

Univerzita Palackého v Olomouci
Přírodovědecká fakulta
Společná laboratoř optiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Charakterizace vláknových děličů svazku



Autor:	Marek Kouřil
Studijní program:	B1701 Fyzika
Studijní obor:	1701R030-00 / Přístrojová fyzika
Forma studia:	Prezenční
Vedoucí práce:	Mgr. Michal Mičuda, Ph.D.
Konzultant:	Mgr. Miroslav Ježek, Ph.D.
Termín odevzdání práce:	10. 5. 2013

Bibliografická identifikace:

Jméno a příjmení autora	Marek Kouřil
Název práce	Charakterizace vláknových děličů svazku
Typ práce	Bakalářská
Pracoviště	Společná laboratoř optiky
Vedoucí práce	Mgr. Michal Mičuda, Ph.D.
Konzultant	Mgr. Miroslav Ježek, Ph.D.
Rok obhajoby práce	2013

Klíčová slova	vláknové děliče svazku, optické vlákno
Počet stran	33
Počet příloh	3
Jazyk	Český

Abstrakt

Cílem bakalářské práce bylo charakterizovat vláknové děliče svazku. Práce je rozdělena do dvou částí, na část teoretickou a experimentální. První kapitola teoretické části se věnuje stručnému popisu optického vlákna a vláknového děliče. V další kapitole je popsána technologie tavení plamenem, kterou byly vyrobeny měřené vláknové děliče z Optokonu. Závěr teoretické části je věnován výpočtu dělicího poměru vláknového děliče 2×2 . Stěžejní část práce se zabývá experimentem. V této části byly měřeny jednovidové vláknové děliče svazku, vyrobené firmou Optokon a Sifam. Výsledkem této bakalářské práce jsou kalibrační listy měřených vláknových děličů, které obsahují hodnoty dělicích poměrů pro vlnovou délku 810,1 nm a funkční vztahy, podle kterých je možné dopočítat dělicí poměr pro libovolnou vlnovou délku v rozmezí vlnových délek 780 nm až 850 nm. Kalibrační listy by měly sloužit pro potřeby pracovníků laboratoře kvantové optiky a ulehčit jim tak výběr vhodného vláknového děliče.

Bibliographical identification:

Autor's first name and surname	Marek Kouřil
Title	Fiber beam splitter characterization
Type of thesis	Bachelor
Department	Joint laboratory of optics
Supervisor	Mgr. Michal Mičuda, Ph.D.
Co - supervisor	Mgr. Miroslav Ježek, Ph.D.
The year of presentation	2013

Keywords	fiber beam splitters, optical fiber
Number of pages	33
Number of appendices	3
Language	Czech

Abstract

The aim of the Bachelor thesis was to characterize fibre beam splitters. The thesis is divided into two parts – theoretical and experimental. The first chapter of the theoretical part includes a brief description of an optical fibre and fibre splitter. The next chapter describes the flame-brush technique, which was used to make measured fibre splitters by Optokon company. The conclusion of the theoretical part deals with the calculation of the splitting ratio of the fibre splitter 2×2. The main part of the thesis deals with an experiment. In this part, single-mode fiber beam splitters made by Optokon and Sifam companies were measured. The result of this Bachelor thesis are calibration sheets of measured fibre splitters, that contain the figures of the splitting ratios for 810.1 nm wavelength and the functional relations, which can be used to calculate the splitting ratio for any wavelength within 780 nm – 850 nm. The calibration sheets should serve the needs of quantum optics lab workers and facilitate the choice of suitable fibre splitter.

Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Mgr. Michala Mičudy, Ph.D. a že jsem použil zdrojů, které cituji a uvádím v seznamu použitých pramenů.

V Olomouci

.....

Děkuji svému vedoucímu Mgr. Michalu Mičudovi, Ph.D. za příkladné vedení mé bakalářské práce, trpělivost a čas strávený konzultacemi. Dále bych chtěl poděkovat Mgr. Miroslavovi Ježkovi, Ph.D. za cenné rady a v neposlední řadě také děkuji své rodině, která mi umožnila studovat.

OBSAH

Úvod	7
1 Teoretická část	8
1.1 Optické vlákno	8
1.2 Vláknové děliče svazku	9
1.3 Využití vláknových děličů	10
1.4 Výroba vláknových děličů svazku	11
1.5 Charakteristické parametry vláknového děliče	13
1.6 Výpočet dělicího poměru děliče 2×2	13
2 Experimentální část	16
2.1 Kalibrace spektrálního analyzátoru	16
2.2 Měření spektra laserové diody	17
2.3 Měření dělicího poměru vláknových děličů s využitím laserové diody	18
2.4 Měření spektra žárovky	20
2.5 Měření dělicího poměru vláknových děličů s využitím širokospektrálního zdroje záření	22
Závěr	27
Conclusion	28
Seznam použité literatury	30
Seznam tabulek a obrázků	32
Seznam příloh	33

ÚVOD

Téma bakalářské práce, charakterizace vláknových děličů svazku, jsem si vybral na základě předchozího studia v oboru telekomunikací. V dnešní době jsou kladeny stále vyšší nároky na rychlost přenášených dat a zastaralé metalické vedení se stává nedostatečným. To má za následek, že v posledních letech rapidně vzrostl vliv vláknové optiky a to zejména v telekomunikacích. A právě jednou z klíčových komponent vláknové optiky je vláknový dělič svazku. Ten nachází uplatnění nejen v telekomunikacích, ale i v dalších oblastech, například v metrologii.

Experimentální bakalářská práce si klade za cíl charakterizovat vláknové děliče svazku. V první části jsou představeny klíčové parametry těchto zařízení a předvedeny metody jejich výpočtů. Dále je zmíněn proces výroby a parametry ovlivňující výsledný vláknový dělič svazku. Druhá část práce je věnována měření a následnému výpočtu dělicích poměrů, jakožto klíčového parametru. Charakterizovány jsou jednovidové vláknové děliče od firem Optokon a Sifam. K těmto vláknovým děličům jsou vytvořeny katalogové listy, jež obsahují dělicí poměry těchto vláknových děličů v rozmezí vlnových délek od 780 nm do 850 nm.

1 Teoretická část

1.1 Optické vlákno

Optické vlákno je válcová dielektrická struktura tvořená jádrem a pláštěm. Index lomu prostředí jádra n_1 je nepatrně vyšší než index lomu prostředí pláště n_2 . Jako materiál optického vlákna se často volí křemenné sklo (SiO_2). Rozdíly indexu lomu jádra a pláště jsou dosaženy přidáním malého množství atomů příměsi, např. germania, bóru či titanu [1]. Optický svazek je optickým vláknem veden, splňuje-li na rozhraní jádro – plášť podmínku totálního odrazu.

Ztráty optického výkonu přenášeného optickým vláknem popisuje veličina útlum optického vlákna. Tato veličina se vyjadřuje v jednotkách dB a počítá se ze vztahu:

$$a = 10 \log \frac{P_{\text{výstupní}}}{P_{\text{vstupní}}}.$$

Útlum -3dB představuje ztrátu 1/2 optického výkonu, útlum -10dB představuje ztrátu 9/10 optického výkonu. Útlum vlákna vztažený na jednotku délky se nazývá měrný útlum α [2]. Obvykle bývá udáván v jednotkách dB/km. Počítá se ze vztahu:

$$\alpha = \frac{a}{l},$$

kde a představuje útlum optického vlákna a l délku optického vlákna. Měrný útlum vlákna je závislý na vlnové délce. Vzniká především důsledkem absorpce a rozptylu v materiálu optického vlákna. Křemenné sklo, jež se používá pro výrobu optických vláken, vykazuje nízký měrný útlum především v blízké infračervené oblasti. Jeho absolutní minimum se nachází na vlnové délce 1550 nm, kde $\alpha \approx 0,16$ dB/km [1].

Optická vlákna se dělí na jednovidová a mnohovidová, podle toho kolik umožňují vést vidů.

Hranici mezi jednovidovým a mnohavidovým režimem optického vlákna vymezuje nerovnice:

$$2\pi \cdot \frac{a}{\lambda_0} \cdot NA < 2,405. \quad (1)$$

Kde a reprezentuje poloměr jádra, NA numerickou aperturu, λ_0 vlnovou délku a hodnota 2,405 představuje hodnotu normalizované frekvence, vymezující jednovidový režim vlákna. Ze vztahu (1) je patrné, že stejné vlákno se může chovat pro větší vlnovou délku jako jednovidové vlákno a pro menší vlnovou délku jako vlákno mnohovidové. V praxi se jednovidová a mnohovidová vlákna liší především v poloměru jádra.

Jednovidové vlákna mají zpravidla malý poloměr jádra (do 9 μ m) a malou hodnotu numerické apertury. Vedou pouze jeden základní vid, který se označuje jako vid LP₀₁. Příčné rozložení pole toho vidu je podobné gaussovskému profilu [1]. Z důvodu malých rozměrů jádra je určitá část energie vidu LP₀₁ vedena pláštěm optického vlákna. Proto jsou jednovidové vlákna náchylnější na ohyb než vlákna mnohavidová (poloměr jádra větší než 50 μ m).

1.2 Vlákňové děliče svazku

Vlákňové děliče svazku jsou pasivní vlákňové komponenty, které fungují na principu vlnovodné vazby [3]. K vlnovodné vazbě dojde u dvou rovnoběžných vláken vzdálených od sebe v takové vzdálenosti, ve které elektromagnetické pole optického záření vedeného jedním vláknem částečně zasahuje i do vlákna druhého. Energie vedená jedním vláknem se na základě vzájemné vazby začne postupně přelévat do vlákna druhého. K úplnému přelití energie do druhého vlákna dojde na vzdálenosti L_0 , tato vzdálenost bývá označována jako vazební délka. Při vzdálenosti několikanásobně větší než je vazební délka, dochází k periodickému přelévání energie mezi vlákny. Na vzdálenosti rovné polovině vazební délky, dochází k rovnoměrnému rozdělení energie mezi oběma optickými vlákny. Vazební délka je silně závislá na vlnové délce elektromagnetického záření [3], dále na vzdálenosti jader od

sebe a na parametrech použitých optických vláken. Konkrétně se jedná o indexy lomů jader, plášťů, či poloměry jader. U standardně vyráběných vláknových děličů svazku není vazební délka závislá na polarizaci elektromagnetického záření [3].

Vláknové děliče bývají značeny dle počtu vstupních a výstupních ramen, např. 2×2 , 1×32 , atp. Vláknové děliče lze rozdělit podle toho, zda mají pevný či proměnný dělicí poměr. Příkladem děličů s proměnným dělicím poměrem jsou stranově broušené vláknové děliče [4]. U těchto děličů lze měnit dělicí poměr mechanickým mikroposunem jednoho z vláken. Další princip ladění spočívá v použití elektrooptických materiálů [1], kdy vlivem přiloženého elektrického napětí dochází ke změně indexu lomu.

