



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta Elektrotechnická
katedra mikroelektroniky

**Měření vlastností optických vláken a kabelů vystavených účinkům
gama záření**

Measurement of the properties of optical fibers and cables exposed to the effects of
gamma radiation

Diplomová práce

Bc. Marek Zikmund

Vedoucí práce: doc. Ing. Václav Prajzler, Ph.D.

Praha 2023



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Zikmund** Jméno: **Marek** Osobní číslo: **474262**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Specializace: **Elektronika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Měření vlastností optických vláken a kabelů vystavených účinkům gama záření

Název diplomové práce anglicky:

Measurement of the Properties of Optical Fibers and Cables Exposed to the Effects of Gamma Radiation

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s teoretickými principy vedení světla v optických vláknových vlnovodech. Zaměřte se na vliv gama záření na vlastnosti optických vláken a kabelů.
- 2) Podílejte se na experimentech ozařování optických vláken a kabelů gama zářením.
- 3) Změřte vlastnosti dostupných vzorků optických vláken a kabelů.
- 4) Studujte také vlastnosti relaxace vzorků po ozáření.
- 5) Dosažené výsledky shrňte do zprávy v rozsahu cca 50 stran.

Seznam doporučené literatury:

1. K. Novotný: Optická telekomunikační technika, ČVUT 1998, skripta.
2. K. Masopustová: Měření vlastností optických vláken a kabelů pro případné použití v extrémních podmínkách. Diplomová práce ČVUT v Praze 2022.
3. S. Girard, J. Kuhnenn, A. Gusarov, B. Brichard, M. Van Uffelen, Y. Ouerdane, A. Boukenter, C. Marcandella, Radiation Effects on silica-based optical fibers: Recent advances and future challenges, IEEE Trans. Nucl. Sci. 60 (3) (2013) 2015–2036

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Václav Prajzler, Ph.D. katedra mikroelektroniky FEL

Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **13.02.2023** Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **22.09.2024**

doc. Ing. Václav Prajzler, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Pavel Hazdra, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování:

Rád bych poděkoval všem, kteří mi pomohli při řešení a práci na mé diplomové práci, zejména pak mému vedoucímu práce panu doc. ing. Václavu Prajzlerovi Ph.D., za ochotu a za obětavost. Rád bych také poděkovat vedoucímu oddělení Radiační chemie a kvalifikace na prostředí Ing. Vítu Plačkovi (ÚJV Řež, a. s.) za umožnění provedení testů pomocí gama ozařování v ozařovnách ROZA a PANOZA. Chtěl bych také poděkovat technickému personálu Ing. Martinu Cabalkovi Ph.D. za technickou pomoc při prováděných experimentech na pracovišti ÚJV Řež, a.s.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

.....

Bc. Marek Zikmund

Abstrakt

Optická vlákna jsou v současnosti používána pro přenos dat na velké vzdálenosti. Na optická vlákna však působí vlivy okolního prostředí, které mohou negativně ovlivnit přenosové vlastnosti optických vláken. V extrémních prostředích mohou být optická vlákna vystavena vlivům gama záření.

Tato diplomová práce se zabývá měřením vlastností optických vláken a optických kabelů vystavených vlivu gama záření. Práce se zkoumá vlastnosti experimentálních optických kabelů CTDS a CTFS, optických vláken s dotací erbia a optických křemenných vláken s průměrem jádra 105 μm , na které byly aplikovány dávky gama záření s nízkým, nebo vysokým dávkovým příkonem.

V diplomové práci je popsán experiment s kabely CTDS a CTFS, které byly ozářeny dávkou gama záření 80,5 kGy s dávkovým příkonem 5,5 Gy/h, a následné měření optického útlumu jednotlivých optických vláken v kabelech. Toto měření ukázalo větší ovlivnění gama zářením u kabelů CTFS, které obsahoval ochranný gel, na rozdíl od optického kabelu CTDS.

Také jsou v této práci popsány vlastnosti erbiem dotovaného vlákna při vystavení vlivu malých dávek gama záření. Provedené experimenty byly zaměřeny na měření změn optického útlumu a optického zesílení v důsledku ozáření a v době relaxace optického vlákna v době po ozáření. Z výsledků je patrné, že velikost optického útlumu způsobeného gama zářením se zvyšuje s dávkou gama záření. Také bylo zjištěno, že pro kratší vlnové délky je tento útlum vyšší a s narůstající vlnovou délkou tento nárůst optického útlumu klesá.

