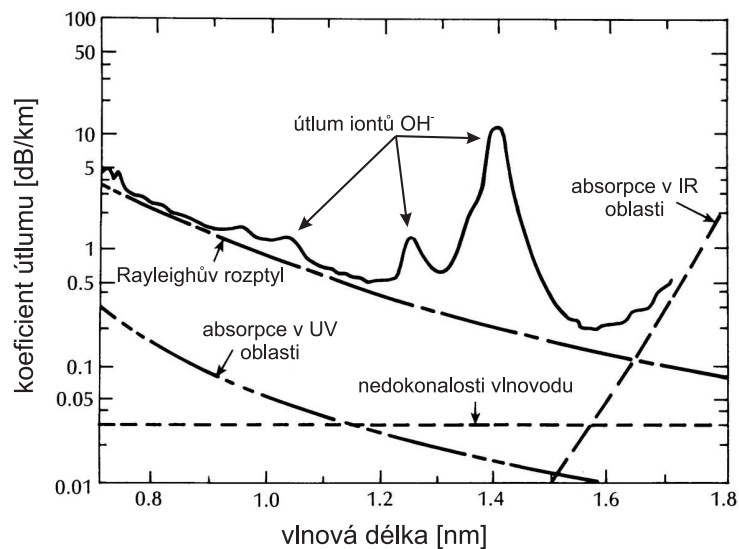
kde je P_2 optický výkon na konci vlákna a P_1 výkon vstupující do vlákna na jeho začátku.

Pro praktické využití bývá útlum často vztažen k délce l optického vlákna, a to koeficientem útlumu α s jednotkou dB.km^{-1} . Koeficient útlumu (měrný útlum) je tak dán vztahem

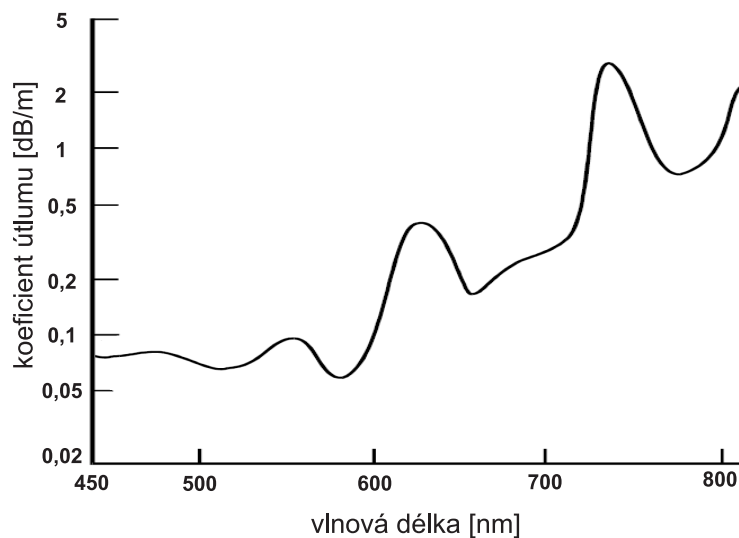
$$\alpha(\lambda) = -\frac{1}{l} 10 \log\left(\frac{P_2}{P_1}\right). \quad (9)$$

Typický průběh koeficientu útlumu křemenných vláken, u kterých je spektrální závislost známa velmi dobře, ukazuje obr. 13. U křemenných vláken lze dosáhnout velmi nízkých hodnot útlumu i pod $0,2 \text{ dB.km}^{-1}$ při vlnové délce 1550 nm . Více o útlumu křemenných vláken je možné nalézt v lit. [7].

Plastová optická vlákna (POF) se vyznačují útlumem několikanásobně vyšším než křemenná vlákna, přesto nabízejí poměrně nízký útlum ve viditelné oblasti, ale směrem k IČ oblasti útlum prudce roste. POF vlákna se vyznačují velkou hodnotou numerické apertury a tak se snadno navazují. Používají se proto pro jednodušší aplikace s levnými polovodičovými zdroji viditelného světla (laserové diody a LED). Výrobci udávají spíše chování na diskretních vlnových délkách, typicky kolem čáry červených polovodičových laserů a LED. Typické ztráty jsou 200 dB.km^{-1} při vlnové délce 680 nm . Útlum POF vlákna ze stavebnice Promax ilustruje obr. 14 a experimentální část by měla ověřit jeho průběh.



Obrázek 13: Graf typického průběhu útlumu křemenných optických vláken, v okolí 1400 nm je zřetelný nárůst útlumu vlivem OH iontů, převzato z [13]



Obrázek 14: Průběhu útlumu POF vlákna Promax, směrem k IČ oblasti je vidět znatelný nárůst útlumu, převzato z [9]

2.4 Měření útlumu optických vláken

Pro měření útlumu jsou nejčastěji využívány a doporučovány tyto tři metody:

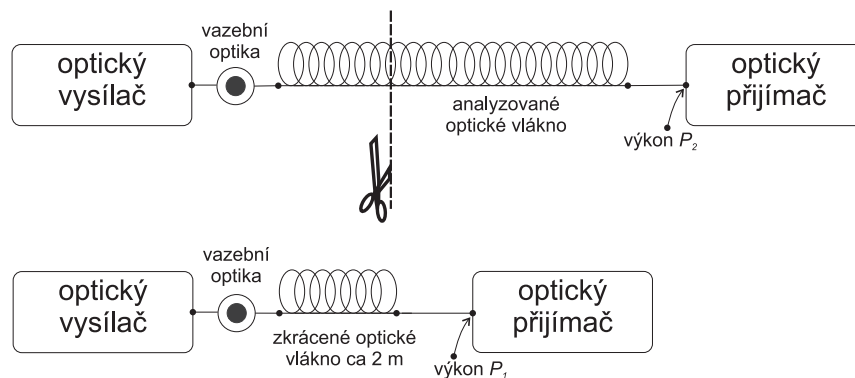
- Metoda dvou délek (Cut Back Method)
- Metoda vložených ztrát (Insertion Loss Method)
- Metoda měření zpětného rozptylu, známá jako OTDR (Optical Time Domain Reflectometry)

Metoda dvou délek je destruktivní, vlákno je nutné přestříhnout. Zbývající dvě metody jsou nedestruktivní. Metoda dvou délek a metoda vložených ztrát jsou metody přímé a hodnota optického výkonu je měřena přímo po průchodu vláknem. Nepřímou metodou je metoda zpětného rozptylu využívající měření časové závislosti zpětně rozptýleného výkonu.

V této práci bude použita metoda vložených ztrát, která i přes svou menší přesnost oproti metodě dvou délek přinese v případě použití plastového vlákna přijatelné výsledky, dá se snadno realizovat a není destruktivní.

2.4.1 Metoda dvou délek

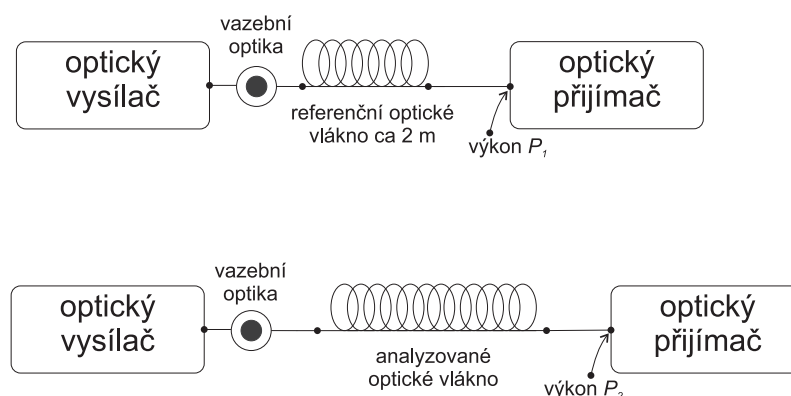
Metoda dvou délek je velmi přesnou metodou měření útlumu optických vláken. Způsob měření je ilustrován na obr. 15. Nejprve je změřen optický výkon P_2 na výstupu vlákna celé délky l . Poté je vlákno zkráceno na cca 2 m bez přerušení vstupního navázání a na konci tohoto krátkého úseku je změřen optický výkon P_1 , který je velmi blízký výkonu vstupujícímu do vlákna. Měrný útlum $\alpha(\lambda)$ se pak určí vztahem 9. Vzhledem k nutnosti přerušení vlákna je tato metoda destruktivní, časově náročná a přerušení a následné navázání je nutné provést ve vhodném prostředí.



Obrázek 15: Měření útlumu pomocí metody dvou délek

2.4.2 Metoda vložených ztrát

Metoda vložených ztrát je méně přesná oproti měření metodou dvou délek, a to z důvodu obtížnosti dodržení stejných podmínek navázání na zdroj, a navíc čela vláken mohou mít odlišnou kvalitu. Naopak velkou výhodou je, že je to metoda nedestruktivní, a proto je používána častěji. Postup měření touto metodou je zobrazen na obr. 16. Nejprve je změřen optický výkon P_1 přenesený referenčním vláknem délky cca 2 m. Poté je změřen výkon P_2 na konci měřeného vlákno o délce l a výsledný útlum je opět dán rovnicí 9. Pro eliminaci vlivu rozdílné distribuce svazku v opačném směru se v praxi často provádí měření z obou konců optického vlákna a výsledné naměřené hodnoty útlumu se zprůměrují.



Obrázek 16: Měření útlumu pomocí metody vložených ztrát

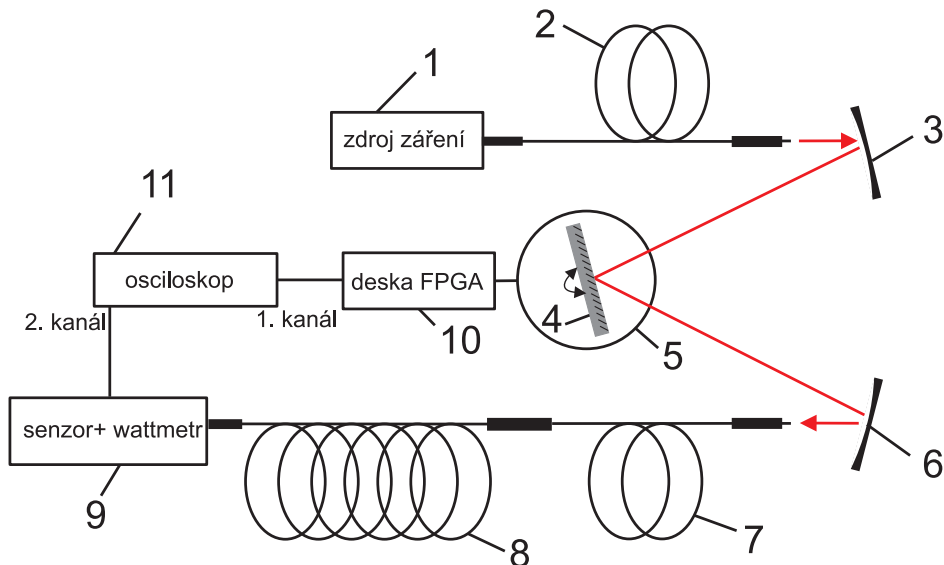
2.4.3 Metoda měření zpětného rozptylu

Metoda zpětného rozptylu je metodou měření v časové oblasti a je často nazývána také optickou časovou reflektometrií (OTDR). Je založena na skutečnosti, že energie v optickém vlákně rozptylována, především Rayleighovým rozptylem a odrážena od různých nehomogenit. Měřením amplitudy a časového posunu se získají informace o útlumu vlákna jak v celé délce, tak i v jednotlivých úsecích, vzdálenosti svárů či konektorů, správnosti instalace a případné poruše optické trasy. Výhodou této metody je její přesnost a snadné a rychlé nasazení. Nevýhodou je mrtvá zóna blízko vstupního navázání, a tak je pro plastová vlákna kratších délek a s velkým průměrem prakticky nepoužitelná.

3 Experiment

3.1 Úvod

Pro měření spektrální závislosti útlumu bude sestaven monochromátor typu Czerny–Turner (popsaný v kap. 2.2.2), který se vyznačuje snadnou konstrukcí a lepšími možnostmi nastavení než např. monochromátor Fastie–Ebertův. Zdrojem záření bude širokopásmová halogenová výbojka a monochromátor umožní postupné vybírání úzké části jejího spektra. Na výstupu monochromátoru bude za měřeným vláknem umístěn wattmetr s křemíkovým senzorem v roli převodníku optického výkonu na elektrický signál, který bude pomocí 2. kanálu osciloskopu zaznamenáván. Na 1. kanál osciloskopu bude přiveden výstup z desky FPGA, která bude zajišťovat přesné měření polohy. Celou situaci nastiňuje obr. 17.