1.3 Využití vláknových děličů

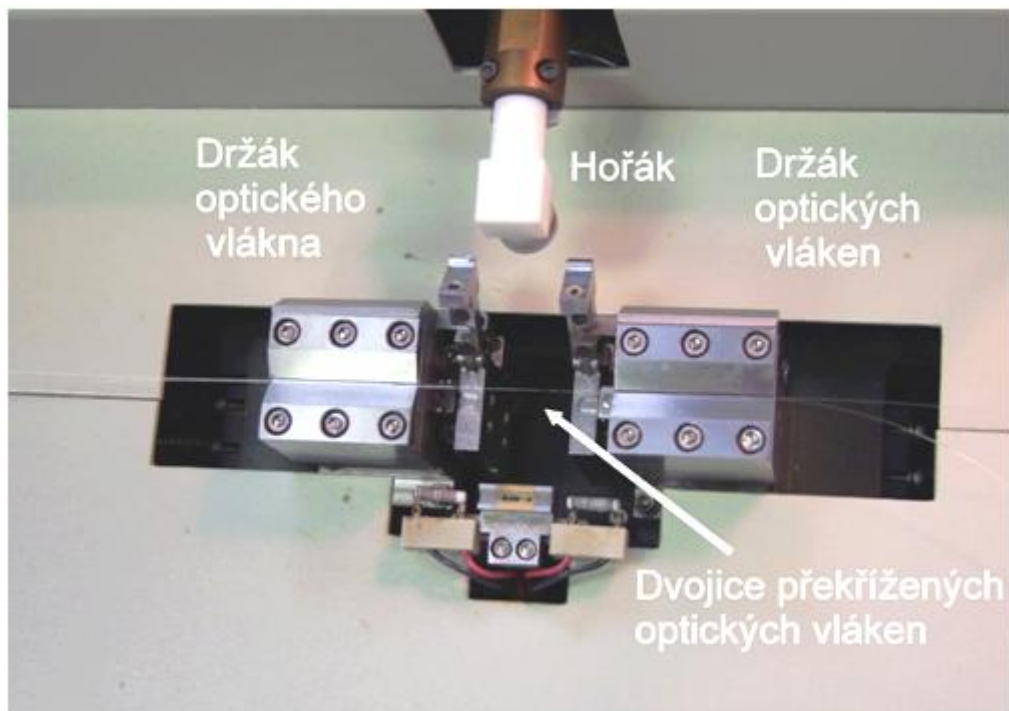
Vláknové děliče svazku nacházejí uplatnění v mnoha aplikacích vláknové optiky. Hrají například jednu z klíčových rolí v moderních telekomunikačních systémech a v mnoha dalších oblastech.

Typickým příkladem využití vláknových děličů svazku je jejich použití v systémech kabelové televize. Výkonný vstupní signál je veden jedním optickým vláknem do vláknového děliče, kde je rozdělen mezi několik účastníků. Další uplatnění vláknových děličů v telekomunikacích lze najít ve vlnovém multiplexu tzv. WDM (wavelength division multiplexing) [5]. Vlnový multiplex je jeden z nástrojů jak navýšit přenosovou kapacitu optické trasy. Princip spočívá ve sdružení signálů ze zdrojů s různými vlnovými délkami na straně vysílače a jejich následným oddělením na straně přijímače. Vláknový dělič svazku je taktéž součástí vláknových zesilovačů či vláknových laserů [6].

Vláknové děliče svazku nacházejí uplatnění také ve vláknových interferometrech, kde zastávají funkci polopropustných zrcadel. Vláknové interferometry nacházejí uplatnění například v optické koherentní tomografii [7].

1.4 Výroba vláknových děličů svazku

Pro výrobu vláknových děličů s pevným dělicím poměrem se používá technologie založená na napínání optických vláken při jejich současném ohřevu. K lokálnímu ohřevu bývá často použit regulovaný plynový hořák či CO₂ laser [8]. Já se ve své práci budu zabývat pouze technologií využívající plynový hořák, protože touto technologií byly vyrobeny měřené děliče z Optokonu. Zařízení pro výrobu vláknových děličů technologií využívající plynový hořák je zobrazené na obrázku 1.



Obrázek 1: Fotografie zařízení určené pro výrobu vláknových děličů. Fotografie byla pořízena se souhlasem firmy Optokon.

K výrobě děliče 2×2 jsou použita dvě jednořadová optická vlákna s délkou přibližně 2 m. Vlákna jsou uprostřed zbavena primární ochrany po délce přibližně 25 mm. K tomu jsou použity stripovací kleště nebo kyselina. Oblast zbavená primární ochrany je očištěna od prachu a dalších nečistot. Dokonalé očištění je důležité, protože jakékoli mikroskopické nečistoty by mohly způsobit rozptylové ztráty a tím zvýšit ztráty zařízení. Ze stejného důvodu se výroba obvykle provádí v bezprašném prostředí.

Vlákna jsou na koncích opatřena rychlo – konektory. V dalším kroku je pár vláken vhodně překříženo tak, aby došlo k těsnému kontaktu v oblastech zbavených primární ochrany, a vlákna jsou upnuta do držáků. Jakmile jsou vlákna správně umístěna, je jedno ze vstupních ramen připojeno do optického zdroje. Optický zdroj se volí podle vlnové délky, na níž bude vláknový dělič používán. Výstupní ramena jsou přivedena na dvojici identických fotodetektorů. Analogová data z fotodetektorů jsou A/D převodníkem převedena na digitální a dopravena do řídicího PC. Kde se hodnoty optického výkonu z výstupních ramen zobrazují v reálném čase na displeji monitoru. Je nastaven vhodný vstupní signál. Ten je systémem zaznamenán jako vstupní výkon P_i . Naměřená hodnota P_i se používá při výpočtu nadměrných ztrát vláknového děliče [5]. Nadměrné ztráty definují ztrátu energie způsobenou vnitřní konstrukcí děliče.

Po nastavení vhodného vstupního signálu je započata výroba. Jsou aktivovány krokové motory a plynový hořák je umístěn do prostoru nad překříženými vlákny. Jako plyn hořáku bývá použit čistý vodík či směs plynů např. propan-butan-kyslík. Plynový hořák se pohybuje zleva doprava mezi vláknovými držáky, které se pohybují navzájem opačnými směry a natahují vlákna. Pohyb hořáku definuje tzv. horkou zónu, kde dochází k zužování vláken [9]. Jádra vláken se zde dostávají dostatečně blízko sebe a vzniká mezi nimi vazba, při které se energie z jednoho vlákna začne přelévat do vlákna druhého. Hodnoty optického výkonu na výstupech jsou zaznamenávány jako P_i , P_c [5]. Z těchto hodnot je v průběhu výroby počítán dělicí poměr, jenž je v závislosti na prodloužení vykreslován na monitoru počítače. Proces tažení a tavení je ukončen v okamžiku těsně před dosažením požadovaného dělicího poměru, tak aby samovolnými procesy došlo k jeho dosažení [10].

V poslední fázi výroby je třeba zvýšit mechanickou ochranu děliče. Proto je přes ztenčenou oblast vláken, která dosahuje šířky $\approx 40\mu\text{m}$ [5], s využitím vhodného lepidla zapečena křemenná trubička. Křemenná trubička musí být vzduchotěsná, aby se zamezilo průchodu vlhkosti či částicám prachu. Tato trubička je ještě dále vložena do kovové trubičky a celý vláknový dělič je opatřen sekundární ochranou tvořenou ochranným pláštěm z PVC.

1.5 Charakteristické parametry vláknového děliče

Během a po ukončení procesu výroby jsou z naměřených hodnot P_t , P_c , P_i , dopočítávány dva velmi důležité parametry vláknového děliče. Jmenovitě se jedná o dělicí poměr (splitting ratio) a nadměrné ztráty (excess loss).

Dělicí poměr

Dělicí poměr udává míru distribuce energie na výstupech vláknového děliče pro danou vlnovou délku. V procesu výroby je dělicí poměr počítán ze vztahu [5]:

$$\left(\frac{P_c}{P_t + P_c} \cdot 100\% \right) : \left(\frac{P_t}{P_t + P_c} \cdot 100\% \right), \quad (2)$$

kde P_c je výkon na jednom výstupu a P_t výkon na druhém výstupu.

Nadměrné ztráty

Nadměrné ztráty (NZ) vláknového děliče definují část vstupní energie, která již není dostupná ve výstupech děliče. Ke ztrátě energie dochází zejména rozptylem na nehomogenitách vzniklých při výrobě. Obvykle se vyjadřují v jednotkách dB a jsou určeny vztahem [5]:

$$NZ = -10 \log \left(\frac{P_c + P_t}{P_i} \right), \quad (3)$$

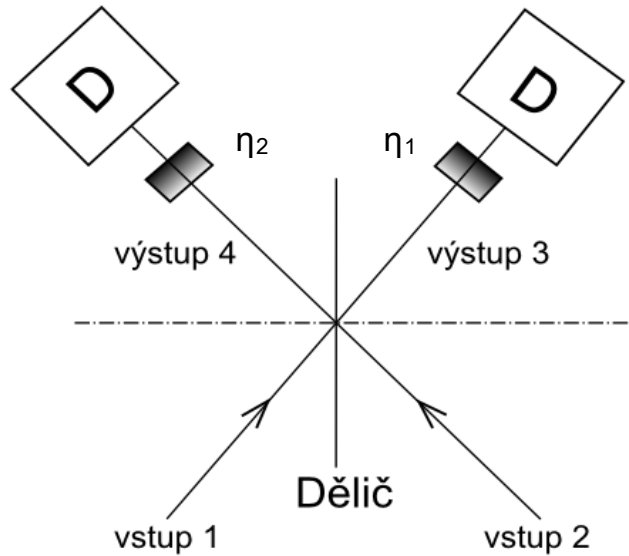
kde P_i je vstupní výkon a P_c a P_t jsou výstupní výkony. Nadměrné ztráty děliče by neměli přesáhnout hodnotu 0,1 dB [5].

1.6 Výpočet dělicího poměru děliče 2×2

Při odvozování vztahu pro výpočet dělicího poměru vláknového děliče 2×2 se vycházelo ze zobecněného modelu vláknového děliče, viz obrázek 2. Když dopadne optický svazek s jednotkovou intenzitou na rozhraní dvou prostředí, dojde k odrazu R , absorpci A a průchodu T optického svazku. Pro optický svazek s jednotkovou intenzitou tedy platí:

$$T + R + A = 1.$$

Pro jednoduchost v našem modelu uvažujeme, že ztráty způsobené prostředím jsou nulové ($A=0$). Zbylé veličiny T a R reprezentují dělicí poměr děliče svazku.



Obrázek 2: Schéma děliče 2×2 .

Optický svazek s intenzitou I_{vstup1} dopadající na dělič svazku je částečně odražen do výstupu 4, kde je následně detekován detektorem jako I_{14} . Naměřená intenzita I_{14} je snížena o ztráty η_2 způsobené např. nedokonalým detektorem, útlumem optického vlákna, útlumem konektoru či nedokonalým spojením optických vláken v konektoru. Část optického svazku, jež prochází na výstup 3, je detekována jako intenzita I_{13} . Naměřená intenzita I_{13} je opět snížena o ztráty η_1 . Identická situace nastává při přivedení optického svazku na vstup 2. Energetickou bilanci lze popsat soustavou rovnic:

$$\begin{aligned}
 I_{13} &= \eta_1 \cdot T \cdot I_{vstup1} \\
 I_{14} &= \eta_2 \cdot R \cdot I_{vstup1} \\
 I_{23} &= \eta_1 \cdot R \cdot I_{vstup2} \\
 I_{24} &= \eta_2 \cdot T \cdot I_{vstup2}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Po jednoduchých úpravách soustavy rovnic (4) lze dojít ke kvadratické rovnici:

$$\frac{I_{13} \cdot I_{24}}{I_{14} \cdot I_{23}} = \frac{(1-R)^2}{R^2}.$$

Jejímiž řešením je vztah:

$$R = \frac{1 \pm \sqrt{\frac{I_{13} \cdot I_{24}}{I_{23} \cdot I_{14}}}}{1 - \frac{I_{13} \cdot I_{24}}{I_{23} \cdot I_{14}}}.$$

Smysluplné řešení má ovšem pouze výraz:

$$R = \frac{1 - \sqrt{\frac{I_{13} \cdot I_{24}}{I_{23} \cdot I_{14}}}}{1 - \frac{I_{13} \cdot I_{24}}{I_{23} \cdot I_{14}}}, \quad (5)$$

protože výraz se znaménkem plus v čitateli může mít odrazivost větší než jedna.