Pro 3 m dlouhé erbiem dotované optické vlákno je také popsán experiment pro studium efektu foto-bělení. Zde bylo dosaženo snížení optického útlumu ozářeného vlákna o 2,20 dB na vlnové délce vstupního signálu 1550 nm při ovlivnění optického vlákna světlem o výkonu 68 mW na vlnové délce 980 nm při celkové délce foto-bělení 19 h.

Poslední experimenty, popsané v této diplomové práci se zaměřují na měření vlastností vláken s průměrem jádra 105 μm . Tyto vlákna byla zkoumána při rychlém i pomalém ozařování. Při pomalém ozařování dávkovým příkonem 5 Gy/h nebyla, na vlnových délkách nad 1100 nm, na vláknech vystavených maximální dávkou gama záření 92,7 kGy pozorována změna optického útlumu v důsledku gama ozařování. Při rychlém ozařování 1,9 kGy/h na dávku 181 kGy byl pozorován maximální navýšení optického útlumu vlivem gama záření o 0,34 dB/m.

Klíčová slova: Optické vlákno, optický kabel, gama, záření, erbium, foto-bělení.

Abstract

Optical fibers are nowadays mostly used type of communication, which operates on the long-range communication line. Optical fibers are affected by their surrounding environment, which can negatively affect the transmission properties of the optical fiber. In extreme conditions, the optical fiber can be exposed to gamma radiation.

This diploma thesis deals with the properties of optical fibers and their changes after gamma radiation exposure. For the experiments optical cables CTDS and CTFS were used. Also, experiments focus on the properties of erbium-doped optical fibers and fibers with 105 μm core diameter. These optical fibers underwent gamma irradiation with slow or fast irradiation rates.

This diploma thesis describes the experiment of optical cables CTDS and CTFS, which was irradiated by a dose of 80.5 kGy with an irradiation of rate 5.5 Gy/hr. Afterward, optical attenuation of each optical fiber of the optical cables. From this measurement, it seems that optical cable CTFS is more affected by gamma radiation than CTDS cable, as there is a protective gel in the optical cable CTFS.

The properties of the erbium-doped fiber when exposed to low doses of gamma radiation are also described in this work. The experiments performed were focused on the changes in optical attenuation and optical gain due to irradiation and in the relaxation time of the optical fiber in the post-irradiation period. The results show, that the attenuation caused by gamma radiation increases with the dose of gamma irradiation. The study also found, that shorter wavelengths of the input signal are more affected by gamma radiation, and with increasing wavelength, the affection is lower.

On the 3 m long erbium-doped optical fiber, the photobleaching effect is described. During this experiment, the sample of the erbium-doped optical fiber was photobleached by 68 mW power signal at the wavelength of 980 nm for 19 h of total duration. The results show a decrease in the optical attenuation of 2.20 dB at the wavelength 1550 nm of the input optical signal.

Last set of experiments studied optical fibers with 105 μm core diameter. These fibers were tested on low rate and also on high rate irradiation. During low-rate irradiation maximum of 92.7 kGy dose was applied. The results show that none of those doses affect the optical attenuation of the fiber for input signal at wavelengths above 1100 nm. For the experiment with the high rate of gamma irradiation, the fiber was exposed to 181 kGy dose, with an irradiation rate of 1.9 kGy/hr. During this experiment, the optical attenuation of the fiber increases maximally by 0.34 dB/m.