Obrázek 17: Schéma uspořádání experimentu

Seznam hlavních funkčních bloků a jejich funkcí (detailnější popis v další kapitole):

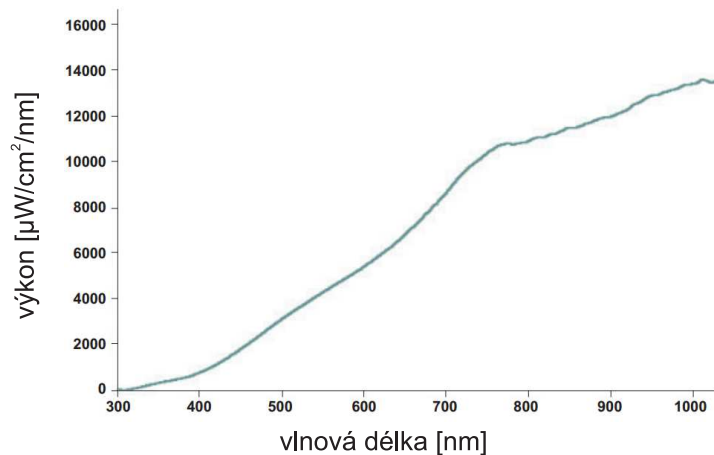
číslo	typ	popis a technické parametry
1	Ocean Optics HL-2000-FHSA	halogenový, širokopásmový 20 W zdroj záření
2	Ocean Optics QP200-2-VIS-BX	křemenné vstupní vlákno s 200 μm jádrem
3	Thorlabs CM254-050-E02	kulové, konkávní zrcadlo s $f = 50$ mm, kolimuje
4	Thorlabs GR25-0605	difrakční mřížka s 600 vr./mm, rozkládá světlo
5	Thorlabs CR1/M-Z7	otočný stolek, natáčí mřížku
6	Thorlabs CM254-050-E02	kulové, konkávní zrcadlo s $f = 50$ mm, fokusuje
7	Ocean Optics QP600-2-VIS-BX	křemenné výstupní vlákno s 600 μm jádrem
8	PROMAX HFBR	měřené plastové vlákno s 975 μm jádrem
9	Thorlabs PM100D + S120C	wattmetr s křemíkovým senzorem
10	Altera NIOS Apex Board	FPGA deska pro řízení otáčení
11	Voltcraft DSO 4022	digitální osciloskop s pamětí

Tabulka 1: Přehled použitých komponent

3.2 Popis klíčových prvků

3.2.1 Širokopásmový zdroj záření

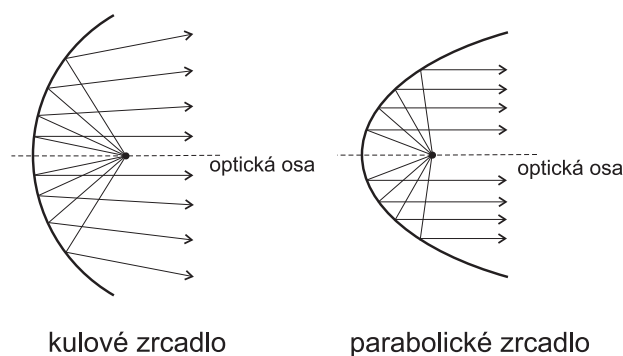
Jako zdroj záření byla použita halogenová výbojka Ocean Optics HL-2000-FHSA [16] s výkonem 20 W, poskytující širokopásmové záření v rozsahu 360 až 2400 nm. Tento model je vybaven i držákem filtru a nastavitelnou clonou. Spektrální hustotu výkonu tohoto zdroje zobrazuje obr. 18.



Obrázek 18: Spektrální hustota výkonu halogenové zářivky HL-2000-FHSA, převzato z [16]

3.2.2 Zrcadla

Jako kolimační a fokusační zrcadla by bylo pro optimální zobrazení nejlepší použít parabolická zrcadla, jejichž povrch má tvar rotačního paraboloidu, a která vynikají přesnější fokusací do ohniska v případě použití rovnoběžných paprsků. Naproti tomu u kulových zrcadel se vyskytuje sférická vada, vyznačující se nepřesným odrazem do ohniska v případě použití rovnoběžných paprsků ve větší vzdálenosti od optické osy. Sférická (kulová) vada je ilustrována na obr. 19.



Obrázek 19: Srovnání odrazu na kulovém a parabolickém konkávním zrcadle

Výroba parabolických zrcadel je však složitější a dražší, a tak jsou pro jednodušší aplikace často parabolická zrcadla nahrazována běžnějšími a levnějšími kulovými zrcadly. Dalším problémem použití kulových, ale i parabolických zrcadel spočívá v tom, že konstrukčně není možné docílit umístění zdroje záření přímo do ohniska, neboť by tento zdroj spolu s uchycením zaclánel odraženému kolimovanému svazku světla. Pro co nejmenší optické vady je nutné volit co nejmenší odchylku zdroje od optické osy. Ještě přesnějšího zobrazení by bylo dosaženo použitím několikanásobně dražších mimoosových parabolických zrcadel. Příklad těchto zrcadel od Thorlabs je možné nalézt v [21].

V této práci bude použito konkávních sférických zrcadel Thorlabs CM254-050-E02 [20] o průměru 1" (2,54 cm), s ohniskovou vzdáleností 50 mm. Tato zrcadla jsou určena pro viditelnou oblast 400 až 750 nm a jsou pokryta dielektrickým povlakem s odrazivostí vyšší než 99 %.

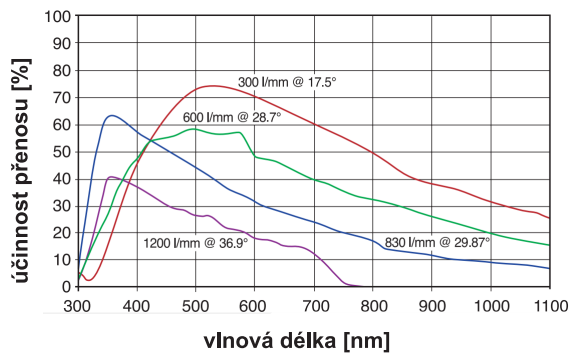
Upevnění těchto zrcadel je voleno pomocí laditelných držáků Thorlabs KMS/M a šroubovacích objímek MH25T. Obě zrcadla jsou upevněna na mikroposuvných stolech, které umožňují přesné doladění zaostření.

Pro sladění pomocí CCD kamery (v kap. 3.4.2) bylo jako fokusační zrcadlo použito sférické zrcadlo s ohniskovou vzdáleností 300 mm ze stavebnice LEOK.

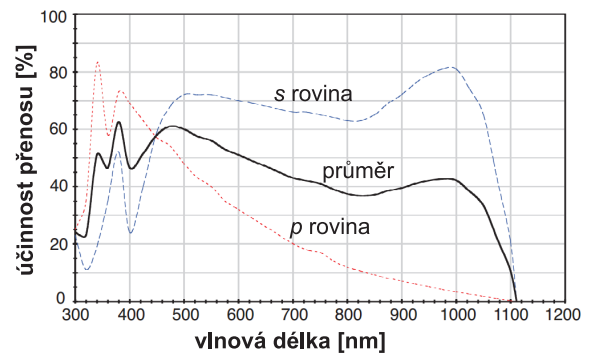
3.2.3 Difrakční mřížka

Obr. 20a zobrazuje porovnání replikovaných reflexních rytých difrakčních mřížek firmy Thorlabs s různou mřížkovou konstantou. Z obrázku je patrné, že čím nižší je počet vrypů/mm, tím vyšší je účinnost přenosu energie a také je účinnost posunuta směrem k IČ oblasti. Holografické mřížky se vyznačují značnou závislostí na polarizaci (označované stavy p a s) a složitým průběhem, jak je ukázáno na obr. 20b.

Pro tuto práci byla vybrána rytá mřížka Thorlabs GR25-0605 [19] s 600 vrypů/mm, jež je určena pro spektrální oblast okolo 500 nm. Tato mřížka je čtvercového tvaru s rozměry 25×25 mm a tloušťkou 6 mm. Účinnost této mřížky zobrazuje obr. 21.

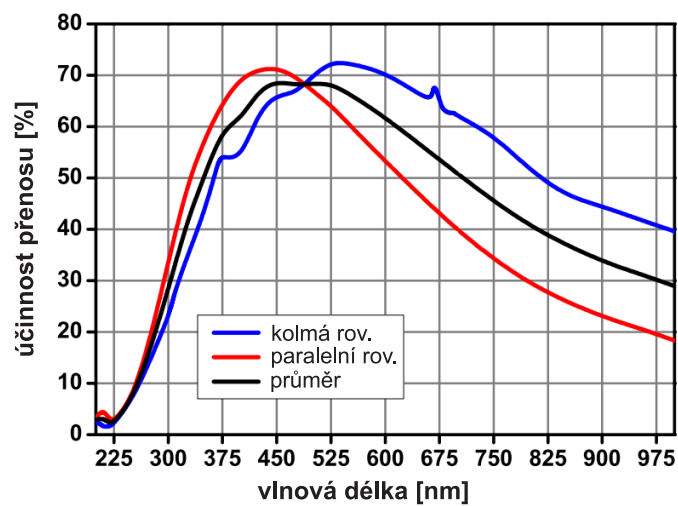


(a) Ryté difrakční mřížky



(b) Holografická mřížka

Obrázek 20: Porovnání přenosových charakteristik rytých difrakčních mřížek Thorlabs s různými mřížkovými konstantami a holografické mřížky s 1800 vrypy/mm, převzato z [17], resp. [18]



Obrázek 21: Účinnost přenosu zvolené mřížky Thorlabs GR25-0605, převzato z [19]

3.2.4 Optická vlákna

Jako vstupní a výstupní optická vlákna, užívaná pro stálé uchycení v monochromátoru, byla použita křemíková vlákna firmy Ocean Optics délky 2 m s konektory SMA, a to 200 μm vlákno QP200-2-VIS-BX jako vstupní a 600 μm vlákno QP600-2-VIS-BX jako výstupní [15]. Vlákna byla upevněna pomocí držáků ze sady LEOK. Pro konečné měření útlumu byla použita POF vlákna z materiálu PMMA ze sady Promax [9] s průměrem jádra 975 μm a celkovým průměrem 1 mm. Délky použitých měřených vláken byly cca 1 a 50 m.

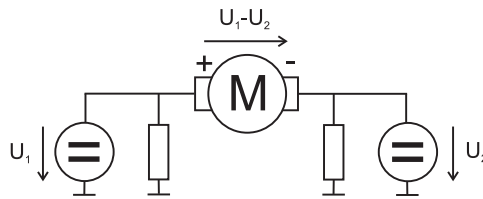
3.2.5 Optoelektronický převodník

Snímání dat bylo zajištěno wattmetrem Thorlabs PM100D [24], na který byl napojen křemíkový senzor Thorlabs S120C určený pro měření optického výkonu o rozsahu 50 nW–50 mW v oblasti 400 až 1100 nm. Analogový výstup detektoru (0–2 V) úměrný výkonu dopadajícího záření na senzor bude použit pro záznam pomocí osciloskopu, a použijeme jej tedy jako detektor se zesilovačem.

3.2.6 Řízení natáčení mřížky

Natáčení difrakční mřížky je řešeno pomocí otočného stolku Thorlabs CR1/M-Z7 [26], ke kterému je mřížka uchycena držáky sestavenými z dostupných dílů. Tento otočný stolek umožňuje kontinuální otáčení v celém rozsahu 360° a směr otáčení je závislý od polarity jeho napájení. Otáčení stolku bylo vyřešeno pomocí dvoukanálového napájecího zdroje TTI CPX400D [23], který umožňuje jednoduchým obvodem viz obr. 22 nastavení obou polarit napětí na motoru, a tedy jeho směr otáčení. Tento otočný stolek má vyvedeny 2 kanály informující o poloze, které byly vyvedeny k přípravku s hradlovým polem.

Přesné nastavení polohy stolku s mřížkou bylo provedeno pomocí FPGA vývojové desky Altera NIOS Apex Board. K ní byly připojeny 5 V výstupní signály A a B otočného stolku, nahraný program ukazuje příloha [A]. V FPGA je nejprve realizováno ošetření zákmitů, dále obousměrný čítač a převodník na hexadecimální znaky pro displej. Pulsy z motorového



Obrázek 22: Schéma zapojení napájení a řízení motorového stolku

stolku byly jednak zobrazeny na displeji tohoto přípravku v poměru pulsů zobrazených ku skutečným 1:32 a také na 1. kanál osciloskopu s poměrem 1:8, který byl použit pro odečet polohy otáčení. Dvoustupňový displej umožňuje zobrazení 256 hodnot v hexadecimální podobě. Pomocí hodnot na displeji bylo řízeno otáčení stolku.

Otočný stůl nemá žádnou indikaci referenční polohy. K tomu bylo využito záření z HeNe laseru. Tentýž laser byl použit i ke zjištění počtu pulsů zabudovaného snímače otáčení při otočce o daný úhel. Poměr pulsů k úhlu otočení byl určen ze známého rozpětí úhlů -3. a 3. řádu tohoto laseru $74,04^\circ$ dle výpočtů z kap. 3.4.1 a z naměřených 953 pulsů mezi těmito řády na hodnotu $4634 \text{ pulsů}/360^\circ$ na displeji. Displej zobrazuje 1 puls jako 32 pulsů přípravku a na přípravku tak vychází $148\,279 \text{ pulsů}/360^\circ$.