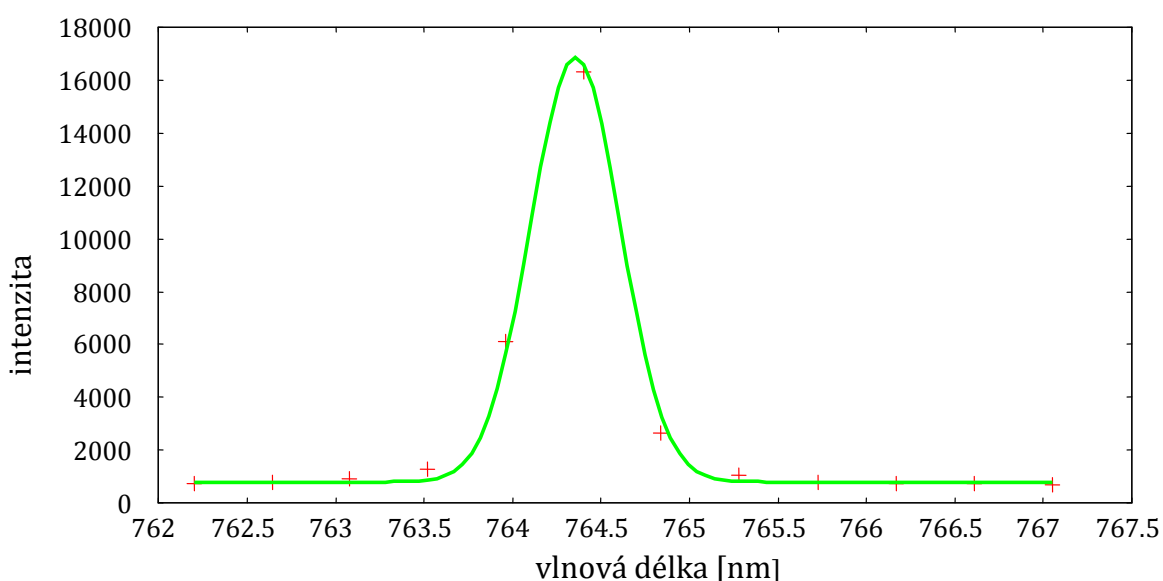
Metoda výpočtu dělicího poměru uvedená v této kapitole je přesnější než metoda uplatňovaná při výrobě (viz kapitola 1.5). Při výpočtu ve výrobě se předpokládá, že optické výkony na výstupu děliče jsou měřeny dvojicí identických fotodetektorů (stejná účinnost) a ztráty v obou větvích jsou stejné (útlum vlákna, konektoru, atd.). Kdežto výše popsaná metoda tyto předpoklady nevyžaduje. Přesnost měření touto metodou je závislá pouze na stabilitě vstupních výkonů I_{vstup1} a I_{vstup2} .

2 Experimentální část

2.1 Kalibrace spektrálního analyzátoru

Pro kalibraci spektrálního analyzátoru (HR2000+, Ocean Optics) byla použita kalibrační lampa (CAL-2000, Ocean Optics) obsahující rtuťovo-argonovou výbojku. Tato výbojka má přesně definované spektrální čáry v intervalu vlnových délek od 253 nm do 922 nm, viz příloha 1.

Záření z kalibrační lampy bylo do spektrálního analyzátoru vedeno gradientním mnohovidovým vláknem (GIF625, Thorlabs). Analyzátor byl přes USB rozhraní připojen do počítače s nainstalovaným softwarem Ocean Optics SpetraSuite. Software umožňoval v režimu High-Speed Acquisition nastavit integrační čas měření v μs (integration time), počet ukládaných měření (number of scan), průměr naměřených hodnot z několika měření (scan to average). Integrační doba měření byla nastavena tak, aby byl využit maximální rozsah analyzátoru. Z naměřených dat byla vybrána spektrální čára, odpovídající spektrální čáře výbojky na vlnové délce 763,51 nm, viz obrázek 3. Tato čára byla vybrána, protože se jedná o nejintenzivnější spektrální čáru v okolí vlnové délky 810 nm. Na obrázku 3 se spektrální čára jeví poměrně široká, to je způsobeno horší rozlišovací schopností spektrálního analyzátoru, která je $\approx 0,5$ nm.



Obrázek 3: Změřená spektrální čára 763,51 nm Hg-Ar výbojky.

Naměřené hodnoty na obrázku 3 byly proloženy křivkou Gaussovy funkce:

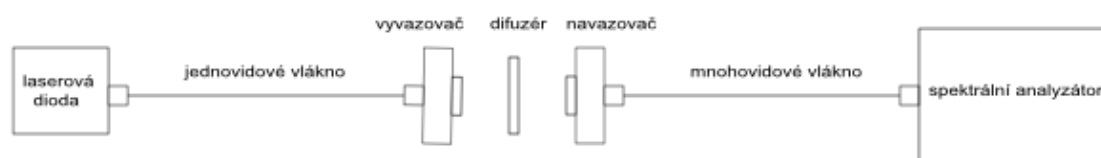
$$f(x) = A + B \cdot e^{-\frac{(x-C)^2}{D^2}}. \quad (6)$$

Parametry funkce (6) A, B, C, D byly spočítány z naměřených dat metodou nejmenších čtverců. Výpočet byl proveden programem GNU PLOT. Vypočítaný parametr C reprezentuje centrální vlnovou délku. Ta byla stanovena na (764,4±0,1)nm. Ze znalosti skutečné a změřené centrální vlnové délky zkoumané spektrální čáry byl určen kalibrační vztah pro spektrální analyzátor:

$$\lambda_{reálná} = \lambda_{změřená} - 0,9 \text{ nm}. \quad (7)$$

2.2 Měření spektra laserové diody

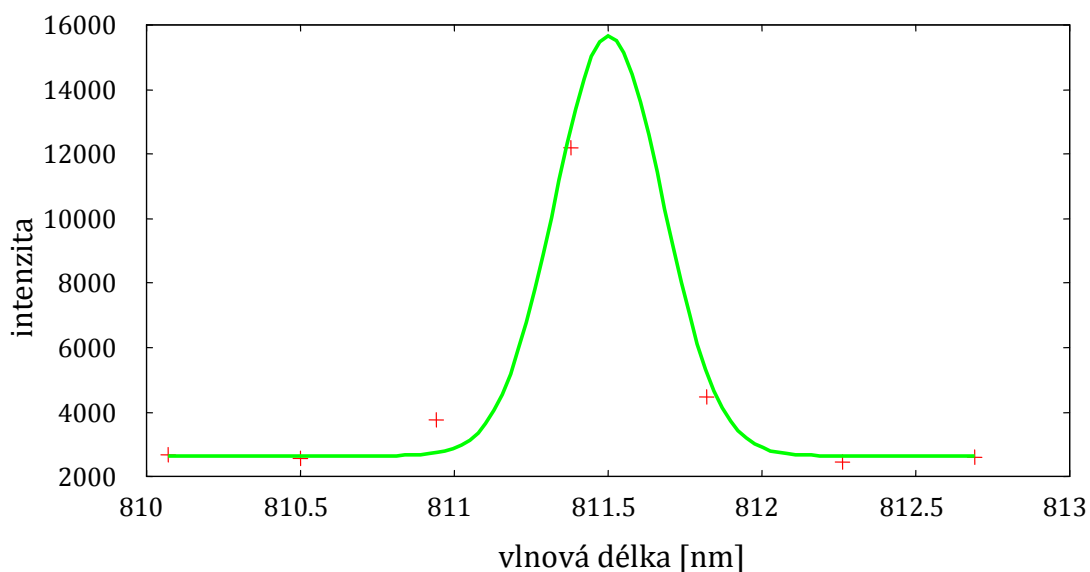
Pro měření spektra laserové diody (QFLD-810-10S, QPHOTONICS) bylo sestaveno měřící zapojení uvedené na obrázku 4. Laserová dioda byla doplněna o teplotní (TED200C, Thorlabs) a proudovou stabilizaci (LD205C, Thorlabs). Vlákňové komponenty byly osazeny FC-PC konektory. Optický svazek z laserové diody byl veden jednovidovým optickým vláknem (HP 780, Nuferr) do vyvazovače (F220FC-B, Thorlabs), který obsahoval asférickou čočku s ohniskovou vzdáleností 11 mm. Vyvázaný optický svazek procházel přes difuzér (DG20-1500-H2-MD, Thorlabs). Difuzér byl použit pro zamezení interference mezi vidy mnohovidového vlákna. Svazek byl následně navázán do mnohovidového vlákna (GIF625, Thorlabs) a přiveden do spektrálního analyzátoru. Integrační čas byl opět nastaven tak, aby byl maximálně využit rozsah spektrometru.



Obrázek 4: Blokové schéma zapojení pro měření spektra laserové diody.

Před vyhodnocováním dat byla provedena korekce podle vztahu (7). Centrální vlnová délka byla určena stejně jako v předchozí kapitole 2.1.

Centrální vlnová délka laserové diody byla stanovena na $(811,5 \pm 0,1)$ nm. Spektrum měřené laserové diody je zobrazeno na obrázku 5.

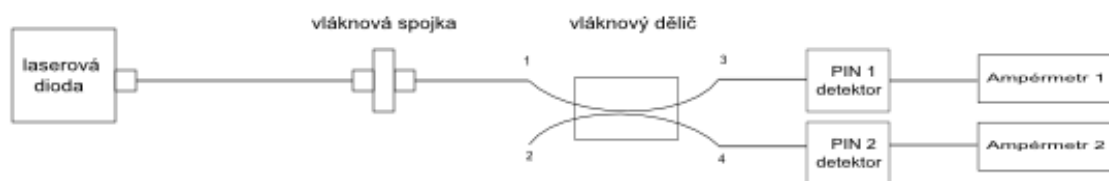


Obrázek 5: Spektrum laserové diody QFLD-810-10S.

Relativní směrodatná odchylka výkonu laserové diody (QFLD-810-10S s kontrolery LDC205C + TED200C) je menší než $5 \cdot 10^{-4}$ (0,5 ‰) pro měření kratší než 60 minut [11].

2.3 Měření dělicího poměru vláknových děličů s využitím laserové diody

Cílem experimentu bylo zjistit dělicí poměr vláknových děličů svazku vyrobených firmou Optokon. K řešení bylo navrženo měřící zapojení uvedené na obrázku 6.



Obrázek 6: Blokové schéma zapojení pro měření dělicího poměru s využitím laserové diody.

Jako zdroj záření byla použita laserová dioda (QFLD-810-10S, QPHOTONICS) doplněná o příslušnou teplotní a proudovou stabilizaci. K šíření svazku z laserové diody do vláknové spojky bylo použito jednovidové optické

vlákno (780HP, Nufern). Všechny vláknové komponenty byly osazeny FC-PC konektory. Proměřovány byly vláknové děliče 2x2 (SN: 31100091000[2-6], Optokon). Jednotlivé vývody děličů byly očíslovány čísly od 1 do 4. Do vláknové spojky bylo nejprve vloženo vstupní rameno děliče 1 a výstupní ramena 3 a 4 byla přivedena k PIN diodám (DET36A, Thorlabs). PIN diody byly opatřeny BNC konektory a pomocí koaxiálních kabelů spojeny s digitálními multimetry (1906, Aim TTi). Multimetry byly nastaveny na měření stejnosměrného proudu na rozsahu od 0 mA do 2 mA. Hodnoty proudů zobrazené na pěti a půl místných displejích ampérmetrů byly zaznamenány jako I_{13} a I_{14} . Po provedení záznamu hodnot bylo rameno 1 odpojeno a na jeho místo připojeno rameno 2. Hodnoty proudů byly zaznamenány jako I_{23} a I_{24} . Při každé manipulaci s vláknem byl konec vlákna zkontrolován a případně očištěn od nečistot pomocí čistícího pásku (Optipop R) nebo isopropanolem naneseným na optickém papírku. Měření jednoho vláknového děliče trvalo přibližně 20 minut.