Key words: *Optical fiber, optical cable, gamma, radiation, erbium, photobleaching.*

Seznam symbolů

symbol	veličina	jednotka
α	Optický útlum	[dB]
P_i	Vstupní optický výkon	[dBm]
P_o	Výstupní optický výkon	[dBm]
L	Délka vlákna	[m]
λ	Vlnová délka	[nm]
G	Optické zesílení	[dB]
RIA	Radiation Induced Attenuation-radiací způsobený útlum	[dB/m]

Seznam zkratk

symbol	význam
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier - Erbiem dotavaný vláknový zesilovač
PoF	Power over Fiber - Technologie pro přenos optického výkonu pomocí optických vláken
POF	Plastic Optical Fibers - Plastová optická vlákna
PLANIO	Laboratoř planárních optoelektronických a optických integrovaných struktur
SI	Skoková změna indexu lomu
GRIN	Gradientní změna indexu lomu
MFD	Mode Field Diameter - Průměr vidového pole
WDM	Wavelength Division Multiplexer - Vlnový multiplexer

Obsah

1	Úvod	12
2	Optické vláknové vlnovody	13
3	Optické kabely CTDS a CTFS	15
4	Erbium dotovaná optická vlákna	16
5	Gama ozařování	19
5.1	Vliv gama záření na optická vlákna	20
5.2	Ozařovny ROZA a PANOZA	20
5.3	Efekt Foto-bělení	22
6	Použité přístroje a vybavení	23
6.1	Optické zdroje záření	23
6.2	Měření optického výkonu	24
6.3	Měřicí přístroj optického výkonu OFT-4212	24
6.4	Měřicí přístroj PM800 a optický zdroj LS-800 a OFT-840	25
6.5	Optický spektrální analyzátor YOKOGAWA	25
6.6	Modul I.D.I.L.	25
6.7	Osciloskop GoldStar	26
7	Popis experimentů	27
7.1	Měření vlastností optických kabelů CTDS a CTFS	27
7.1.1	Měření spektrálních charakteristik vláken optických kabelů	27
7.1.2	Měření optického útlumu vláken optických kabelů	28
7.2	Měření vlastností optických vláken s dotací erbia	30
7.2.1	Měření optického útlumu	31
7.2.2	Měření optického zesílení	32
7.2.3	Měření efektu foto-bělení	33
7.3	Měření mnohavidových optických vláken s průměrem jádra 105 μm	35
8	Výsledky měření	37
8.1	Měření vlastností optických kabelů CTDS a CTFS	37
8.1.1	Měření spektrálních charakteristik	37
8.1.2	Měření optického útlumu vláken optických kabelů	39
8.2	Měření vlastností optických vláken dotovaných erbiem	43
8.2.1	Měření optického útlumu erbiem dotovaných vláken	43
8.2.2	Měření optického zesílení	46
8.2.3	Studium efektu foto-bělení	49
8.3	Výsledky měření optického útlumu vláken s průměrem jádra 105 μm	53
9	Závěr	58

1 Úvod

Optická komunikace je v dnešní době velice rozšířeným typem v komunikačních technologiích. Využívána je díky svým přednostem oproti komunikačnímu přenosu využívající metalické kabely nebo bezdrátové spojení. Výhodou optické komunikace pak jsou dobré přenosové vlastnosti, které umožňují vést optický signál na delší vzdálenosti, a také míra rušení optického signálu je daleko menší, než u metalických vedení, která jsou ovlivňována elektromagnetickým polem v okolí drátů, či kabelů. Míra rušení má také vliv na přenos dat, kde optická komunikace dokáže zajistit daleko vyšší přenosové rychlosti, a tedy i objem přenesených dat.

Pro zajištění fyzické trasy je z velké většiny využíváno křemenných optických vláken, které díky svým parametrům umožňují přenos optického signálu na vzdálenost desítek až stovek kilometrů od vysílače. Využívána jsou však také i plastová optická vlákna, která jsou používána pro krátkodosahové aplikace do stovek metrů. Pro dosažení prodloužení dosahu optické komunikační linky, kdy je zapotřebí optický signál zesílit, se využívají optická vlákna, která jsou dotovaná prvky vzácných zemin. Nejčastěji se využívá prvek erbia, který zesiluje světlo na vlnových délkách 1550 nm, což je vlnová délka, využívající se standardně v optické komunikaci díky přenosovým parametrům křemenných optických vláken.