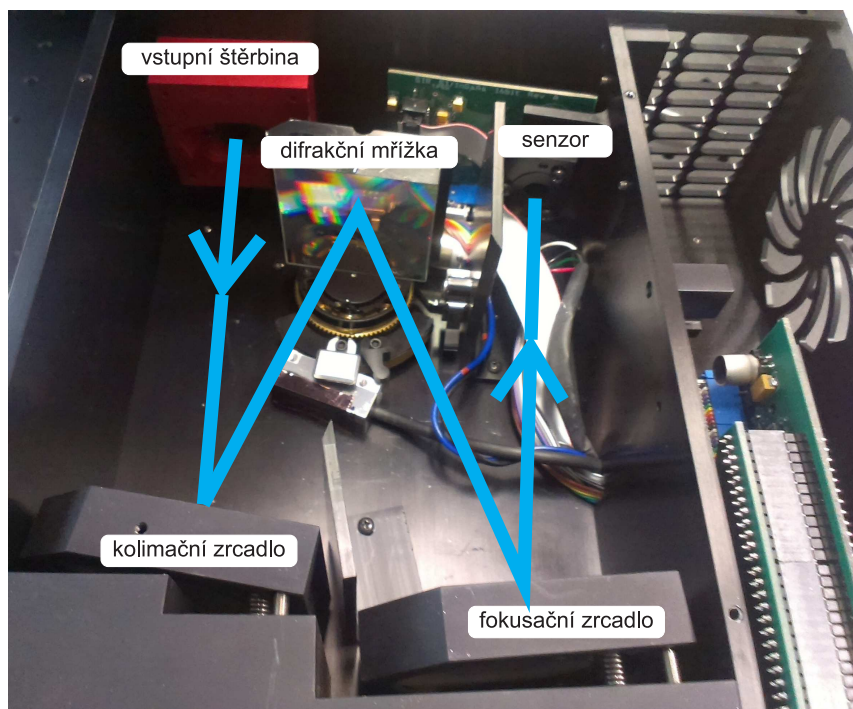
Dále bylo natáčeno mřížkou vždy o 16 pulsů na displeji, jednotlivé polohy byly zaznamenány a pomocí OSA byla přesně určena jejich vlnová délka. Těchto 16 pulsů odpovídá změně vlnové délky o 4,18 nm.

3.2.7 Osciloskop

Pro záznam výsledků měření bude použit digitální osciloskop Voltcraft DSO 4022 s pamětí 4000 vzorků na kanál. Na jeho 1. kanálu bude sledován výstup z desky FPGA, a tedy poloha držáku mřížky. 2. kanál bude sloužit k záznamu výstupu z detektoru a odpovídá tedy výkonu dopadajícího záření. Pomocí USB připojení do PC budou naměřená data načtena a dále zpracována.

3.2.8 Optický spektrální analyzátor

Pro pomocná měření, určování vybrané vlnové délky sestaveného monochromátoru a pro určení šířky spektrální čáry byl použit OSA SandHouse SIR 1700 VIS/NIR. Tento mřížkový analyzátor je určen pro vlnový rozsah 400 až 1700 nm a je vybaven difrakční mřížkou s 1200 vrypy/mm. Jeho vnitřní uspořádání ilustruje obr. 23. Pro rozklad spektra využívá monochromátoru v uspořádání Czerny–Turner. Pro měření využívá dva detektory, křemíkový s nejvyšší citlivostí v okolí vlnové délky 800 nm a druhý InGaAs s nejvyšší citlivostí na 1550 nm. Optický vstup je řešen pomocí konektoru SMA. Analyzátor disponuje 24bitovým analogovým převodníkem, a je tedy schopen rozlišit více než 16,7 miliony hodnot. Analyzátor se připojuje k PC pomocí USB2.0 konektoru a zobrazení naměřených dat probíhá v programu dodaného k přístroji.



Obrázek 23: Vnitřní uspořádání analyzátoru SIR 1700 VIS/NIR s monochromátorem typu Czerny–Turner

3.3 PC simulace mřížkového monochromátoru

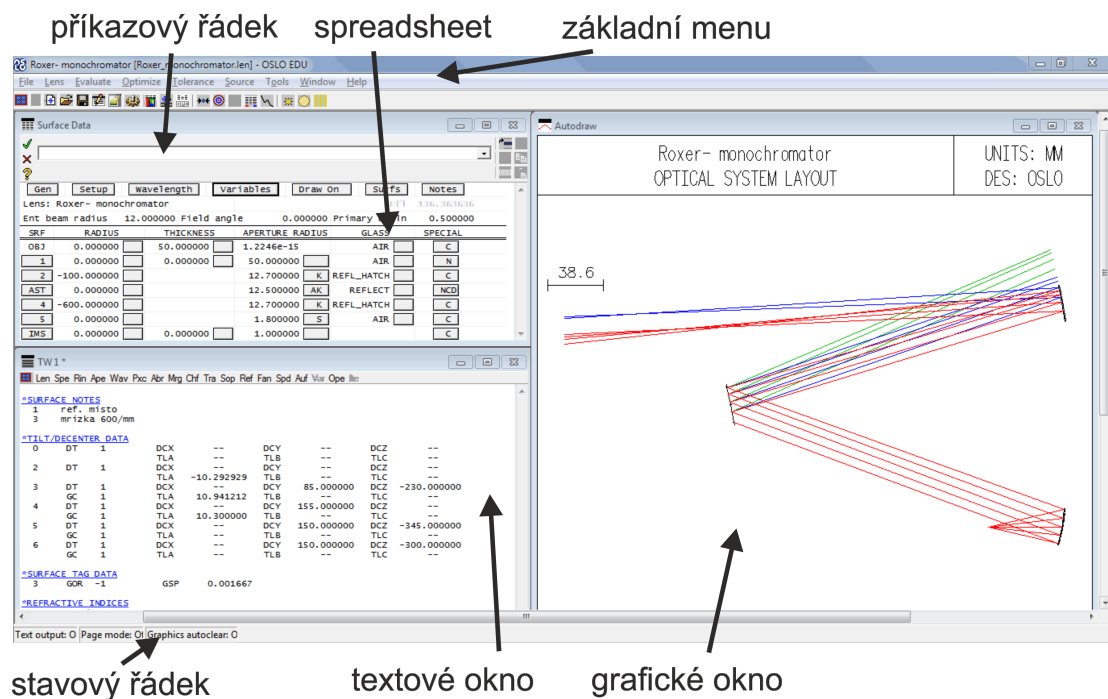
V rámci této bakalářské práce byla provedena simulace Czerny–Turnerova monochromátoru pomocí programu OSLO (Optics Software for Layout and Optimization) od firmy Lambda Research. Aktuální verzi lze stáhnout z webových stránek výrobce, viz lit. [11] a dokumentaci k programu lze nalézt tamtéž. Program ve studentské verzi EDU je s omezeným počtem funkcí (maximum optických ploch je 10 či nemá podporu importu CAD modelů) dostupný zdarma.

Program OSLO je simulátorem optických soustav pracujícím na bázi paprskové optiky. Je vynikajícím pomocníkem při návrhu a optimalizaci i složitých optických soustav s mnoha lámavými, difrakčními či reflexními povrchy a obsahuje knihovny mnoha optických materiálů. Umožňuje různorodé simulace soustav s prvky ležícími i neležícími na jedné ose, lze definovat vyosení či natočení prvku a to jak absolutně, tak relativně vzhledem k jinému prvku. Pokročilí uživatelé uvítají možnost vlastního programování funkcí, čímž se tak program stává velmi silným nástrojem pro optický návrh. Soustavy je možné podrobit různým paprskovým analýzám, lze zjišťovat ohniskovou vzdálenost, sledovat průběh optických vad, přenosové a rozptylové charakteristiky a mnoho dalších vlastností.

Veškeré struktury je nutné definovat jako jednotlivé lámavé plochy. Pořadí zadávaných ploch je zleva doprava dle optické konvence – vpravo je zobrazovaný předmět, vlevo jeho výstupní obraz.

Základní obrazovku programu OSLO s již sestaveným monochromátorem ilustruje obr. 24. Lze zde vidět rozložení jednotlivých oken i s popisky. V grafickém okně je názorně zobrazeno rozložení vstupního světla jednotlivých vlnových délek. Nastavení jednotlivých povrchů se provádí v okně Surface Data Spreadsheet (dále jen Surface Data), kde se definují veškeré optické povrchy s jejich velikostmi, vzdálenostmi a vlastnostmi.

Základní nastavení a rozložení jednotlivých prvků uvádí detail okna Surface Data na obr. 25. Vlastními povrchy jsou zde kolimační zrcadlo na ploše 2, difrakční mřížka s označením AST (Aperture Stop) a fokusační zrcadlo na ploše 4. Další plochy jsou zde pro

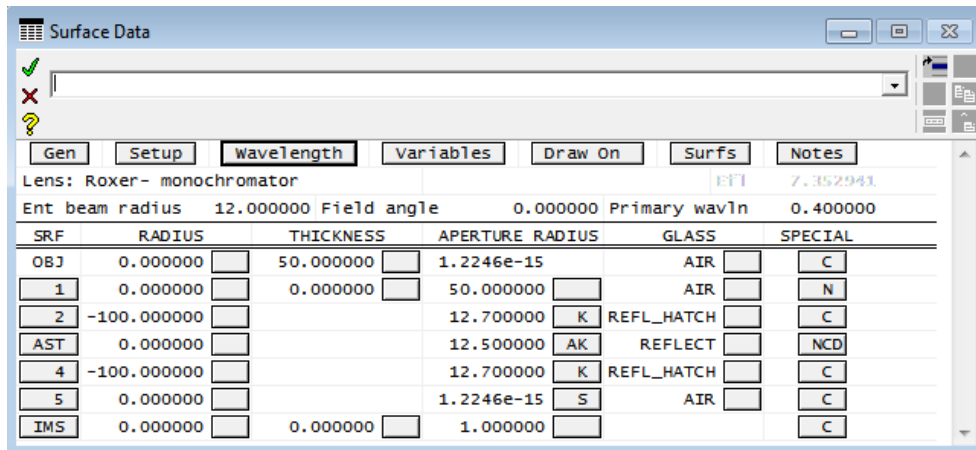


Obrázek 24: Program OSLO a přehled základního nastavení

specifikaci polohy objektů. Plocha OBJ (Object Surface) definuje polohu zdroje zobrazení, IMS (Image Surface) definuje projekční rovinu, ve které mohou být počítány různé charakteristiky. Radius (poloměr zakřivení) je záporný pro konkávní zrcadla. Thickness (tloušťka) udává vzdálenost od definované plochy k následující.

Celkové nastavení systému z textového okna je na obr. 26. Parametry jednotlivých povrchů jsem zvolil následující:

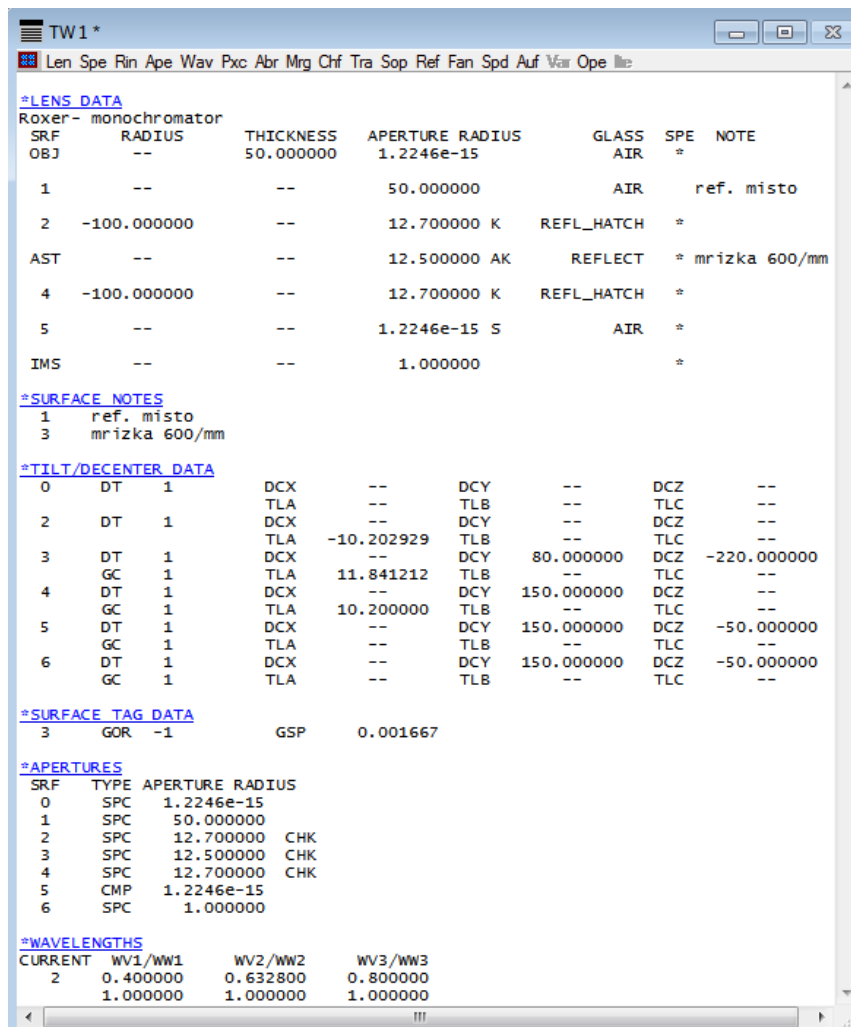
- Úhel vstupního paprsku (Ent Beam Radius) jsem nastavil na 12° tak, aby právě osvětlovalo celé zrcadlo a vzdálenost k zrcadlu (Thickness) na 50 mm. Uvažované vlnové délky byly nastaveny v okně Wavelength, které je součástí okna Surface data. Nastavil jsem 400, 632,8 a 800 nm, které zhruba odpovídají měřenému rozsahu a 632,8 nm je použitý červený HeNe laser.
- Kolimační zrcadlo s ohniskem 50 mm, a tedy poloměrem zakřivení -100 mm, je natočeno o $-10,2^\circ$ a jeho apertura je 12,7 mm. Zrcadlo se musí definovat ve sloupci Glass



Obrázek 25: Definice jednotlivých ploch v okně Surface Data

jako REFL_HATCH, nastavení otočení je ve sloupci Special, dále Coordinates a zde úhel TLA.