Výsledky měření

Výsledky měření a naměřené hodnoty jsou shrnuty v tabulce 1. Pro lepší přehled jsou jednotlivé děliče v tabulce 1 značeny pouze názvem výrobce a posledním číslem sériového čísla.

Tabulka 1: *Naměřené hodnoty proudů a vypočítané hodnoty dělicích poměrů vláknových děličů pro $\lambda=(811,5\pm 0,1)\text{nm}$.*

Vláknový dělič	$I_{13}[\mu\text{A}]$	$I_{14}[\mu\text{A}]$	$I_{23}[\mu\text{A}]$	$I_{24}[\mu\text{A}]$	R
Optokon 2	155,44±1,36	156,49±1,37	147,52±1,30	159,03±1,39	0,491±0,002
Optokon 3	144,81±1,28	157,9±1,38	123,02±1,10	125,61±1,12	0,506±0,002
Optokon 4	124,86±1,12	135,13±1,20	148,84±1,31	136,25±1,21	0,521±0,002
Optokon 5A	142,63±1,26	144,53±1,28	172,42±1,50	166,05±1,45	0,506±0,002
Optokon 5B	148,11±1,30	153,21±1,35	110,05±1,00	109,76±1,00	0,505±0,002
Optokon 6A	166,2±1,4	167,8±1,5	167,3±1,5	163,4±1,4	0,504±0,002
Optokon 6B	113,4±1,0	115,6±1,0	151,2±1,3	146,5±1,3	0,506±0,002

Děliče Optokon 5 a 6 byly měřeny oboustranně, to je tabulce 1 symbolizováno písmeny A a B. Veličina R udávající dělicí poměr vláknového děliče byla spočítána ze vzorce (5).

Nejistota multimetrů při měření stejnosměrného proudu v rozsahu 2mA uvedená v manuálu přístroje [12] je:

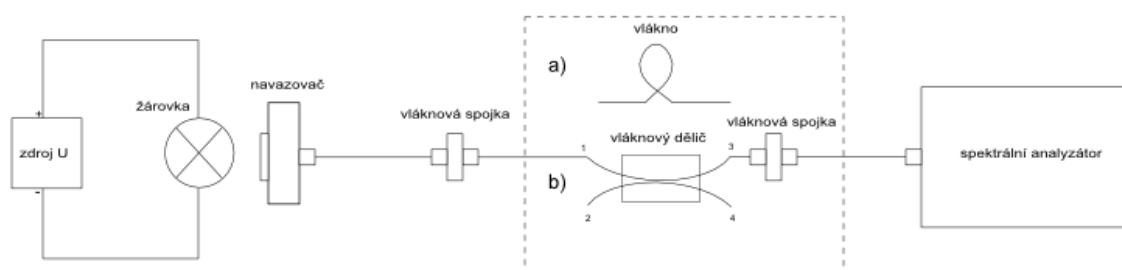
$$\delta x = x \cdot 8\% + 12d, \quad (8)$$

kde x je naměřená hodnota přímo měřené veličiny, která je zatížena nejistotou δx a d je 1 digit (nejnižší hodnota, kterou lze na daném rozsahu změřit). Výsledná nejistota nepřímo měřené veličiny R byla spočítána dle zákona o šíření nejistot uvedeného v knize [13].

Výsledky dělicích poměrů vláknových děličů Optokon 5 a 6, uvedené v tabulce 1, potvrzují symetrii vláknového děliče 2×2. Vzhledem k této symetrii byly ostatní vláknové děliče měřeny pouze jednostranně.

2.4 Měření spektra žárovky

Aby bylo možné určit závislost dělicího poměru vláknových děličů svazku na vlnových délkách, bylo nutné vybrat vhodný optický zdroj vlnových délek v rozmezí 780 nm – 850 nm. K tomuto účelu byla vybrána širokospektrální žárovka.

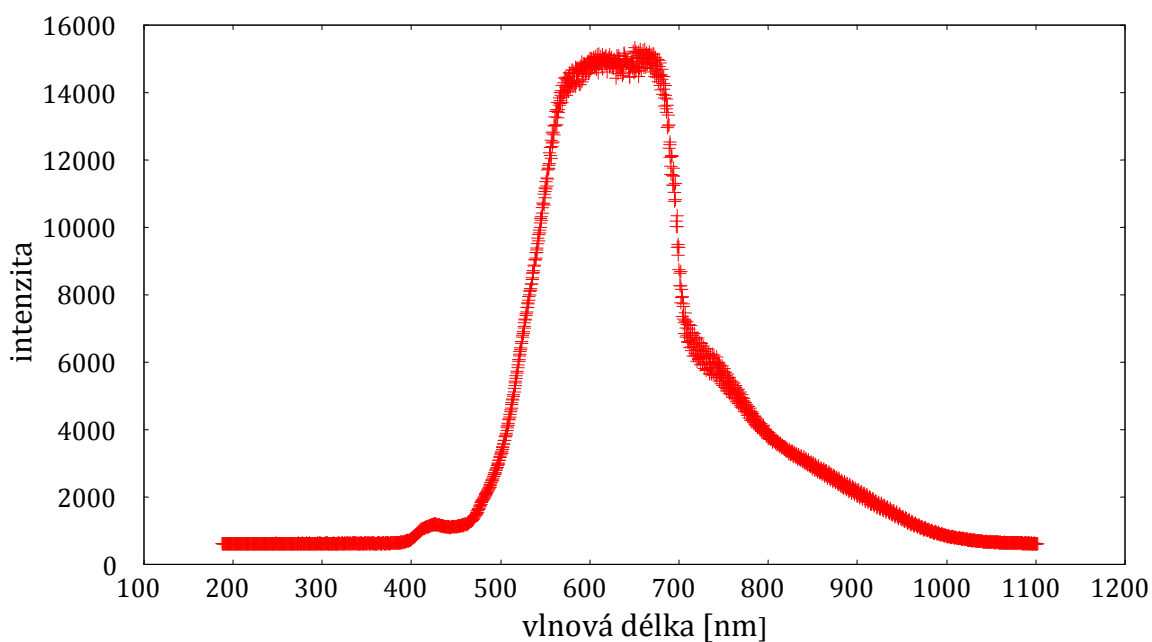


Obrázek 7: Blokové schéma zapojení: a) pro měření spektra žárovky, b) pro měření dělicího poměru vláknových děličů.

Schéma zapojení pro měření spektra žárovky je uvedeno na obrázku 7a. Jako zdroj záření byla použita žárovka Philips 20 W s wolframovým vláknem. Ta byla zašroubovaná v objímce a přivedena ke zdroji stejnosměrného napětí (PL303, Aim TTi). Na zdroji bylo po celou dobu měření nastaveno napětí 12 V.

K navázání elektromagnetického záření žárovky do optického vlákna byl použit navazovač obsahující spojnou čočku (C220 TME-B, Thorlabs) s ohniskovou vzdáleností 11 mm. Navazovač byl nastaven do polohy umožňující sledovat požadované spektrum.

K šíření optického signálu bylo využito jednořivkové optické vlákno (780HP, Nufern). Ke spojení vláknových komponent byly použity FC-PC konektory. Pro měření byl použit spektrální analyzátor (HR2000+, Ocean Optics). V programu k analyzátoru byla nastavena High-speed Acquisition na deset měření a zvolen integrační čas 30 ms. Při delší integrační době by docházelo k saturaci intenzit na vlnových délkách 550 nm – 680 nm. Data byla uložena v podobě txt souboru. Naměřené spektrum žárovky je zobrazeno na obrázku 8. Pro další měření nás nejvíce zajímalo spektrum žárovky na vlnových délkách od 780 nm do 850 nm.

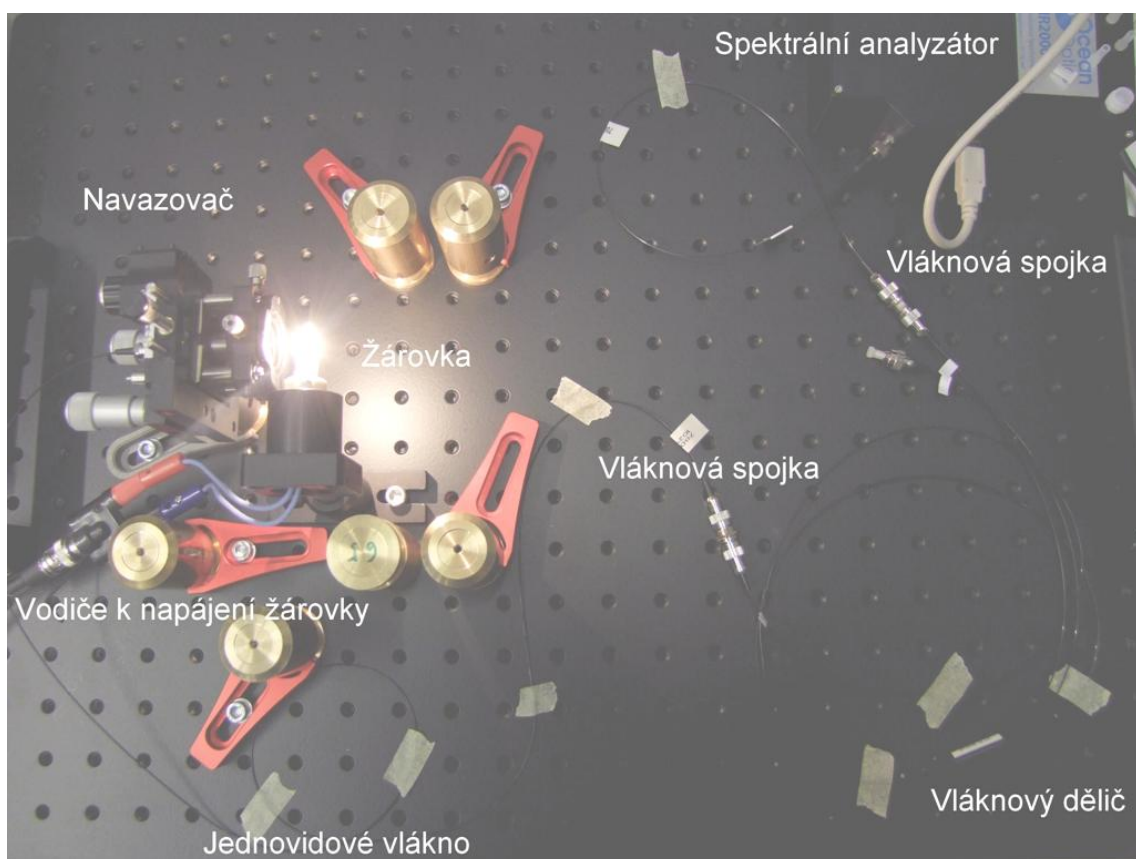


Obrázek 8: *Spektrum žárovky Philips 20W s wolframovým vláknem po navázání do jednořivkového vlákna.*

Relativní směrodatná odchylka výkonu žárovky Philips 20 W při napájení stejnosměrným zdrojem napětí (PL303, Aim TTi) a detekcí spektrálním analyzátozem (HR2000+, Ocean Optics) je pro vlnovou délku 810,1 nm menší než $6 \cdot 10^{-3}$ (6 ‰). Tato relativní směrodatná odchylka platí pro měření kratší než 40 minut.