Všechny prvky, které zajišťují optickou komunikaci jsou ovlivňovány podmínkami prostředí, ve kterém se nacházejí. Mohou být ovlivněni změnami teploty, vlhkosti a různými druhy tlaku a deformací. V krajně extrémních podmínkách mohou být optická vlákna vystavena také vlivu radiačního záření. Prvky, které jsou tomuto záření vystavené, jsou nejvíce ohrožované složkou vysokoenergetického elektromagnetického záření, takzvané gama záření, které společně s alfa a beta vyzařováním, vychází z nukleárního rozpadu. Vystavená optická vlákna pod vlivem těchto jevů degradují a tato degradace zapříčiňuje hlavně zvyšování optického útlumu, který má vliv na celkový optický přenos a dosah komunikační linky [1].

Tato diplomová práce se zabývá studiem vlastností optických vláken a kabelů, které jsou vystaveny gama záření, kdy vlákna mění své přenosové vlastnosti, jednak v průběhu ozařování, a také v čase po ozařování, kdy dochází u optických vláken k částečné regeneraci. V práci je uvedeno měření vlastností optických vláken křemenných s různými geometrickými průměry jádra, jak jednovidových (rozměr jádra vláken 9 μm), tak mnohavidových rozměrů jádra vláken 50 nebo 62,5 μm . Také se zabývá měřením optických vláken s nestandardními průměry jader 105 μm . Měřeny byly také experimentální vzorky optických kabelů s označením CTDS a CTFS, kde žíly byly tvořeny jednovidovými i mnohavidovými vláknovými vlnovody.

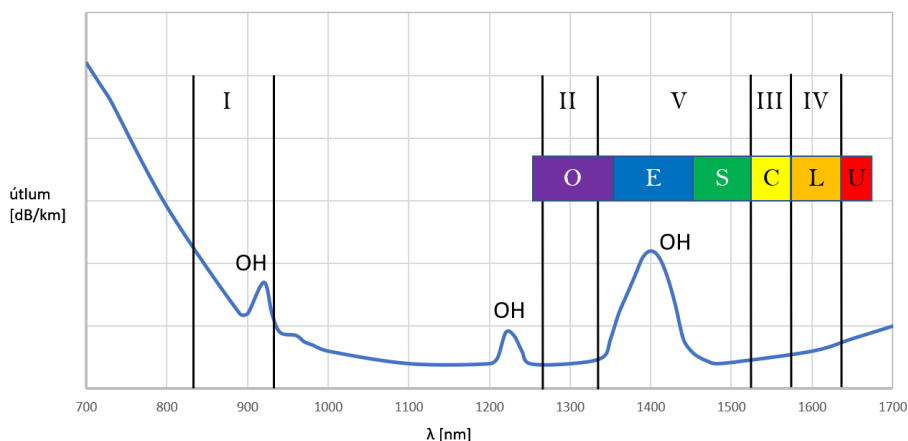
Diplomová práce také popisuje měření optických vláken s dotací erbia, které jsou využívána v optických zesilovačích. Byly studovány parametry těchto vláken po ozařování a také byla studována změna jejich vlastností po gama ozařování. Na těchto vláknech byl zkoumán také jev zvaný jako photbleaching, nebo-li foto-bělení, který je vyvolán při aplikaci optického výkonu při průchodu ozářeným optickým vláknem, a způsobuje rychlejší obnovu.

2 Optické vláknové vlnovody

Optické vláknové vlnovody jsou v komunikační technice nenahraditelným prvkem. Tyto prvky jsou schopny přenosu optických signálů na desítky kilometrů a zdokonalují přenos od elektrických a elektromagnetických komunikačních prvků, z důvodů menšího ovlivnění elektromagnetickým rušením a lepších přenosových vlastností. Optická vlákna jsou tvořena dielektrickým prostředím, které je principiálně děleno na dvě základní funkční prostředí, jádro a plášť optického vlákna. Tyto dvě prostředí se liší hodnotou indexu lomu, kde jádro optického vlnovodu musí mít vyšší index lomu, než plášť vláknového vlnovodu. Díky tomuto rozdílu nastane na rozhraní těchto dvou prostředí totální odraz a optický signál se tak udrží uvnitř vláknového vlnovodu [2].