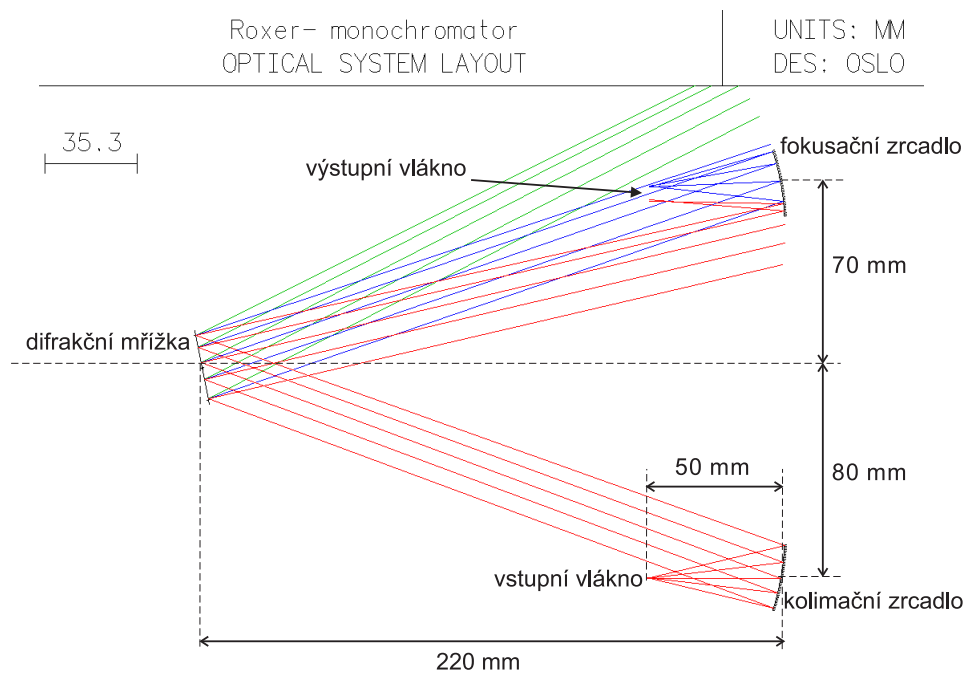
- Difrakční mřížka se definuje ve sloupci Glass jako REFLECT a vlastnosti mřížky lze nastavit v okně Surface data ve sloupci Special. Nastavil jsem difrakční řád (Grating order) na -1 a mřížkovou konstantu (Grating spacing) na 0,00167 mm, což odpovídá mřížce s 600 vrypy/mm. Vzhledem ke kolimačnímu zrcadlu je mřížka posunuta o 80 mm ve směru osy Y (vertikálně) a o -220 mm ve směru osy Z (horizontálně).
- Fokusační zrcadlo je stejné jako kolimační, pouze je natočeno opačným směrem o $10,2^\circ$ a oproti kolimačnímu zrcadlu je posunuto o 150 mm ve směru osy Y.



Obrázek 26: Přehled nastavení jednotlivých ploch

3.4 Konstrukce monochromátoru

Konstrukce monochromátoru byla použita totožná jako v simulaci v OSLU. Rozložení na desce respektovalo simulaci a pouze drobné odchylky nastaly kvůli prostorové náročnosti některých prvků. Konečné uspořádání ukazuje obr. 27.



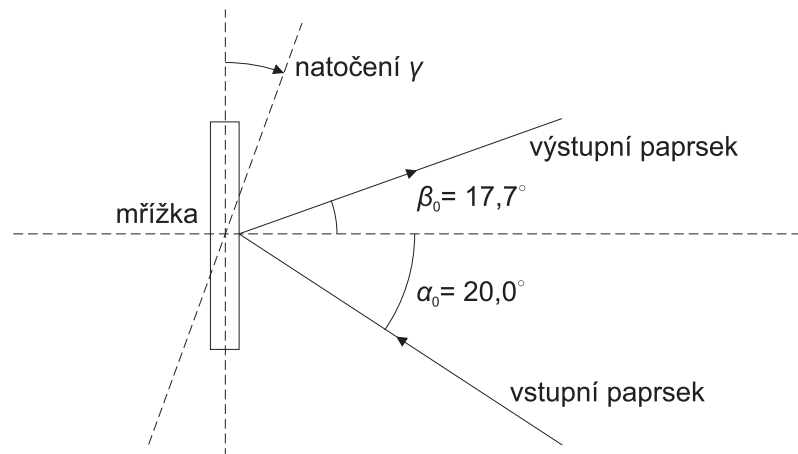
Obrázek 27: Navržený Czerny-Turnerův monochromátor v OSLO

3.4.1 Výpočty geometrie

Obr. 28 zobrazuje geometrii sestaveného monochromátoru s úhlem natočení mřížky γ a pevně daným vstupním úhlem $\alpha_0 = 20,0^\circ$ a výstupním úhlem $\beta_0 = 17,7^\circ$. Úhel dopadu na mřížku α a úhel difraktovaného paprsku β jsou dány vztahy $\alpha = \alpha_0 - \gamma$ a $\beta = \beta_0 + \gamma$.

Základní mřížková rovnice 2 tak dostává tvar

$$m\lambda = d(\sin(17,7^\circ - \gamma) - \sin(20,0^\circ + \gamma)). \quad (10)$$



Obrázek 28: Geometrie monochromátoru

Řešení této rovnice, a tedy úhly natočení mřížky γ pro jednotlivé řády v rozsahu -3. až 3. pro HeNe laser s $\lambda = 632,8$ nm, který bude použit dále pro nastavení celého monochromátoru, ukazuje následující tabulka:

difrakční řád [-]	spočtený úhel γ [°]
-3	-35,87
-2	-22,51
-1	-10,43
0	1,15
1	12,73
2	24,81
3	38,17

Tabulka 2: Vypočtené úhly natočení mřížky pro jednotlivé řády HeNe laseru

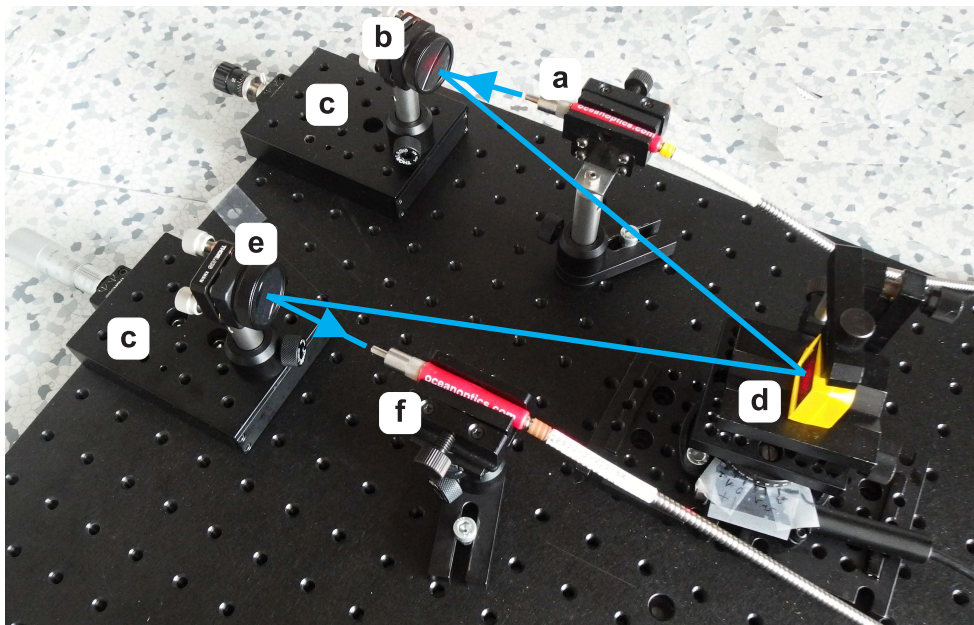
Nejlepšího prostorového rozložení a vysoké intenzity difraktovaného záření se dle orientačního měření nachází v -1. řádu a proto bude pro hlavní měření použit právě -1. difrakční řád. Pro vybrané vlnové délky a -1. řád ukazuje tab. 3 vypočtené hodnoty úhlů natočení mřížky γ z mřížkové rovnice 10.

vlnová délka [nm]	spočtený úhel γ [°]
400	-6,14
450	-7,05
500	-7,97
550	-8,90
600	-9,82
632,8	-10,43
700	-11,68

Tabulka 3: Vypočtené úhly natočení mřížky pro jednotlivé vlnové délky v -1. řádu

3.4.2 Postup nastavení monochromátoru

Celková konfigurace již sestaveného monochromátoru je zřejmá z obr. 29.



Obrázek 29: Uspořádání sestaveného monochromátoru: a) vstupní vlákno, b) kolimační zrcadlo, c) lineární mikroposuvy, d) difrakční mřížka, e) fokusační zrcadlo, f) výstupní vlákno

Nastavení proběhlo v následujících krocích:

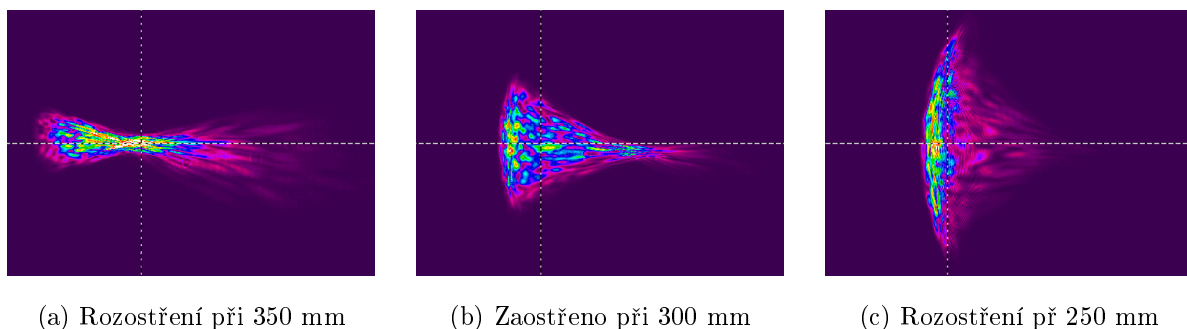
- Hrubé sestavení a nastavení stejné výšky optických prvků
- Nastavení správné kolimace vstupního svazku a nasměrování na mřížku
- Doladění fokusačního zrcadla
- Nastavení polohy výstupního vlákna

Po hrubém sestavení dle simulované konfigurace bylo nutné nastavení všech optických prvků – mřížky, vstupního a výstupního vlákna a obou zrcadel, do stejné výšky. Sestavené držáky umožnily nastavení této výšky na 8,4 cm.

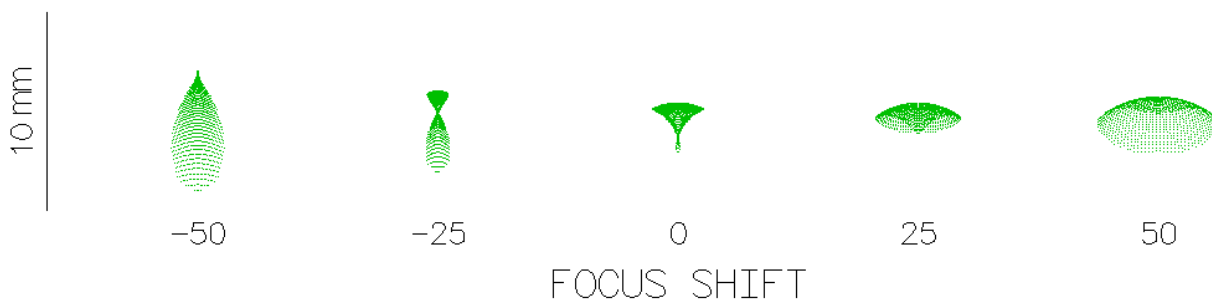
Dále bylo provedeno nastavení správné kolimace vstupního svazku z kolimačního zrcadla. To bylo provedeno mikroposuvným držákem, na němž bylo uchyceno k desce kolimačního zrcadlo, a pomocí kolejnice rovnoběžné se spojnicí kolimačního zrcadlo–mřížka. Pomocí terčíku, kterým bylo po kojení pohybováno, bylo nastaveno uchycení tak, aby byl sledovaný svazek kolimovaný, tj. obrazec stejně velký a mířil přímo na střed mřížky.