2.5 Měření dělicí poměru vláknových děličů s využitím širokospektrálního zdroje záření

Cílem tohoto experimentu bylo změřit dělicí poměr jednovidových vláknových děličů od firmy Optokon a srovnat tyto hodnoty s měřením uvedeným v kapitole 2.3 a tím potvrdit správnost měření. Dále bylo cílem změřit dělicí poměr jednovidových děličů od firmy Sifam a u všech změřených děličů stanovit závislost dělicího poměru na vlnové délce. Pro určení závislosti byla použita pouze část spektra žárovky a to v rozsahu vlnových délek 780 nm – 850 nm, protože pro vlnové délky nižší než 780 nm se použité vlákno nechovalo jednovidově a pro vlnové délky vyšší než 850 nm se tyto vláknové děliče nebudou používat.



Obrázek 9: Fotografie zapojení z obrázku 7b.

Jako zdroj záření byla použita žárovka Philips 20W s wolframovým vláknem. Schéma zapojení pro měření jednovidových vláknových děličů je zobrazen na obrázku 7b. Popis zapojení je identický s popisem uvedeným v kapitole 2.4. Zapojení je rozšířeno pouze o jednu vláknovou spojku a o měřené děliče (SN: 31100091000[2–6], Optokon), (SN: 011760[14,17],

01199[314,327,333], 01297062, Sifam). Fotografie reálného zapojení je na obrázku 9.

V prvním kroku měření bylo k navazovači nejprve připojeno vstupní rameno děliče 1 a výstupní rameno 3 bylo vyvedeno do spektrálního analyzátoru. Při všech měření bylo vždy nastaveno 10 měření a vhodná integrační doba, tak aby nedošlo k saturaci spektrálního analyzátoru. Po uložení dat v podobě txt souboru bylo rameno děliče 3 odpojeno a připojeno rameno 4. Poté následovala změna na vstupu (rameno 2 za rameno 1) a cyklus na straně výstupů se opakoval. Ve výsledku byly naměřeny intenzity I_{13} , I_{14} , I_{23} , I_{24} pro vlnové délky od 780 nm – 850 nm s rozlišením $\approx 0,5$ nm. Z těchto intenzit již bylo možné ze vztahu (5), po odečtení hodnot intenzit šumu, spočítat dělicí poměr daného děliče. Stejným způsobem byly změřeny všechny ostatní děliče. Měření jednoho vláknového děliče trvalo přibližně 20 minut.

Výsledky měření

V prvním kroku vyhodnocování byla provedena korekce vlnových délek podle vztahu (7). V druhém kroku byly jednotlivé hodnoty intenzit I_{13} , I_{14} , I_{23} , I_{24} sníženy o hodnotu šumu, protože ten by mohl významně ovlivnit výsledný dělicí poměr. Z důvodu toho, že zjištěný šum byl konstantní v celém rozsahu vlnových délek spektrálního analyzátoru, byla hodnota intenzity šumu určena jako střední hodnota naměřených intenzit v rozsahu vlnových délek 250 nm – 350 nm pro každé měření zvlášť. Veličina R udávající dělicí poměr byla spočítána ze vztahu (5) a příslušná nejistota měření dle zákona o šíření nejistot uvedeného v knize [13].

Tabulka 2: *Hodnoty dělicích poměrů vláknových děličů od firmy Optokon získané měřením s laserovou diodou a měření s širokospektrálním zdrojem záření.*

Vláknový dělič svazku	Laserová dioda (811,5 nm)	Žárovka (811,4 nm)
	R [%]	R [%]
Optokon 311000910002	49,1± 0,2	49,2±0,2
Optokon 311000910003	50,8± 0,2	50,6±0,3
Optokon 311000910004	52,1± 0,2	52,1±0,2
Optokon 311000910005	50,6± 0,2	50,3±0,3
Optokon 311000910006	50,4± 0,2	50,5±0,3

V tabulce 2 je uvedeno srovnání vypočítaných dělicích poměrů získaných dvěma různými měřeními. Měření s laserovou diodou sloužilo jako měření referenční a to z důvodu toho, že výrobce firma Optokon nedodala k vláknovým děličům katalogové listy. Z tabulky 2 je patrné, že výsledky dělicích poměrů se v rámci zjištěných nejistot shodují. Tento výsledek potvrdil správnost metody měření využívající širokospektrální zdroj a spektrální analyzátor.

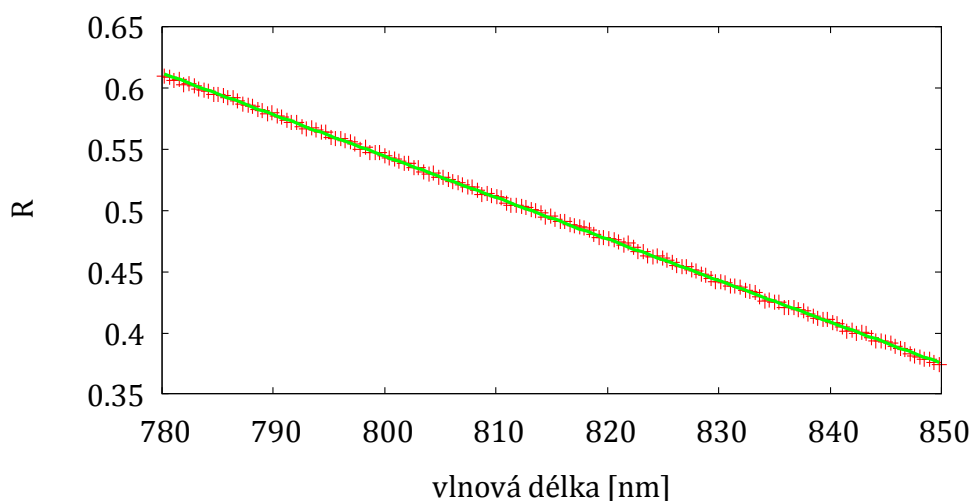
V tabulce 3 jsou shrnuty výsledky měření dělicího poměru jednovidových vláknových děličů od firem Optokon a Sifam. V případě firmy Sifam je v tabulce 3 uvedena i hodnota dělicího poměru změřená výrobcem. Laboratoř kvantové optiky a kvantové informatiky Univerzity Palackého zadala výrobcům vždy stejný požadavek a to, aby dodali jednovidový vláknový dělič 2×2 s dělicím poměrem 50:50 pro vlnovou délku 810 nm. Výjimku tvořil pouze dělič Sifam 01297062, který měl mít totožný dělicí poměr, avšak pro vlnovou délku 800 nm.

Tabulka 3: Hodnoty dělicích poměrů měřených vláknových děličů od firem Optokon a Sifam.

Vláknový dělič svazku	R [%] pro 810,1nm	R [%] udávaný výrobcem	Limit výrobce
Optokon 311000910002	49,7±0,2	neudán	neudán
Optokon 311000910003	51,0±0,3	neudán	neudán
Optokon 311000910004	51,7±0,2	neudán	neudán
Optokon 311000910005	50,8±0,3	neudán	neudán
Optokon 311000910006	51,1±0,4	neudán	neudán
Sifam 01176014	49,1±0,2	49,96 (810 nm)	48,5-51,5
Sifam 01176017	49,1±0,2	neudán	neudán
Sifam 01199314	49,1±0,2	49,23 (810 nm)	48,5-51,5
Sifam 01199327	49,9±0,3	49,54 (810 nm)	48,5-51,5
Sifam 01199333	49,5±0,3	49,83 (810 nm)	48,5-51,5
Sifam 01297062	49,6±0,2 (800 nm)	49,76 (800 nm)	48,5-51,5

Z tabulky 3 je patrné, že vyrobit vláknový dělič svazku s přesně definovaným dělicím poměrem pro určitou vlnovou délku není snadné. Zadaní laboratoře nejlépe vyhovují vláknové děliče Optokon 311000910002 a Sifam 01199327. Obecně lze však konstatovat, že firma Sifam dosáhla nepatrně lepších výsledků než firma Optokon.

Na obrázku 10 je zobrazena závislost dělicího poměru na vlnové délce pro vláknový dělič Optokon 311000910006. Grafy závislosti ostatních vláknových děličů jsou velmi podobné.



Obrázek 10: Závislost dělicího poměru na vlnové délce pro vláknový dělič Optokon 311000910006.

Vypočítané hodnoty dělicích poměrů byly proloženy křivkou lineární funkce:

$$g(x) = a \cdot x + b.$$

Parametry funkce $g(x)$ byly spočítány metodou nejmenších čtverců. Výpočet byl proveden v programu GNU PLOT. Důležitou informaci dává zejména parametr a , jež představuje rychlost změny dělicího poměru v závislosti na vlnové délce.

Tabulka 4: Vypočítané hodnoty parametrů funkce $g(x)$ pro vláknové děliče Optokon a Sifam.

Vláknový dělič svazku	Parametr a	Parametr b
Optokon 311000910002	-0,0035	3,3495
Optokon 311000910003	-0,0034	3,2720
Optokon 311000910004	-0,0036	3,4266
Optokon 311000910005	-0,0035	3,3603
Optokon 311000910006	-0,0034	3,2558
Sifam 01176014	-0,0049	4,4518
Sifam 01176017	-0,0050	4,5299
Sifam 01199314	-0,0050	4,5599
Sifam 01199327	-0,0053	4,7859
Sifam 01199333	-0,0049	4,5003
Sifam 01297062	-0,0048	4,3262

Přehled vypočítaných parametrů funkce $g(x)$ pro měřené vláknové děliče je uveden v tabulce 4. Kompletní přehled závislostí dělicích poměrů na vlnových délkách u měřených děličů je uveden v přílohách 2 a 3.

Parametry funkčních závislostí vláknových děličů jednotlivých firem jsou téměř shodné. To se vzhledem k tomu, že vláknové děliče byly vyrobeny podobnou technologií, dalo očekávat. Rozdíl v parametrech vláknových děličů od Optokonu a Sifamu je pravděpodobně dán rozdílným nastavením výrobních parametrů, jakým je například rychlost natahování vláken či teplota plamene hořáku. U vláknových děličů od Sifamu je závislost dělicího poměru na vlnové délce výraznější než v případě vláknových děličů z Optokonu.

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo charakterizovat vláknové děliče svazku. Práce byla rozdělena do dvou částí, na část teoretickou a experimentální. První kapitola teoretické části se věnovala stručnému popisu optického vlákna a vláknového děliče. V další kapitole byla popsána technologie tavení plamenem, kterou byly vyrobeny měřené vláknové děliče z Optokonu. Závěr teoretické části byl věnován výpočtu dělicího poměru vláknového děliče 2×2.

Stěžejní část práce se zabývala experimentem. V této části byly měřeny jednovidové vláknové děliče svazku, vyrobené firmou Optokon a Sifam. Obě firmy dostaly od Laboratoře kvantové optiky stejné zadání, a to vyrobit jednovidové vláknové děliče s dělicím poměrem 50:50 pro vlnovou délku 810 nm. Nejprve bylo provedeno měření dělicích poměrů vláknových děličů od Optokonu. Jako zdroj elektromagnetického záření byla nejprve použita laserová dioda. Toto měření sloužilo jako referenční. Při druhém měření stejných vláknových děličů byla využita širokospektrální žárovka. Výsledky dělicích poměrů těchto dvou měření se v rámci zjištěných nejistot shodovaly. Druhou metodou byly proměřeny také vláknové děliče od firmy Sifam. Z jedenácti měřených vláknových děličů nejlépe vyhovovaly zadání Laboratoře kvantové optiky vláknový dělič Optokon 311000910002 s dělicím poměrem $49,69 \% \pm 0,22 \%$ pro vlnovou délku 810,1 nm a vláknový dělič Sifam 01199327 s dělicím poměrem $49,85 \% \pm 0,25 \%$ pro totožnou vlnovou délku. U všech měřených vláknových děličů byla zjištěna lineární závislost dělicího poměru na vlnové délce. U vláknových děličů od Sifamu byla závislost nepatrně výraznější oproti vláknovým děličům z Optokonu. Tato odlišnost mohla být způsobena použitím odlišné technologie výroby či rozdílným nastavením výrobních parametrů.