Nejrozšířenějším typem optických vláken jsou vlákna skleněná, kdy je použito křemene (SiO_2) jako základního dielektrického materiálu. Existují však i další materiály například plasty, kterými jsou optická vlákna tvořena (tyto vlákna jsou označována jako POF-Plastic Optical Fiber). Plastová vlákna se více využívají pro aplikace optického signálu na kratších vzdálenostech do stovek metrů. Použité materiály pro optické vlákna souvisí i s aktivním pásmem, kde optické vlákno dokáže signál neefektivněji přenést a čistota materiálu ovlivňuje jeho optický útlum a disperzi [2], [3].

V prostředí optického vlákna vznikají rozptyly a absorpce v důsledku nedokonalostí optického vlákna a nebo jiných fyzikálních jevů (Rayleigha a rozptyl v infračerveném spektru). Jedním z hlavních příčin útlumu je také výskyt atomů jiných prvků, nejčastěji molekul OH, ale i germania a železa. Tyto molekuly působí na útlum pouze v částech spektra, takže útlum optického vlákna mění svůj útlum v závislosti na vlnové délce. Spektrální charakteristika nej-používanějšího křemenného optického vlákna je znázorněná na obrázku 1, pro každý materiál optického vlákna se toto spektrum liší [2], [4].



Obrázek 1: Spektrum útlumu optických vláknových vlnovodů SiO_2 [2], [4].

Díky tomuto nekonstantnímu útlumu ve vlnovém spektru byly definovány i optická přenosová okna, kde je komunikace realizována. Tyto optická okna mají číselné (I, II, III, IV, V), ale i písmenné označení (O, E, S, C, L, U). Označení je také znázorněno na obrázku 1, kde je okno I na vlnových délkách okolo 850 nm a toto okno je využíváno pro mnohavidové aplikace, které využívají také vlnové délky 1300 v II. přenosovém okně, které leží mezi vlnovými délkami 1280 a 1335 nm. Toto okno je využíváno i pro jednovidové aplikace, a to konkrétně na vlnové délce 1310 nm [2].

Hlavním přenosovým oknem, které je pro optické komunikace v dnešní době nejvíce využíváno, je III. optické okno, nacházející se na vlnových délkách 1530 až 1560 nm. V tomto okně a především na vlnové délce 1550 nm, která je nejvíce využívána, pracuje také optický vláknový zesilovač, využívající erbiem dotovaná vlákna [9].

IV. přenosové okno je položeno nejvýš, když pokrývá vlnové délky od 1565 nm, a navazuje tak na okno III, až po vlnovou délku 1625 nm. Z tohoto optického přenosového okna se začíná využívat vlnová délka 1625 nm, a která byla zkoumána při měření jednovidových vláken. Postupným vývojem a konstrukčním zdokonalováním optických vláknových vlnodů v oblasti potlačování významu iontů OH a jejich velikosti absorpce, se definovalo také V. přenosové okno. Toto okno pak pokrývá vlnové délky mezi přenosovými okny II a III, to znamená, že se nachází na vlnových délkách mezi 1335 a 1530 nm [9].

Také je standardizováno značení písmenné, které je uvedeno na obrázku 1. Okna jsou definována písmeny O (Original) a okno se nachází na vlnových délkách od 1260 až po 1360 nm, pásmo E (Extended) navazuje na předchozí pásmo a prodlužuje jej až do vlnové délky 1460 nm. Následuje vlákno S (Short), které je mezi vlnovými délkami 1460 a 1530 nm. Pásmu C (Conventional) pokrývá stejné vlnové délky, jako III. přenosové okno a je tedy na vlnových délkách 1530 až 1565 nm a sousedí s pásmem L (Long), které na něj přímo navazuje a pokrývá vlnové délky od 1565 nm až po 1625 nm. Posledním pásmem je pásmo U (Ultra-long), které se nachází nad vlnovou délkou 1625 nm.

Vlákna jsou konstruována v zavedených standardech, které se týkají přenosových vlastností optických vláken. Optické vláknové vlnovody jsou rozděleny do dvou skupin podle způsobu vedení optického signálu. Optická vlákna jsou rozdělena na jednovidová a vícevidová optická vlákna. Vícevidová vlákna následně lze rozdělit podle dvou způsobů, jakými je tvořeno jádro. Jedná se o vícevidová vlákna dělena na vlákna se skokovou změnou indexu lomu (SI-Step Index) a s gradientní změnou indexu lomu (GRIN- Gradient Index), kde se index lomu mezi jádrem a pláštěm mění plynule. Procházející optický signál se tak neodráží přímo od rozhraní jádro-plášť, ale dochází k postupným ohybům tak, aby zůstal v jádru optického vlnovodu [1].