Důležitým bodem je správné postavení fokusačního zrcadla. Kolejnice byla nyní nastavena do výstupního směru a na posuvném držáku byla pro nastavení správné zaostřené roviny pro výstupní vlákno uchycena citlivá kamera Ophir Spiricon SP620U [28] s CCD čipem a USB připojením k PC. Bohužel kvůli velikosti této kamery, která by zastiňovala pa-prsek mezi mřížkou a fokusačním zrcadlem, nebylo možné uspořádání s 50 mm zrcadlem. Místo něj bylo použito sférické zrcadlo s ohniskovou vzdáleností 300 mm ze stavebnice LEOK. Jemné doladění bodu v rovině výstupního vlákna bylo provedeno mikroposuvným držákem fokusačního zrcadla. Obr. 30 ukazuje záznamy z kamery.

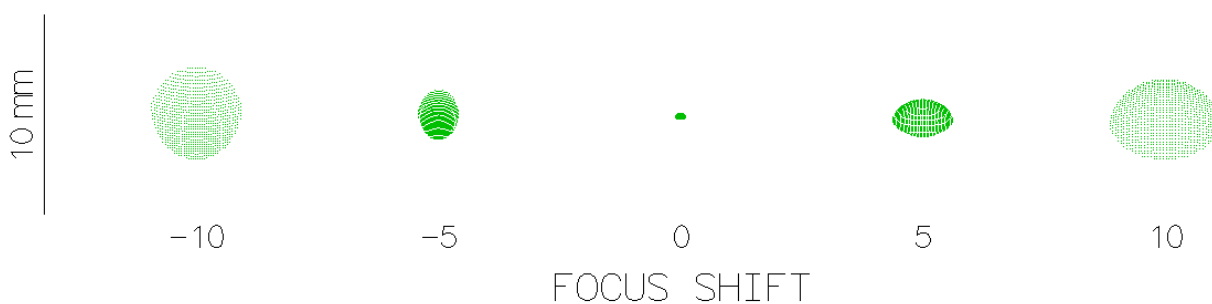
Obrazce odpovídají simulaci v OSLU ukázané na obr. 31 a jsou zatížené optickými vadami (především astigmatismem a komou) a vysokým rozostřením. Tyto vady vedly nakonec k použití opět 50 mm zrcadla, což se projevilo znatelným vylepšením optických vad, viz obr. 32.



Obrázek 30: Zobrazení bodu při různém zaostření s 300 mm zrcadlem (velikost výřezu odpovídá cca 4×3 mm)

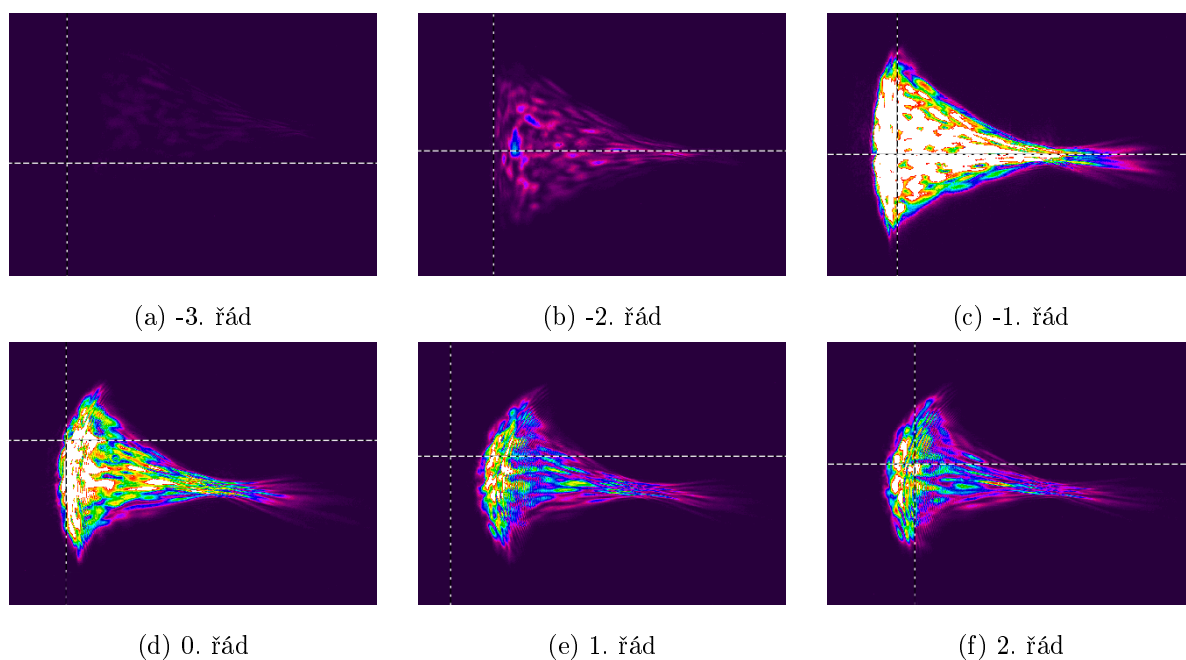


Obrázek 31: Simulace zaostření s 300 mm zrcadlem ve výstupní rovině v OSLU (otočení o 90° vyplývá z geometrie simulace)



Obrázek 32: Simulace zaostření s 50 mm zrcadlem ve výstupní rovině v OSLU

Otáčením mřížky byla dále ověřena viditelná difrakční maxima a to v rozsahu -3. až 2. řádu. Intenzitu jednotlivých řádů ukazuje obr. 33 při stejném nastavení citlivosti kamery. Nejlepších výsledků a nejvyšší intenzity bylo dosaženo pro -1. řád, a další měření byla tedy prováděna právě v -1. řádu.



Obrázek 33: Intenzita jednotlivých řádů při stejném nastavení kamery (velikost výřezu odpovídá cca 4×3 mm)

Přesné doladění polohy výstupního $600 \mu\text{m}$ vlákna bylo provedeno pomocí měřiče optického výkonu Tempo 557B s rozsahem $+3$ až -60 dBm tak, aby výstupní výkon byl co nejvyšší. Po konečném sladění celé soustavy byl naměřen nejlepší výstupní výkon $-9,7$ dBm při použití HeNe laseru na $-1.$ řádu. Vstupní výkon tohoto měření činil asi -4 dBm.

3.5 Výsledky a měření hotového monochromátoru

3.5.1 Určení spektrální šířky

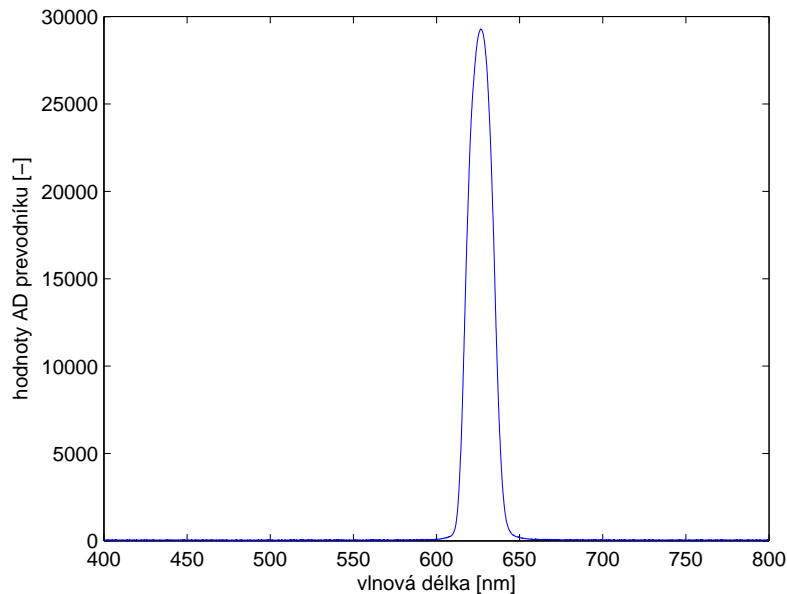
Po připojení širokopásmové halogenové výbojky Ocean Optics HL-2000-FHSA bylo provedeno měření šířky pásma monochromátoru pro několik vybraných vlnových délek, které zobrazuje tab. 4. Z naměřených údajů lze vyčíst průměrnou spektrální šířku cca 18 nm. Tento rozsah je způsoben především průměrem jádra 600 μm výstupního vlákna, kdy jádro vlákna funguje jako štěrbina, která vymezuje procházející šířku pásma a širší štěrbina tak propouští širší úsek pásma, dále optickými vadami monochromátoru (rozšíření svazku v důsledku astigmatické vady či komy) a také chybou měření samotného OSA. Spektrum pro vlnovou délku např. 626 nm ilustruje obr. 34.

střední vlnová délka [nm]	rozsah pro pokles o 3 dB [nm]	šířka pásma $\Delta\lambda$ [nm]
471,0	461,5–479,3	17,8
507,8	499,7–517,1	17,4
552,9	543,6–561,6	18,0
626,1	617,6–635,1	17,5
645,9	637,3–653,9	16,6
707,4	697,2–716,5	19,3
749,0	740,6–758,9	18,3

Tabulka 4: Šířka pásma sestaveného monochromátoru pro vybrané vlnové délky

3.5.2 Měření útlumu plastového optického vlákna

Měření útlumu bylo provedeno metodou vložených ztrát (kap. 2.4.2). Pro měření byla použita POF vlákna PROMAX o průměru jádra 975 μm s délkou cca 1 a 50 m. Na 1. kanál osciloskopu byl vyveden signál z přípravku zaznamenávající polohu mřížky a na 2. kanál byl přiveden analogový signál z wattmetru. Měření probíhalo v oblasti cca 430 až 850 nm.

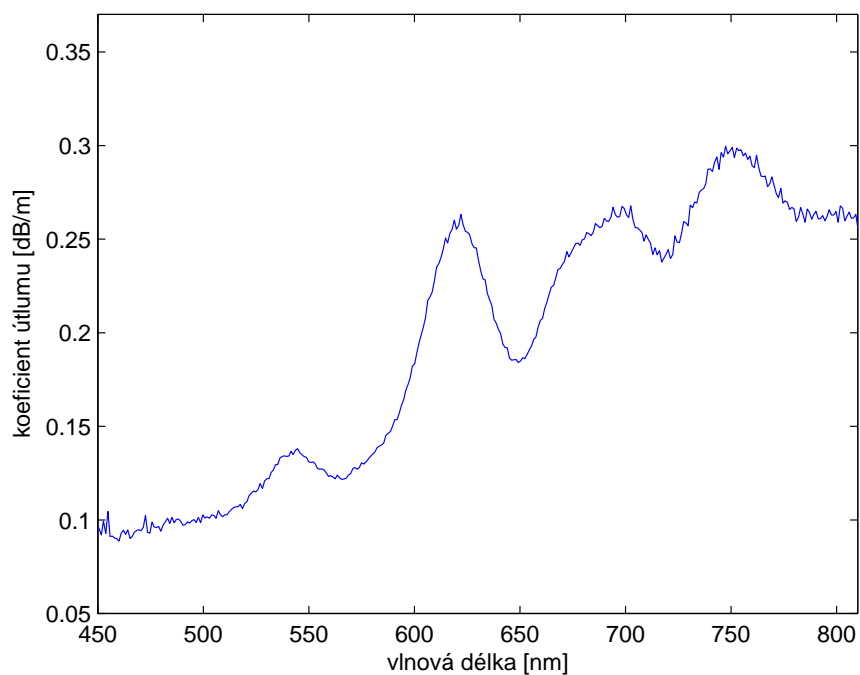


Obrázek 34: Relativní výkon na výstupu z monochromátoru pro vlnovou délku 626 nm

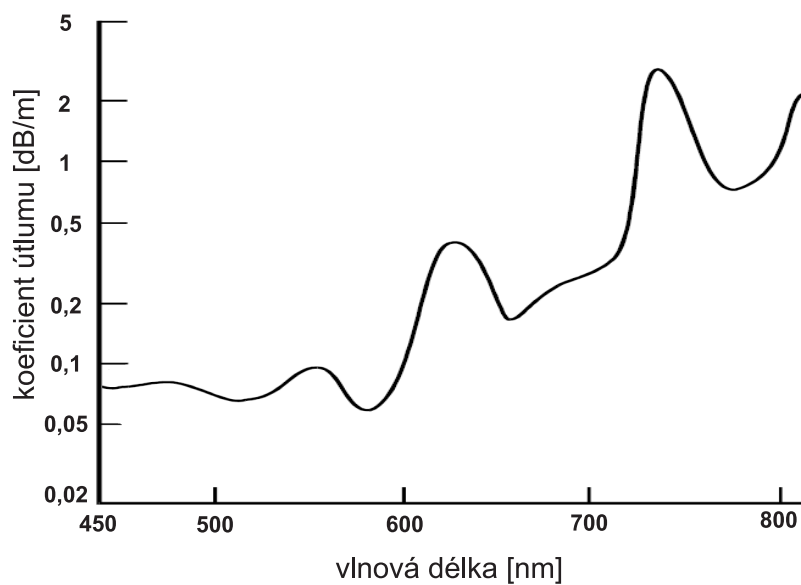
Na počátku měření byla mřížka natočena do základní polohy 430 nm a osciloskop byl nastaven do režimu Single. Nastavením napětí na otočném stolku na cca 3,2 V bylo spuštěno otáčení mřížky, což aktivovalo měření osciloskopu. Po naplnění paměti osciloskopu (4000 vzorků) bylo měření ukončeno a data byla exportována do PC.