Výsledkem této bakalářské práce jsou kalibrační listy měřených vláknových děličů, které obsahují hodnoty dělicích poměrů pro vlnovou délku 810,1 nm a funkční vztahy, podle kterých je možné dopočítat dělicí poměr pro libovolnou vlnovou délku v rozmezí vlnových délek 780 nm až 850 nm. Kalibrační listy by měly sloužit pro potřeby pracovníků Laboratoře kvantové optiky a ulehčit jim tak výběr vhodného vláknového děliče.

CONCLUSION

The aim of the Bachelor thesis was to characterize fiber beam splitters. The thesis was divided into two parts – theoretical and experimental. The first chapter of the theoretical part includes a brief description of an optical fibre and fibre splitter. The next chapter describes the flame-brush technique, which was used to make measured fibre splitters by Optokon company. The conclusion of the theoretical part deals with the calculation of the splitting ratio of the fibre splitter 2x2.

The main part of the thesis dealt with an experiment. In this part, single-mode fiber beam splitters made by Optokon and Sifam companies were measured. Both companies received the same instructions from the Quantum Optics Lab – to produce single-mode fiber beam splitters with the splitting ratio 50:50 for wavelength of 810 nm. First, the splitting ratios of fiber splitters made by Optokon were measured. Laser diode was used as a source of electromagnetic radiation. This measurement served as reference. Broad-spectrum light bulb was used for the second measurement. The results of the splitting ratios of these two measurements correspond within measurement uncertainties. The other method was used to measure the fibre splitters also by Sifam company. Out of the eleven measured fibre splitter, the fibre splitter Optokon 311000910002 with the splitting ratio of $49.7 \% \pm 0.2 \%$ for wavelength of 810.1 nm and fibre splitter Sifam 01199327 with the splitting ratio of $49.9 \% \pm 0.3 \%$ for the same wavelength satisfy the requirements of the Quantum Optics Lab best. Linear dependence of the splitting ratio on wavelength was discovered for all the measured fibre splitters. In the case of the Sifam fibre splitters, the linear dependence is slightly stronger in comparison to the Optokon fibre splitters. This difference might be caused by using different production technologies or by different settings of production parameters.

The result of this Bachelor thesis are calibration sheets of the measured fibre splitters, that contain the figures of the splitting ratios for 810.1 nm wavelength and the functional relations, which can be used to calculate the splitting ratio for any wavelength within 780 nm – 850 nm.

The calibration sheets should serve the needs of Quantum Optics Lab workers and facilitate the choice of suitable fibre splitter.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] SALEH, TEICH. *Základy fotoniky: Svazek 2*. Praha: MATFYZPRESS, 1994. ISBN 80-858-6302-2.
- [2] MARŠÁLEK, Leoš. *Optická vlákna*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2006.
- [3] BARTŮŠKOVÁ, DUŠEK, FIURÁŠEK, HRADIL, JEŽEK, MIČUDA, SLODIČKA. *Vláknová optika na telekomunikačních vlnových délkách*. Olomouc: Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého v Olomouci, 2008.
- [4] PETERKA, Pavel. *Komponenty vláknových zesilovačů*. Praha: Ústav fotoniky a elektroniky Akademie věd ČR, 2012.
- [5] VARGHESE, Samuel. *Fabrication and Characterization of All-Fiber Components for Optical Access Networks*. Cochin: Cochin University of Science and Technology, 2008.
- [6] PETERKA, Pavel. *Vláknové lasery - jasné světlo ze skleněných nitek*. Praha: Akademie věd ČR.
- [7] HLOŽÁNEK, Martin a Blanka BRŮNOVÁ. *Přístrojová technika v oftalmologii* [online]. 1. vyd. Praha: Univerzita Karlova, 2. lékařská fakulta, 2006.
- [8] ALEGRIA, Carlos. *All-Fibre Devices for WDM Optical Communications*. Southampton: University of Southampton, 2001.
- [9] MARTAN, Tomáš. *Jemná mechanika a optika; technický měsíčník Ministerstva všeobecného strojírenství: Zúžená optická vlákna*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 2010.
- [10] Osobní konzultace s technologem firmy Optokon Janem Houzarem.
- [11] HLOUŠEK, Josef. *Linearita detekce světla*, bakalářská práce. Olomouc: Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého, 2013.
- [12] 1906 - Description and Specifications. *TTi - Thurlby Thandar Instruments - Electronic Test Equipment and Power Supplies, Aim-TTi* [online]. c2012 [cit. 2013-01-17]. Dostupné z: <http://www.tti-test.com/products-tti/text-pages/prec-1906.htm>

[13] MLČOCH, Jiří. *Úvod do fyzikálního měření. 2.*, upr. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého, Přírodovědecká fakulta, 2001. ISBN 80-244-0232-7.

SEZNAM TABULEK A OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Fotografie zařízení určené pro výrobu vláknových děličů. Fotografie byla pořízena se souhlasem firmy Optokon.	11
Obrázek 2: Schéma děliče 2×2.	14
Obrázek 3: Změřená spektrální čára 763,51 nm Hg-Ar výbojky.	16
Obrázek 4: Blokové schéma zapojení pro měření spektra laserové diody.	17
Obrázek 5: Spektrum laserové diody QFLD-810-10S.	18
Obrázek 6: Blokové schéma zapojení pro měření dělicího poměru s využitím laserové diody.	18
Obrázek 7: Blokové schéma zapojení: a) pro měření spektra žárovky, b) proměření dělicího poměru vláknových děličů.	20
Obrázek 8: Spektrum žárovky Philips 20W s wolframovým vláknem po navázání do jednovidového vlákna.	21
Obrázek 9: Fotografie zapojení z obrázku 7b.	22
Obrázek 10: Závislost dělicího poměru na vlnové délce pro vláknový dělič Optokon 311000910006.	25
Tabulka 1: Naměřené hodnoty proudů a vypočítané hodnoty dělicích poměrů vláknových děličů pro $\lambda=(811,5\pm 0,1)\text{nm}$	19
Tabulka 2: Hodnoty dělicích poměrů vláknových děličů od firmy Optokon získané měřením s laserovou diodou a měření s širokospektrálním zdrojem záření.	23
Tabulka 3: Hodnoty dělicích poměrů měřených vláknových děličů od firem Optokon a Sifam.	24
Tabulka 4: Vypočítané hodnoty parametrů funkce $g(x)$ pro vláknové děliče Optokon a Sifam.	25

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Spektrum kalibrační lampy (CAL-2000, Ocean Optics)

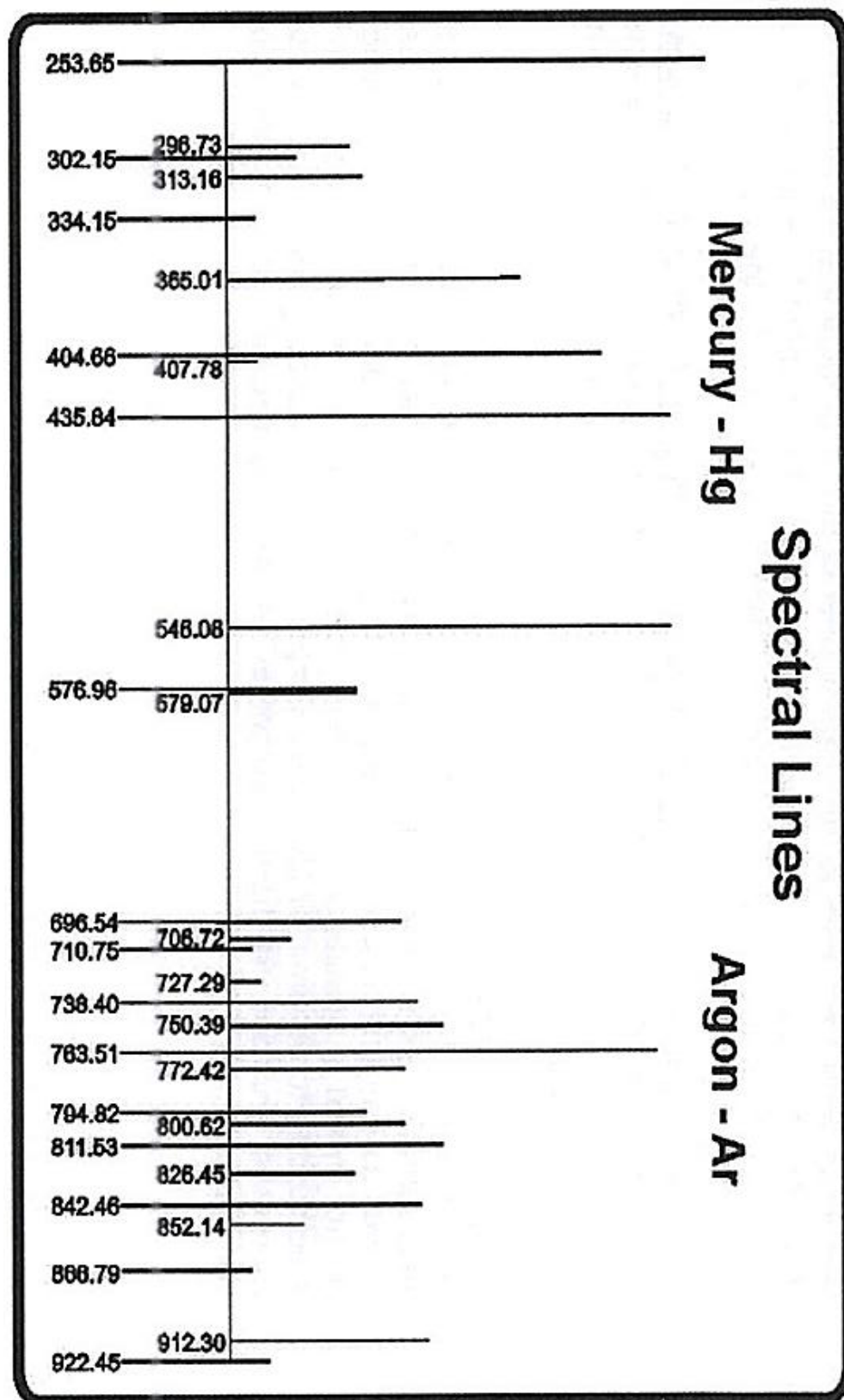
Příloha 2 – Dělicí poměr vláknových děličů Optokon pro vlnové délky