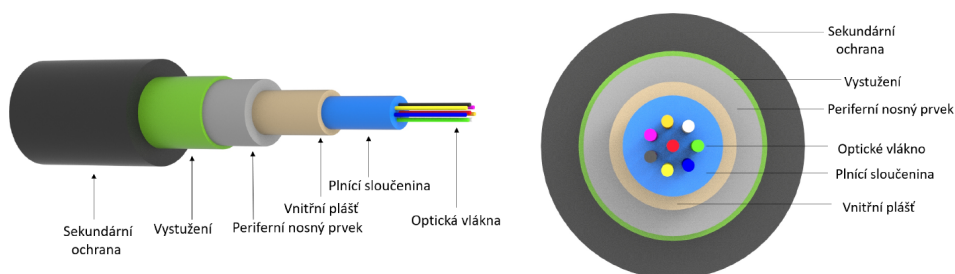
Jednovidová vlákna již z principu mají jádro velice malé s průměrem v řádech mikrometrů. Standardně je konstruováno vlákno o průměru jádra 8-9 μm . Dnes se pro tyto vlákna používá také parametr MFD (Mode Field Diameter - průměr vidového pole), které určuje rozměr optického svazku pro danou pracovní vlnovou délku a existují i vlákna s parametrem MFD 4-5 μm , pro pracovní vlnovou délku 1550 nm. Vícevidová vlákna oproti tomu mají řádově širší oblast jádra optického vlákna, kde se standardně jedná o průměry 50 a 62,5 μm . Jsou používána a konstruována optická vlákna i s nestandardním průměrem jádra vlnovodu, tyto vlákna byla použita i při experimentech popsaných v této diplomové práci. Zde byly použity vlákna s průměrem jádra 105 μm se skokovou změnou indexu lomu, které je určeno pro technologii PoF (Power over Fiber) [2], [5].

Jak již bylo zmíněno, parametry optických vláken se řídí zavedenými standardy. Tyto standardy se vývojem a zlepšováním parametrů hlavně v oblasti potlačování vlivu iontů OH a zlepšování přenosových vlastností měnily. Pro optická vlákna vícevidová se jedná standardy OM1, OM2 až OM5, pro jednovidová jsou zavedeny standardy OS1 a OS2. Mezi standardy vláken vícevidových, a tedy mezi standardy OM se jedná o změny jednak v dosahovaných parametrech přenosových rychlostí, tak ale i změny v průměrech jader optických vláken. OM1 mají jádro o průměru 62,5 μm a ostatní standardy OM2 až OM5 mají jádro s průměrem 50 μm . Plášť běžných optických vláken má rozměr 125 μm [2], [6].

3 Optické kabely CTDS a CTFS

Optické kabely CTDS s technickým označením CTDS (OPK-O-CTDS-8(1x3,0)LTGXP-SPC-BK) a CTFS (OPK-O-CTFS-8(1x3,0)LTGXP-SPC-BK) jsou experimentální kabely vyrobené firmou OPTOKON Kable Co., Ltd., s.r.o. a byly vyrobeny za účelem zjištění vlivů gama záření na optické kabely. Kabely obou druhů byly vyrobeny v celkové délce 400 m a následně rozděleny na kabely o 100 m úsecích. Každý úsek sloužil k různému druhu experimentu [1].

Struktura obou kabelů je znázorněná na obrázku 2, kde je znázorněno 8 různých optických vláken, které obsahuje jak kabel CTDS, tak kabel CTFS. Tyto vlákna jsou obklopena v plnicí sloučenině, která se vyskytuje a je obklopena vnitřním pláštěm. Okolo vnitřního pláště je periferní nosný prvek, který udržuje strukturu kabelu s optickými vlákny. Tato vrstva je vyztužená, a nakonec obalena sekundární ochranou. Kabely CTDS a CTFS se liší postupem výroby, kdy okolí optických vláken u CTFS kabelu je vyplněno gelem [1].



Obrázek 2: Struktura kabelu CTDS [1].