Nejprve byl změřen optický výkon P_1 na konci krátkého 1 m POF vlákna. Měřicí rozsah senzoru byl pro toto měření nastaven na 12 μW . Poté bylo krátké vlákno vyměněno za 50 m dlouhé, měření bylo opakováno a nyní byl měřen optický výkon P_2 na konci vlákna, a to s rozsahem senzoru 1,2 μW , a proto bylo nutné naměřené hodnoty vynásobit 10. Výsledný měrný útlum je určen rovnicí 9.

Exportovaná data ve formátu .CSV byla pomocí Excelu vhodně upravena, impulzy polohy převedeny na vlnovou délku a dále proběhlo zpracování v Matlabu. Výsledný graf tohoto měření ukazuje obr. 35 a graf přímo od výrobce vláken je na obr. 36.



Obrázek 35: Naměřený průběh závislosti útlumu na vlnové délce



Obrázek 36: Průběh útlumu měřeného POF vlákna dle výrobce výukové sady Promax EF970, převzato z [9]

Porovnáním naměřené závislosti útlumu s daty výrobce vidíme poměrně přesné umístění maxim v oblasti 550, 620 a 730 nm a minim v oblasti 570 a 650 nm. Křivka dále zachycuje rostoucí trend útlumu směrem k IČ oblasti spektra.

Odchytky mohou být způsobeny jinými vzorky dlouhého a krátkého měřeného vlákna, chybami měření použitých přístrojů, nepřesnostmi sestaveného monochromátoru, nedokonalým zastíněním měřicího stanoviště či chybami měřiče optického výkonu. Během měření se dále vyskytly problémy s rušením síťovou frekvencí 50 Hz, která se také mohla podílet na nepřesnostech.

4 Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala měřením spektrální závislosti útlumu s využitím monochromátoru založeném na difrakční mřížce. V úvodní části byly popsány vlastnosti difrakční mřížky jako rozkladného elementu, byly rozebrány jednotlivá uspořádání monochromátorů založených na mřížce a ukázány metody měření útlumu optických vláken.

V praktické části byl sestaven monochromátor v Czerny–Turnerově uspořádání s difrakční mřížkou a sférickými zrcadly. Po celkovém sladění pomocí CCD kamery a wattmetru byla provedena analýza monochromátoru a potřebné nastavení pro cílové měření. Pomocí sestaveného monochromátoru bylo provedeno měření spektrální závislosti útlumu plastového optického vlákna. Měření ukázalo poměrně přesnou shodu v maximech a minimech závislosti útlumu a rostoucí útlum směrem k IČ oblasti typický pro plastová vlákna. Měření lze tedy pokládat za úspěšné.

Dalšími vylepšeními tohoto monochromátoru by mohly být lepší nastavení a ovladatelnost otočného stolku, přesnější odečet poloh pomocí programovatelného přípravku, dále automatický odečet výkonových úrovní pro různé vlnové délky a automatické zpracování, čímž by se tento přístroj stal již plnohodnotným optickým spektrálním analyzátozem. Jistých vylepšeních by se dosáhlo také výběrem kvalitnějších mimoosových parabolických zrcadel zaručujících minimalizaci optických vad a zakrytím celého přístroje pro eliminaci vlivu okolního záření. Rušení síťovou frekvencí by mohlo být eliminováno pomocí pokročilých metod zpracování signálu.

Reference

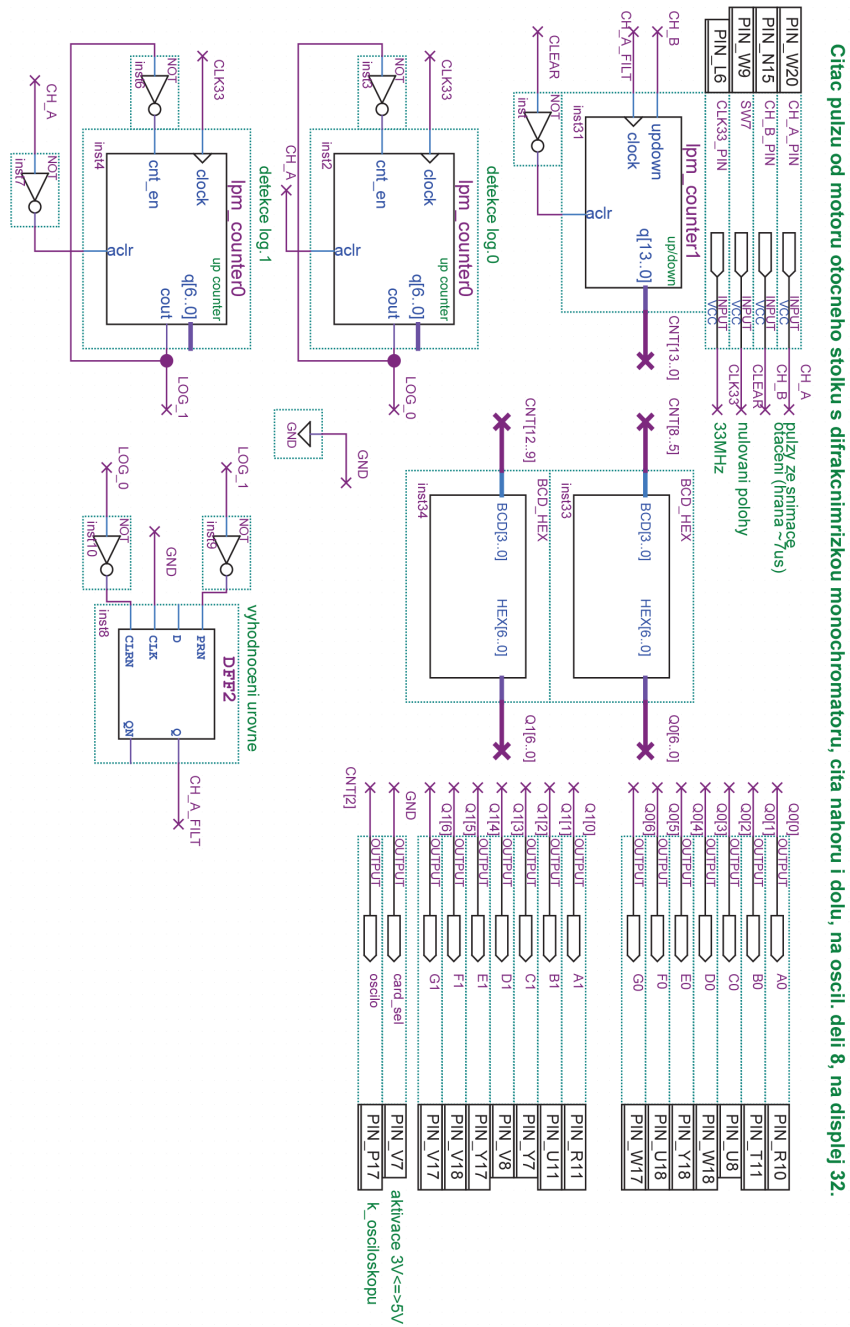
- [1] Rongqing Hui, Maurice O'Sullivan, *Fiber Optic Measurement Techniques*. Elsevier Academic Press, 2008, 1. vydání.
- [2] Fuka Josef, Havelka Bedřich, *Optika*. SPN Praha, 1961, 1. vydání.
- [3] Christopher Palmer, Erwin Loewen, *Diffraction Grating Handbook*. Newport Corporation, 2005, 6. vydání.
- [4] John F. James, *Spectrograph Design Fundamentals*. Cambridge University Press, 2007, 1. vydání.
- [5] Ivan Pelant a kol., *Fyzikální praktikum III*. Matfyzpress, 2005, 1. vydání.
- [6] Doc. Ing. Karel Novotný, CSc., *Optická komunikační technika*. Vydavatelství ČVUT, 2002, 2. vydání.
- [7] Doc. Ing. Karel Novotný, CSc., Ing. Tomáš Martan, Ing. Jan Šístek, Ph.D., *Systémy pro optické komunikace*. Vydavatelství ČVUT, 2003, 1. vydání.
- [8] George J. Zissis, *Handbook of Optics, Volume 2*. McGraw-Hill New York, 1995, 2. vydání.
- [9] In *Uživatelský manuál – PROMAX EF-970B-E*
- [10] In <http://www.opticsinfobase.org> [online], [cit. 2013-11-23].
Dostupný z WWW: <http://imagebank.osa.org/getImage.xqy?img=M3cubGFyZ2UsYW8tNDktMTUtMjgwNi1nMDEx>.
- [11] In *OSLO (Optics Software for Layout and Optimization)* [online], [cit. 2013-11-29].
Dostupný z WWW: <http://www.lambdare.com/additional-software/oslo>.
- [12] In *LEOK-3, Optics Experiment Kit, Instruction Manual* [online], [cit. 2013-12-18].
Dostupný z WWW: <http://www.lambdasys.com/downloadpdf/LEOK-3.pdf>.

- [13] In <http://www.pef.uni-lj.si/> [online], [cit. 2014-4-27]. Dostupný z WWW: <http://www.pef.uni-lj.si/eprolab/comlab/sttop/sttop-oe/CHAPTER3/Image41.gif>.
- [14] In *Thorlabs Graded – Index Polymer Optical Fiber (GI-POF)* [online], [cit. 2014-5-2]. Dostupný z WWW: <http://www.thorlabs.com/catalogpages/v20/892.pdf>.
- [15] In *Ocean Optics VIS–NIR Low OH Fibers* [online], [cit. 2014-4-27]. Dostupný z WWW: http://www.oceanoptics.com/images/FibersProbes/fiberattenuation_visnir.jpg.
- [16] In *Ocean Optics HL–2000 Halogen Light Sources* [online], [cit. 2014-4-27]. Dostupný z WWW: <http://www.oceanoptics.com/products/hl2000.asp>.
- [17] In *Thorlabs Introduction to Diffraction Grating* [online], [cit. 2014-4-27]. Dostupný z WWW: <http://www.thorlabs.com/catalogpages/805.pdf>
- [18] In *Thorlabs Holographic Diffraction Gratings* [online], [cit. 2014-4-27]. Dostupný z WWW: <http://www.thorlabs.de/catalogpages/V21/880.PDF>
- [19] In *Katalogový list – Thorlabs GR25–0605* [online], [cit. 2014-4-27]. Dostupný z WWW: <http://www.thorlabs.com/thorcat/11700/GR25-0605-SpecSheet.pdf>
- [20] In *Katalogový list – Thorlabs Concave Spherical Mirrors* [online], [cit. 2014-4-27]. Dostupný z WWW: <http://www.thorlabs.de/catalogpages/V21/785.PDF>
- [21] In *Katalogový list – Thorlabs Off-Axis Parabolic Mirrors* [online], [cit. 2014-4-27]. Dostupný z WWW: http://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=7004
- [22] In *Katalogový list – Thorlabs Breadboards* [online], [cit. 2014-4-27]. Dostupný z WWW: <http://www.thorlabs.de/catalogpages/V21/3.PDF>
- [23] In *Katalogový list – TTI CPX400DP Power Supply* [online], [cit. 2014-5-14]. Dostupný z WWW: <http://www.tti-test.com/products-tti/pdf-brochure/psu-cpx-7p.pdf>