780nm – 850nm

Příloha 3 – Dělicí poměr vláknových děličů Sifam pro vlnové délky

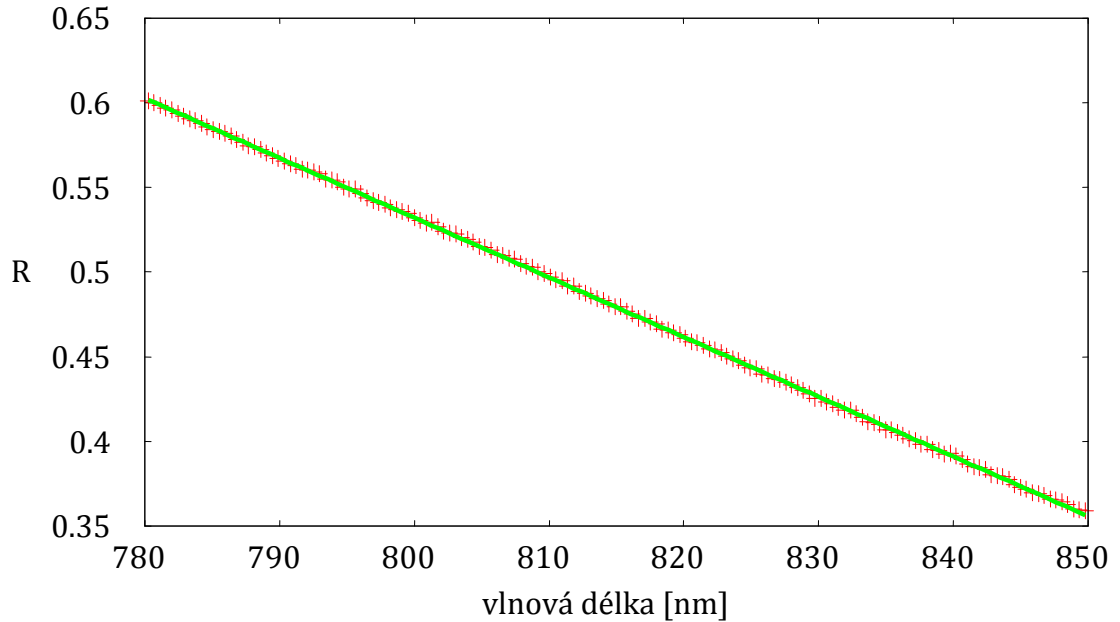
780nm – 850nm

Příloha 1: Spektrum kalibrační lampy (CAL-2000, Ocean Optics)