- [24] In *Katalogový list – Thorlabs Digital Handheld Power and Energy Meter PM100D* [online], [cit. 2014-5-19]. Dostupný z WWW: <http://www.thorlabs.com/catalogpages/V21/1553.pdf>
- [25] In *Katalogový list – Thorlabs Compact Photodiode S120C* [online], [cit. 2014-5-19]. Dostupný z WWW: <http://www.thorlabs.com/thorcat/18300/S120C-SpecSheet.pdf>
- [26] In *Manuál – Thorlabs CR1/M-Z7 Motorized Rotation Stage* [online], [cit. 2014-5-14]. Dostupný z WWW: http://www.thorlabs.de/thorcat/17000/CR1_M-Z7-Manual.pdf
- [27] In *Shimadzu – Toroidal Mirrors TRseries* [online], [cit. 2014-5-1]. Dostupný z WWW: <http://www.shimadzu.com/products/opt/off/5iqj1d0000002ws5.html>
- [28] In *Katalogový list – Ophir Silicon CCD Cameras* [online], [cit. 2014-5-3]. Dostupný z WWW: http://www.ophiropt.com/user_files/laser/beamprofilers/USB-Silicon-CCD-camera.pdf

Přílohy

Příloha A – Schéma zapojení realizovaného v FPGA přípravku pro řízení natáčení mřížky



Příloha B – Kód zpracování v Matlabu

```
close all;% zavre vsechny obrazky
clear all;% smaze vsechny promenne, funkce, atd.
spojeni=ddeinit('excel','zpracovani2.xlsx'); % import z Excelu
popis_x=ddereq(spojeni,'r2c14:r4001c14');% import vlnovych delek z Excelu
kratke1_2=ddereq(spojeni,'r2c4:r4001c4');% import hodnot vykonu kratkeho vlakna z Excelu
dlouhe1_2=ddereq(spojeni,'r2c2:r4001c2'); % import hodnot vykonu dlouheho vlakna z Excelu
impulsy=ddereq(spojeni,'r2c1:r4001c1');% import impulsu z Excelu
%=====
% vypocet pro kratke vlakno
pozice=1;% pozice noveho pulzu
minule=1;% pozice minuleho pulzu

for i=1:3999 % projede cely soubor pulzu
    if and (impulsy(i)<0,impulsy(i+1)>0) % projede pulzy a najde hrany
        delit=1;
        hodnota=0;
        for k=minule:i
            hodnota=hodnota+dlouhe1_2(k);% secte vykony behem jednoho pulzu
            delit=delit+1; % pocet nascitanych hodnot
        end
        rada_dlouhe(pozice)=hodnota/delit; % spocte prumer vykonu behem celeho pulsu
        popis(pozice)=popis_x(i);%vybere kladne pulzy a pouzije pro popis grafu
        pozice=pozice+1;% jde na dalsi pulz
        if pozice==449 % max. 448 pulzu (D0 az 40= 112 pulzu na LCD=> 448 na osciloskopu)
            break
        end
        minule=i;
    end
end
% plot (rada_dlouhe)
%=====
% vypocet pro kratke vlakno
pozice=1;
minule=1;

for i=1:3999 % projede cely soubor pulzu
    if and (impulsy(i)<0,impulsy(i+1)>0)
        delit=1; hodnota=0;
        for k=minule:i
            hodnota=hodnota+kratke1_2(k); delit=delit+1;
        end
        rada_kratke(pozice)=hodnota/delit; pozice=pozice+1;
        if pozice==449
            break
        end
        minule=i;
    end
end

vysledek=-10*log10(rada_dlouhe./rada_kratke/10)/50;% vypocet koef. utlumu, 50m vlakno
plot (popis,vysledek);
xlim([450 810]); ylim([0.05 0.37]);
xlabel('vlnová délka [nm]')
ylabel('koeficient útlumu [dB/m]')
```

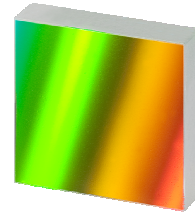

Příloha C – Katalogový list mřížky Thorlabs GR25-0605 [19]

Product Specification Sheet

Ruled Diffraction Gratings



GR25-0605



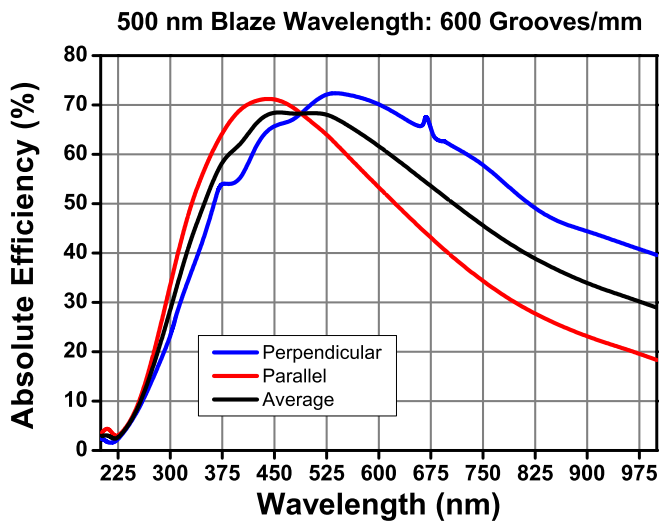
Description

Thorlabs offers a selection of ruled diffraction gratings optimized with blaze wavelengths from 300 nm to 10.6 μm . These gratings are made from a soda lime glass substrate with 75 to 1800 grooves/mm. Ruled gratings are ideal for applications centered at the grating's blaze angle and typically offer higher efficiencies than holographic gratings.

Specifications

Specification	Value
Blaze Wavelength	500 nm
Grooves/mm	600
Blaze Angle	8° 37'
Dispersion	1.65
Size	
Height	25 mm
Width	25 mm
Thickness	6 mm

Graphs



USA, Canada, and South America

Thorlabs, Inc.
435 Route 206
Newton, NJ 07860, USA
Tel: 973-579-7227
Fax: 973-300-3600

Europe

Thorlabs GmbH
83221 Dachau, Germany
Tel: +49-(0)8131-5956-0

Scandinavia

Thorlabs Sweden AB
400 20 Göteborg, Sweden
Tel: +46-31-733-30-00

UK and Ireland

Thorlabs LTD.
Cambridgeshire CB7 4EX, GB
Tel: +44 (0)1353-654440

Japan and Asia

Thorlabs Japan Inc.
Toshima-ku, Tokyo 170-0013, Japan
Tel: +81-3-5979-8889

France

Thorlabs SAS
78600 Maisons-Laffitte, France
Tel: +33 (0) 970 444 844

China

Thorlabs China
Shanghai, China
Tel: +86 (0)21-32513486



11748 – November 24, 2010, Rev A
Specifications subject to change without notice.

Příloha D – Katalogový list stolku Thorlabs CR1/M-Z7 [26]



Motorized Rotation Stage

Description of Connections

Pin	Description
Motor (+)	This supplies a +12 VDC supply to the motor of the actuator. The max current should be set to 0.080 A.
Vcc	A connection should be made to a +5 VDC supply to power both channels A and B on the encoder.
Channels A and B	The Z700 series actuators use a Hall Effect encoder. Both channels A and B are supplied by the 5 VDC Vcc connection.
GND	This is the ground connection for the encoder.
Motor(-)	This supplies a -12 VDC supply to the motor of the actuator. The maximum current should be set to 0.080 A.

Part 3. Specifications

Item #	CR1-Z7, CR1/M-Z7
Motor Type	12 VDC Servo
Travel Range	360° Continuous Rotation
Gear Reduction	256:1
Worm Gear	96 teeth
Worm	Double Thread
Feedback	Motor Mounted Rotary Encoder, 48 pts/rev @ the Motor
Backlash	<0.05 arcsec
Min Incremental Motion	2.19 arcsec
Vertical Load Capacity	25 lbs
Speed Range	6 deg/sec to 22 arcsec/sec
Wobble	<2 arcsec
Repeatability	<1 arcmin

Příloha E – Katalogový list zrcadel Thorlabs CM254-050-E02 [20]

For current pricing,
please see our website.

Concave Spherical Mirrors (Page 1 of 2)

Sizes: Ø1/2", Ø1", Ø2", Ø75 mm

Specifications

- Focal Lengths: 12 mm – 500 mm
- Substrate Material: N-BK7
- Reflective Coatings: Metallic and Dielectric Coatings
- Clear Aperture: >90% of Diameter
- Front Surface Irregularity: $<\lambda/4$ at 633 nm
- Front Surface Quality: 40-20 Scratch-Dig
- Back Surface: Fine Ground
- Diameter Tolerance: $\pm 0.0/-0.2$ mm
- Thickness Tolerance: ± 0.2 mm
- Chamfer: 0.25 mm @ 45° Typical

Thorlabs' Broadband Concave Mirrors offer high reflectance in broadband applications where the chromatic aberration introduced by a lens is not acceptable. When used close to 0° angle of incidence to collect and focus light for imaging applications, these mirrors provide >90% reflectance with the metallic coatings and >99% reflectance with the dielectric coatings.

Spherical Concave Mirrors are defined by the focal length, f , of the optic being half of its radius of curvature, R . To achieve the best performance without the introduction of off axis aberrations, concave mirrors should be used close to 0° angle of incidence.

Please refer to our website for complete models and drawings.

COATING DESIGNATION	COATING TYPE	WAVELENGTH RANGE	REFLECTANCE	DAMAGE THRESHOLD
F01	UV Enhanced Aluminum	250 – 450 nm	> 90%	0.3 J/cm ² (355 nm, 10 ns, 10 Hz, Ø0.381 mm)
G01	Protected Aluminum	450 – 20 µm	> 90% from 450 – 2 µm > 95% from 2 - 20 µm	0.3 J/cm ² (1064 nm, 10 ns, 10 Hz, Ø1.000 mm)
P01	Protected Silver	450 nm – 20 µm	> 97.5% from 450 – 2 µm > 96% from 2 - 20 µm	3 J/cm ² (1064 nm, 10 ns, 10 Hz, Ø1.000 mm)
M01	Protected Gold	800 nm – 20 µm	> 96%	2 J/cm ² (1064 nm, 10 ns, 10 Hz, Ø1.000 mm)
E01	Dielectric E01	350 – 400 nm*	> 99%	1 J/cm ² (355 nm, 10 ns, 10 Hz, Ø0.373 mm)
E02	Dielectric E02	400 – 750 nm*	> 99%	0.25 J/cm ² (532 nm, 10 ns, 10 Hz, Ø0.803 mm)
E03	Dielectric E03	750 - 1100 nm*	> 99%	1 J/cm ² (810 nm, 10 ns, 10 Hz, Ø0.133 mm), 0.5 J/cm ² (1064 nm, 10 ns, 10 Hz, Ø0.433 mm)
E04	Dielectric E04	1280 – 1600 nm*	> 99%	2.5 J/cm ² (1542 nm, 10 ns, 10 Hz, Ø0.181 mm)

*See plots below

Dielectric Coating (E01)

Dielectric Coating (E02)

Dielectric Coating (E03)

Dielectric Coating (E04)

The shaded region represents the specified region for each coating. However when used at near 0° AOI, as is recommended for a concave mirror, the wavelength range where the mirror has a high reflectance is significantly larger as can be seen in the performance plots above.

784
www.thorlabs.com
THORLABS

Příloha F – Katalogový list halogenky Ocean Optics HL-2000 [16]

Light Sources

HL-2000 Tungsten Halogen Light Source



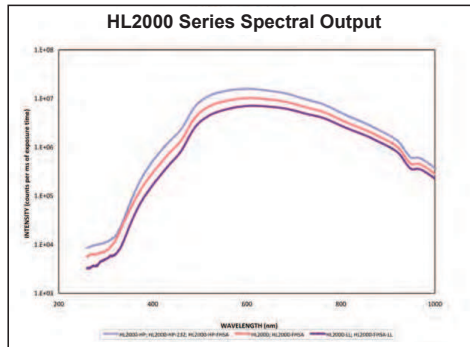
The HL-2000 Tungsten Halogen Light Sources are versatile lamps that are optimized for the VIS-NIR (360-2500 nm) range. The HL-2000 is available in several versions, including a model (HL-2000-FHSA) that has a shutter for dark measurements, a slot that accepts filters up to 25.4 mm round or 50.8 mm square and an attenuator to control the intensity of the light source from 0-100%.

Smart Features

- Available with 10,000-hour, long-life bulb
- High-power version available that doubles your output power
- Fan cooled with shutter, TTL and manual attenuator functions
- RS-232 interface option to access shutter and attenuator

High-power Version

For applications requiring strong VIS-NIR output and using large-diameter optical fibers or fiber and probe bundles, a special high-power version of the HL-2000 is available. The bulb used in the HL-2000-HP is a 20-watt bulb. In addition, you can opt to control the intensity of the HL-2000-HP via an RS-232 module.



Measured with HR2000+ Spectrometer with 25 μ m Slit and 400 μ m Optical Fiber


Item	Description
HL-2000	Tungsten halogen light source, 1,500-hour bulb
HL-2000-LL	Long-life version (10,000-hour)
HL-2000-LL-LVF	Long-life version with slot for linear-variable filters
HL-2000-FHSA	Includes filter holder, attenuator and shutter
HL-2000-FHSA-LL	Long-life version (10,000-hour); includes filter holder, attenuator and shutter
HL-2000-HP	High-powered, 20 W version
HL-2000-HP-FHSA	High-powered, 20 W version with filter holder, attenuator and shutter
HL-2000-HP-LVF	High-powered, 20 W version with slot for linear-variable filters
HL-2000-HP-232R	High-powered, 20 W version, rack-mounted, with RS-232 control
HL-2000-B	Spare 1,500-hour bulb
HL-2000-B-LL	Long-life 10,000-hour spare bulb
HL-2000-HP-B	High-power spare bulb

Specifications

HL-2000, HL-2000-LL Standard Sources	
Dimensions:	62 mm x 60 mm x 150 mm
Weight:	500 g
Bulb power consumption:	7 watts
Output to bulb:	1.4 A @ 5 VDC
Wavelength range:	360-2500 nm
Stability:	0.5%
Drift:	<0.3% per hour
Time to stabilize:	~5 minutes
Bulb lifetime:	1,500 hours
Bulb color temperature:	2,960 K
Temperature:	5 °C - 35 °C
Humidity:	5-95% at 40 °C

HL-2000-HP High-Power Sources	
Dimensions:	62 mm x 60 mm x 150 mm
Weight:	500 g
Bulb power consumption:	20 watts
Output to bulb:	1.66 A @ 12 VDC
Wavelength range:	360-2000 nm
Stability:	0.5%
Drift:	<0.3% per hour
Time to stabilize:	~5 minutes
Bulb lifetime:	2,000 hours
Bulb color temperature:	3,000 K
Temperature:	5 °C - 35 °C
Humidity:	5-95% at 40 °C

Příloha G – Katalogový list wattmetru Thorlabs PM100D [24]

Light Analysis	
▼ CHAPTERS	
Power Meters	
Detectors	
Beam Characterization	
Polarimetry	
Electronics Accessories	
▼ SECTIONS	
Power Meters	
Touch Screen Meter	
Digital Meter	
Analog Meter	
Compact Sensor Interface	
Dual-Channel Meter	
Photodiode Sensors	
Thermal Sensors	
Pyroelectric Sensors	
Field Service	
<p>Have you seen our... Handheld Fiber Optic Power Meter</p>  <p>See page 1568</p>	
1552	www.thorlabs.com

Digital Handheld Power and Energy Meter (Page 1 of 2)



PM100D



Features

- Power and Energy Measurements
- Large, 4" Backlit Digital Display
- Rechargeable Battery Lasts up to 8 Hours
- USB2.0 Connectivity
- SD Card Slot for Recording Data
- 16 Bit A/D Converter

Compatible Sensors

- S100C Series of Photodiode Sensors
- S300C Series of Thermal Sensors
- ES100C and ES200C Series of Pyroelectric Sensors
- Photodiodes: 5 mA (Max)
- Thermopiles: 1 V (Max)
- Pyroelectric Sensors (Max 100 V)

Our PM100D Console is capable of both power and energy measurements through compatibility with photodiode, thermal, and pyroelectric sensors. It also offers excellent accuracy and reliability. With a large, backlit 4" display and backlit buttons, it is a versatile meter that is ideal for everyday use.

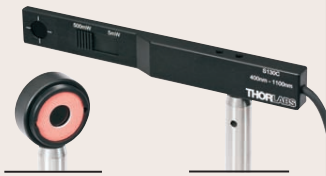
The PM100D is compatible with all of the new C-Series sensors. The entire current C-Series offering is capable of detecting powers from 100 pW to 250 W and energies from 10 μJ to 15 J, with operating wavelengths between 185 nm and 25 μm. Included in this sensor range are compact fiber sensors, which are the size of a DB9 connector and attach directly to the console, turning the PM100D into an all-in-one fiber power meter. With the PM100D, you can wire your own unamplified photodiodes (anode ground), thermopiles, and pyroelectric sensors to a DB9 connector. Many of our previous A- and B-Series sensors can be updated for a nominal fee to be compatible with our C-Series line of power and energy meters. Please contact Tech Support for a quote.

The PM100D has a number of display options including numerical, graphical, simulated analog needle, and statistics. It can be used manually or remotely via the USB2.0 computer interface. When connected to a computer, it is easy to record data using the GUI and drivers that are included on a USB thumb drive. A bottom-located SD memory card slot can be used to save data when not tethered to a computer. An SD card is included with each unit. An SMA connector on the side provides a sensor output (0 – 2 V, 100 kHz), which is the amplified input signal (not wavelength corrected). This can be used to monitor the signal or to control external processes.

The PM100D has an internal battery, offering up to 8 hours of operation per charge. Charge the PM100D via USB or by using the included power adapter.

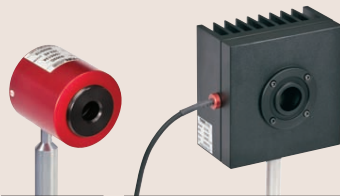
A 1/4"-20 hole is at the base of the meter for post mounting (see page 332 for threading adapters). In addition, the unit can be placed upright on the table using the kickstand on the back.

Photodiode Sensors



See Pages 1560 – 1563

Thermal Sensors



See Pages 1564 – 1565

Pyroelectric Sensors



See Pages 1566 – 1567

THORLABS

For current pricing,
please see our website.

Digital Handheld Power and Energy Meter (Page 2 of 2)

PHOTODIODE SENSOR INPUT (CURRENT)	
Measurement Ranges	6 Decades; 50 nA – 5 mA
Units	W, dBm, W/cm ² , A
Accuracy	±0.2% of Full Scale (5 µA – 5 mA) ±0.5% of Full Scale (50 nA)
Bandwidth	DC to 100 kHz, Dependent on Sensor and Settings
THERMOPILE SENSOR INPUT (VOLTAGE)	
Measurement Ranges	4 Decades; 1 mV – 1 V
Units	W, dBm, W/cm ² , V
Accuracy	±0.5% of Full Scale (10 mV – 1 V) ±1% of Full Scale (1 mV)
Bandwidth	DC to 10 Hz, Dependent on Sensor and Settings
Time Constant Correction	1 – 30 s
ANALOG OUTPUT	
Connector	SMA
Voltage Range	0 – 2 V
Bandwidth	Up to 100 kHz, Dependent on Sensor and Settings
Accuracy	±3%
SENSOR TEMPERATURE MEASUREMENT	
Supported Temperature Sensor	Thermistor
Temperature Measurement Range	-10 to 80 °C

GENERAL	
Sensor Input	Female DB9 for C-Series Connectors
Display	81.4 mm x 61 mm (3.20" x 2.40"), 320 x 240 Pixels
Display Update Rate	20 Hz
Display Screens	Numerical, Bar Graph, Trend Graph, Statistics, Simulated Analog Needle
Memory Card	SD, 1 GB
A/D Converter	16 Bit
Computer Connectivity	USB2.0, Mini USB
Battery	Li-Polymer 3.7 V 1300 mAh; up to 8 hrs Operation
Dimensions	185 mm x 109 mm x 40 mm (7.2" x 4.3" x 1.6")
Operating Temperature	0 to 40 °C
Storage Temperature	-40 to 70 °C
Mounting Options	Kickstand, 1/4"-20 Mounting Hole

PM100D with S150C
Sensor and Fiber



PM100D Includes

- PM100D Console
- Storage Case
- Power Adapter (US, UK, Europe, and Australia)
- 1 GB SD Card
- 1 GB USB Thumb Drive with Software, Drivers, and Detailed User Manual
- Calibration Certificate
- Quick-Start Manual
- USB Cable

ITEM #	\$	£	€	RMB	DESCRIPTION
PM100D	\$ 999.00	£ 719.28	€ 869.13	¥ 7,962.03	Digital Power and Energy Meter, Digital Display
CAL-PM	\$ 75.00	£ 54.00	€ 65.25	¥ 597.75	Recalibration Service

Have you seen our...



Red HeNe Lasers

- ◆ New Design
- ◆ 632.8 nm Central Wavelength
- ◆ 15 Models with CW Output Powers Range from 0.8 mW to 22.5 mW
- ◆ Linear Polarized or Unpolarized Output
- ◆ Frequency-Stabilized Model Available

Thorlabs offers an extensive selection of CE-compliant 632.8 nm (red) Helium-Neon (HeNe) Lasers with powers ranging from 0.8 mW to 22.5 mW as stock items. These HeNe lasers come with a built-in interlock for safety and are ideal for use in educational applications and also as alignment tools due to their excellent beam quality and long-term stability.

See pages 1776 – 1779

THORLABS

www.thorlabs.com

1553

Light Analysis

CHAPTERS ▾

Power Meters

Detectors

Beam Characterization

Polarimetry

Electronics Accessories

SECTIONS ▾

Power Meters

Touch Screen Meter

Digital Meter

Analog Meter

Compact Sensor Interface

Dual-Channel Meter

Photodiode Sensors

Thermal Sensors

Pyroelectric Sensors

Field Service

Příloha H – Katalogový list senzoru Thorlabs S120C [25]

THORLABS

Specifications

Detector Type	Silicon Photodiode
Wavelength Range	400 - 1100 nm
Optical Power Working Range	50 nW - 50 mW
Max Average Power Density	20 W/cm ²
Max Pulse Energy	20 μJ
Linearity	± 0.5%
Resolution ¹⁾	1nW
Measurement Uncertainty ²⁾	±3% 451 - 1000 nm ±5% 400 - 450 nm, 1001 - 1100 nm
Typical Application	Low Power Lasers
Laser Types	Diode, Diode Arrays, He-Ne, Dye, Ion Lasers (Ar+, Kr+)
Coating /Diffuser ³⁾	Reflective ND (OD1)
Cooling	Convection
Head Temperature Measurement	NTC Thermistor 4.7kΩ
Console Compatibility	PM100D, PM100A, PM100USB, PM200, PM320E
Response Time	< 1 μs
Sensor Dimensions	Ø30.5 mm x 12.7 mm
Active Detector Area	9.7 mm x 9.7 mm
Input Aperture	Ø9.5 mm
Cable Length	1.5 m
Connector	Sub-D 9p male
Weight	0.07 kg
Post ³⁾	#8-32 & M4 thread
Aperture Thread	SM1, outer thread
Fiber Adapters (optional)	FC, SC, LC, SMA, ST

¹⁾ Measured with PM100D console in bandwidth low setting.
²⁾ Beam diameter > 1mm
³⁾ This specification is valid for S120C devices from serial number 1203xxx. For older versions, please contact technical support.

Please note that the S120C power meter head is not compatible with the older Thorlabs power meter consoles (PM100, PM30, PM300, PM300E, S100).

Typical Response Graph

Wavelength [nm]	Responsivity [A/W]
400	1.5E-02
500	3.0E-02
600	4.0E-02
700	4.8E-02
800	5.5E-02
900	6.2E-02
950	6.5E-02
1000	6.0E-02
1100	2.5E-02

US, Canada, & South America: +1-973-579-7227 | Europe: +49 (0) 8131-5956-0 | UK & Ireland: +44 (0)1353-654440
 France: +33 (0) 970 444 844 | Scandinavia: +46-31-733-30-00 | Japan & Asia: +81-3-5979-8889 | China: +86 (0)21-60561122

www.thorlabs.com 03-Apr-13
18356-S01, Rev B

Příloha I – Katalogový list OSA SandHouse SIR–1700

Scanning Spectrometer



SIR-1700
Compact, Extended
Range Spectrometer

The SIR-1700 Scanning Spectrometer delivers a unique solution for optical spectroscopy. This instrument combines a silicon detector for the visible and an InGaAs detector for the NIR range of the spectrum. The SIR-1700 collects spectral data from 400 - 1700 nm and offers many innovative features that make it an outstanding value in fiber-based instrumentation.

The SIR-1700 uses a single point detector and a high angular resolution-tunable grating system. The zero-backlash mechanical design provides superior accuracy and repeatability. This combination, along with an innovative 24-bit A/D converter, provides high spectral resolution and very high signal-to-noise data.

An optional filter wheel provides optical order sorting of diffracted orders.

The SIR-1700 is designed with a rugged aluminum housing that is robust enough to withstand the rigors of chemical processing applications.

The USB 2.0-compliant interface provides fast data transfers and our included software can be used to control all of the SIR-1700's functions as well as analyze data.

Specifications

Range:	400-1700 nm	
Detector:	Hybrid silicon and InGaAs detector - 1 mm active area	
Diffraction grating:	1200 lines - 600 nm blaze wavelength	
Optical design:	Czerny-Turner F/3	
Slits available:	10 μm , 50 μm , 100 μm , 200 μm , 500 μm	
Optical input:	SMA-905/906 with optional lensed input	
Analog resolution:	24 bits 16,777,216 counts	
Triggering options:	Internal and external synchronization, pulse width control and phase delay	
Additional digital outputs:	2 channel selectable 3.3V/5V output	
Additional digital inputs:	2 channels 3.3V/5V compatible inputs	
Grating steps in range:	70,200	
Step accuracy:	+/- 10 steps	
Data interface:	USB 2.0	
Scan time:	As quick as 20 seconds	
Resolution based on optical slits:	10 μm	.04 nm
	50 μm	.2 nm
	100 μm	.4 nm
	200 μm	.8 nm
	500 μm	6 nm

www.oceanoptics.com | info@oceanoptics.com
+1 727-733-2447