Příloha 2: Dělicí poměr vláknových děličů Optokon pro vlnové délky 780-850nm

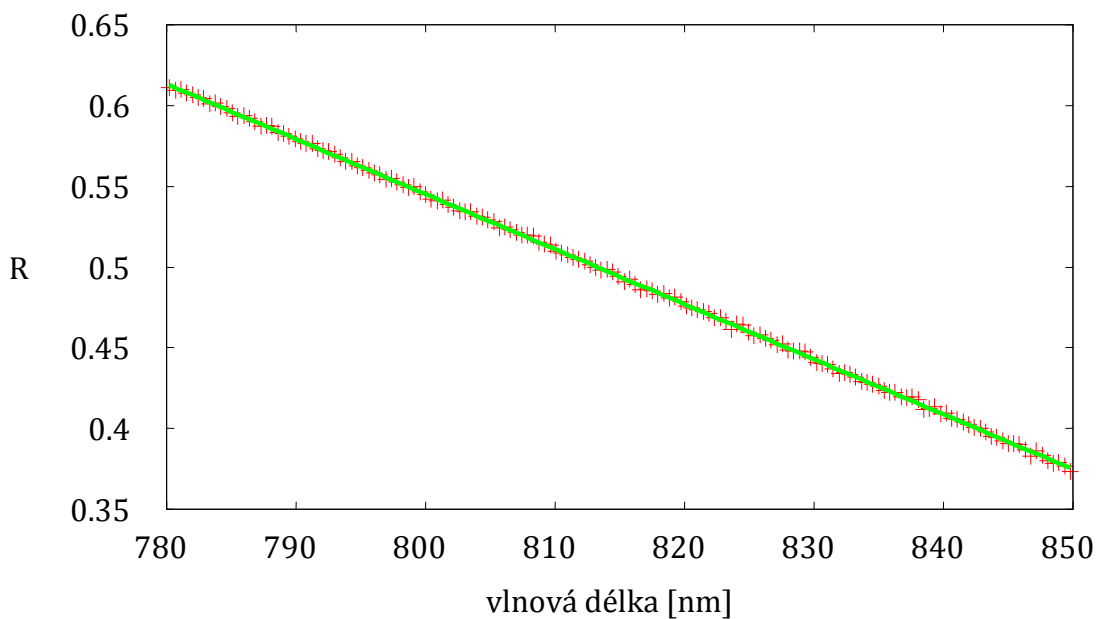
SN: 311000910002



$$g(x) = -0,00352176x + 3,34953$$

Dělicí poměr pro vlnovou délku 810,1 nm: $0,497 \pm 0,002$

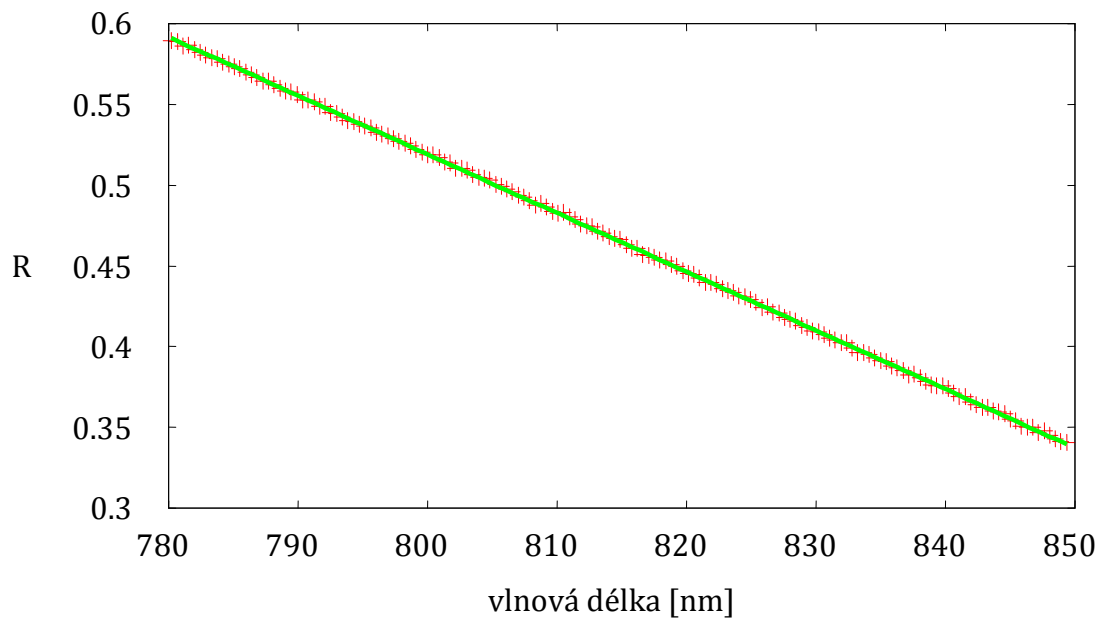
SN: 311000910003



$$g(x) = -0,0034086x + 3,27196$$

Dělicí poměr pro vlnovou délku 810,1 nm: $0,510 \pm 0,003$

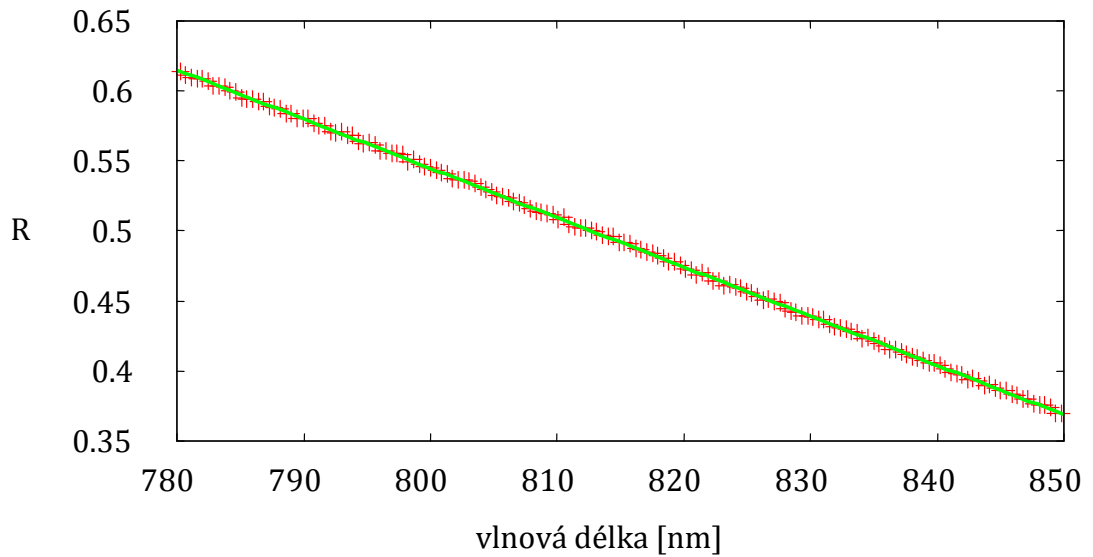
SN: 311000910004



$$g(x) = -0,00363453x + 3,42664$$

Dělicí poměr pro vlnovou délku 810,1 nm: $0,517 \pm 0,002$

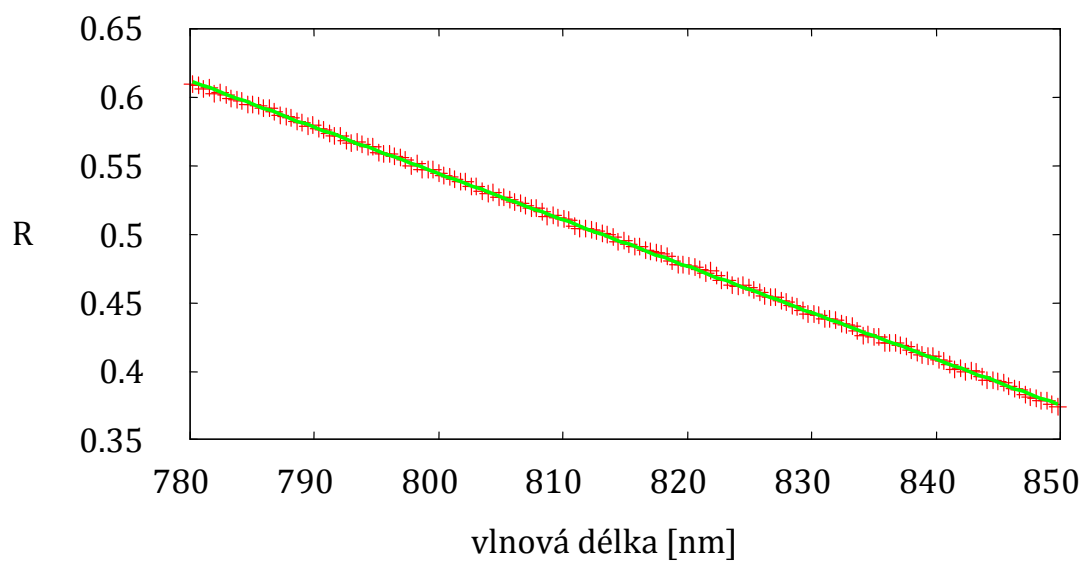
SN: 311000910005



$$g(x) = -0,00351957x + 3,36028$$

Dělicí poměr pro vlnovou délku 810,1 nm: $0,508 \pm 0,003$

SN: 311000910006

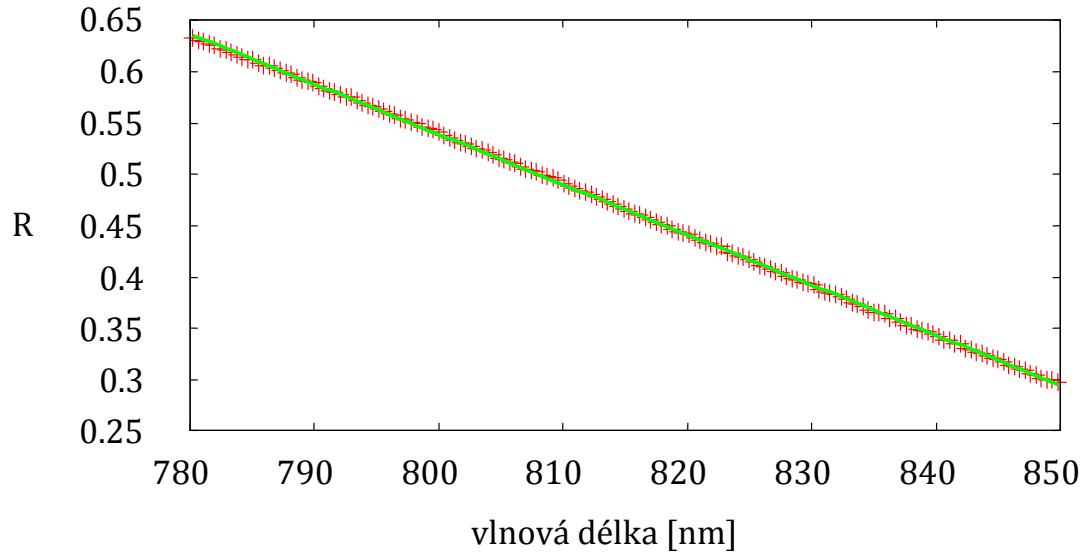


$g(x) = -0,00338916x + 3,25583$

Dělicí poměr pro vlnovou délku 810,1 nm: 0,511±0,004

Příloha 3: Dělicí poměr vláknových děličů Sifam pro vlnové délky 750-850nm

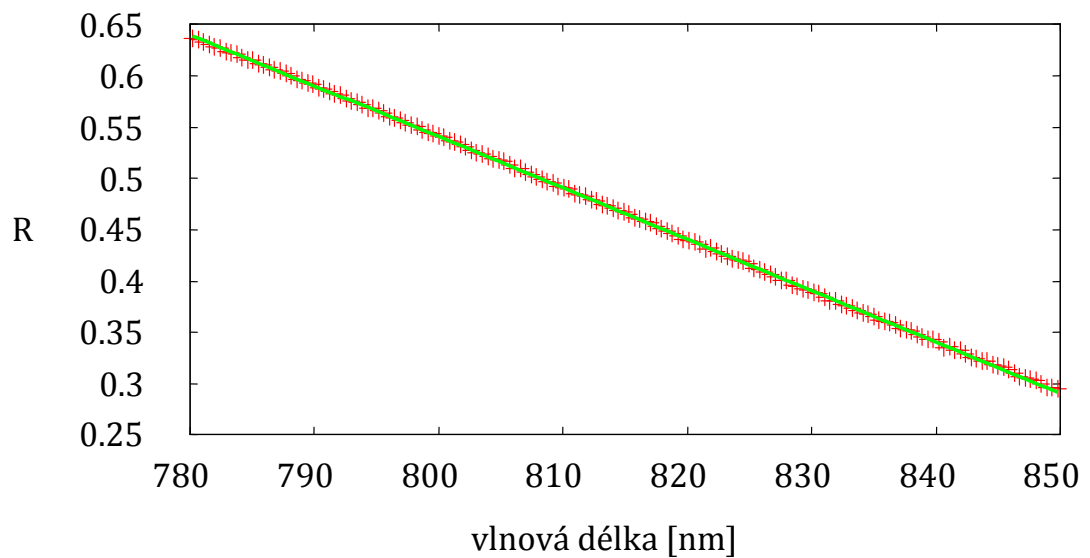
SN: 01176014



$$g(x) = -0,00489106x + 4,45179$$

Dělicí poměr pro vlnovou délku 810,1 nm: $0,491 \pm 0,002$

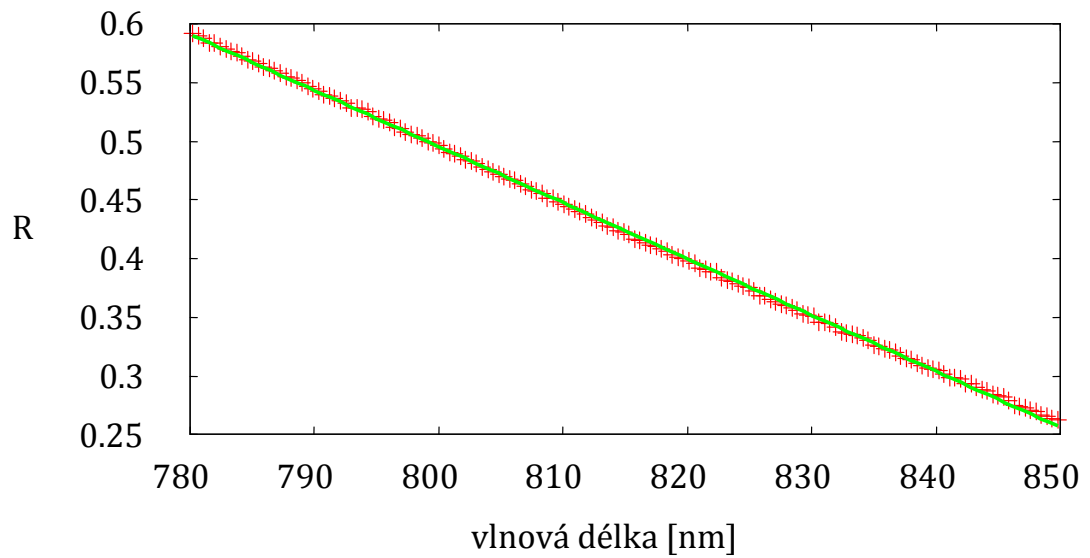
SN: 01176017



$$g(x) = -0,00498689 x + 4,52991$$

Dělicí poměr pro vlnovou délku 810,1 nm: $0,491 \pm 0,002$

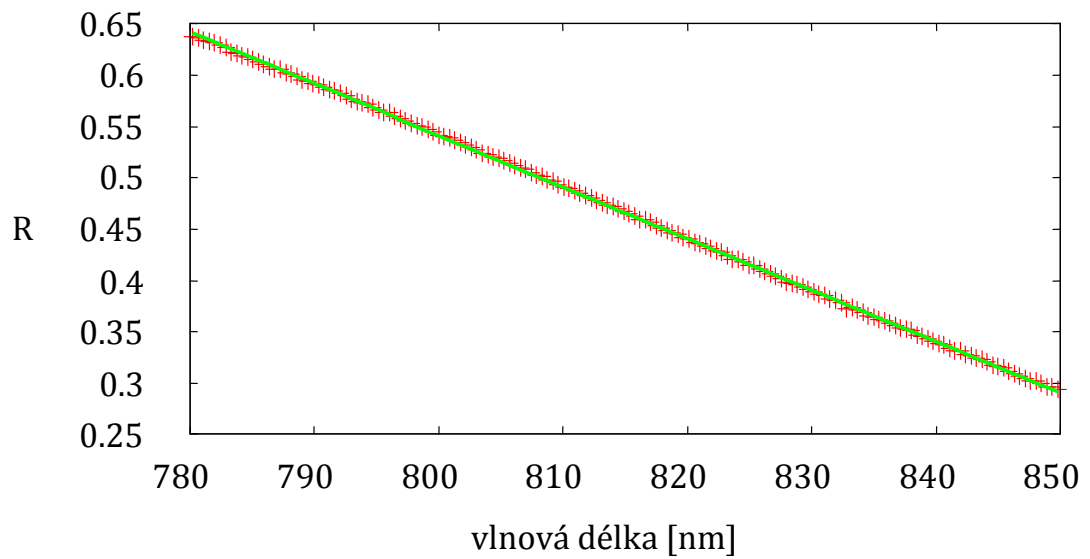
SN: 01297062



$$g(x) = -0,00478811x + 4,32617$$

Dělicí poměr pro vlnovou délku 800 nm: $0,496 \pm 0,002$

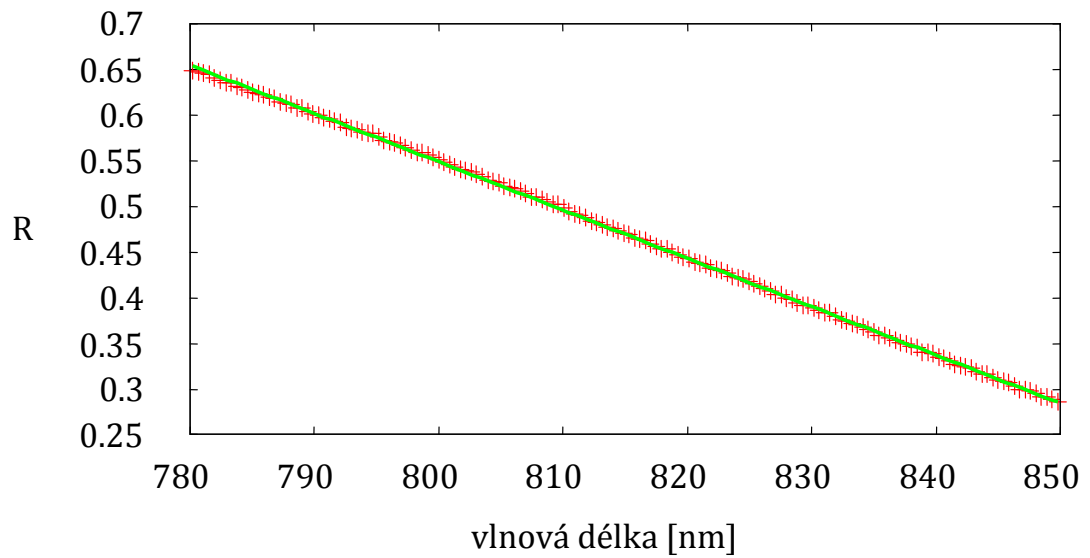
SN: 01199314



$$g(x) = -0,00502311x + 4,55988$$

Dělicí poměr pro vlnovou délku 810,1 nm: $0,491 \pm 0,002$

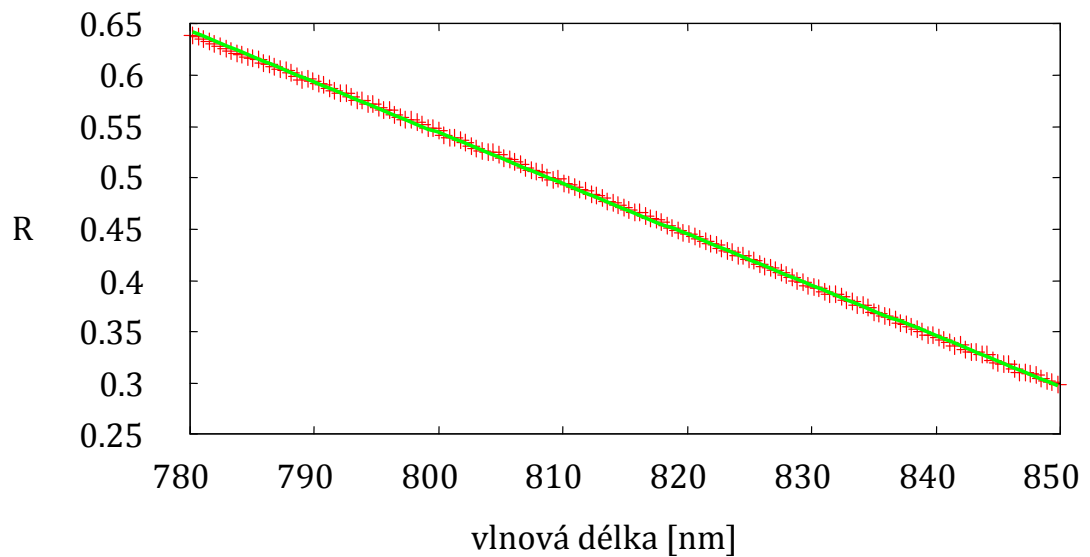
SN: 01199327



$$g(x) = -0,00529587x + 4,78593$$

Dělicí poměr pro vlnovou délku 810,1nm: 0,499±0,003

SN: 01199333



$$g(x) = -0,00494561x + 4,5003$$

Dělicí poměr pro vlnovou délku 810,1nm: 0,495±0,003