Oba druhy kabelů (jak CTDS, tak CTFS) obsahují 8 žil, 3 žíly jsou vlákna více vidová a 5 žil jsou vlákna jednovidová. Tyto žíly jsou označeny písmeny od A po H. Žíly A, B a C jsou vícevidová vlákna, která jsou zakončena konektory typu ST/PC, tedy s rovným zakončením. Žíla A má průměr jádra vlákna $50 \mu\text{m}$ (optická vlákna standardu OM2), žíla B pak má nestandardní průměr jádra vlákna $200 \mu\text{m}$. Žíla C je ve standardu OM1 s průměrem jádra optického vlákna $62,5 \mu\text{m}$. Žíly D až H jsou jednovidová vlákna zakončená sešikmenými optickými konektory typu FC/APC. Všechna tato vlákna mají průměr jádra vlákna $9 \mu\text{m}$ a plášť o průměru $125 \mu\text{m}$. Seznam použitých vláken v optických kabelech je uveden v Tabulce 1 [1].

Tabulka 1: Popis použitých vláken v kabelech CTDS a CTFS [1].

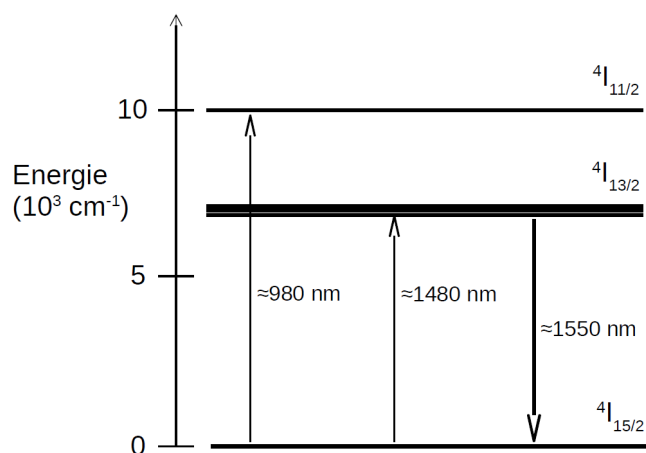
Žíla	Geom. rozměry [μm] (jádro/plášť/prim. ochrana)	SM/MM	Typ vlákna	Typ konektoru
A	50/125/250	MM	BW200/200	ST/PC
B	200/220/400	MM	Low-OH	ST/PC
C	62,5/125/250	MM	OM1C	ST/PC
D	9/125/250	SM	Radiation Hard	FC/APC
E	9/125/250	SM	2015/169-B	FC/APC
F	9/125/250	SM	G.657.A1	FC/APC
G	9/125/250	SM	G.652.D/G.657.A1	FC/APC
H	9/125/250	SM	G.652.D	FC/APC

4 Erbium dotovaná optická vlákna

Křemenná optická vlákna jsou dotována jinými prvky pro dosažení kontrastu indexu lomu jádra a pláště vlnovodu. Dotace však také může zajišťovat jiné funkce optického vlákna. V optické vláknové technice se využívá dotace vzácnými zeminami erbia, yterbia, či praseodynia, ale i dalších prvků, kde touto dotací lze zajistit translaci výkonu ze napájecího zdroje na vstupní signál a lze tímto vyvolat optické zesílení vstupního signálu. Různé prvky dotace pak pracují se signály na různých vlnových délkách vstupního signálu [7].

Erbium dotované optické vlákno v konfiguraci optického vláknového zesilovače (EDFA-Erbium Doped Fiber Amplifier, Erbium dotovaný vláknový zesilovač) dokáže operovat v oblasti komunikačního pásma C, na vlnových délkách přibližně od 1530 do 1565 nm. Na těchto vlnových délkách mají křemenná optická vlákna nejnižší útlum a proto jsou tyto erbiem dotovaná vlákna standardně využívána pro optické zesilovače v telekomunikačních optických sítích. Na rozdíl od prvku yterbia, který je používán pro dataci optických materiálů, pro luminiscenci na vlnových délkách okolo 1030 nm a je využíván pro jiné aplikace. Yterbium se však využívá také v EDFA zesilovačích, a to jako ko-aktivátor do erbiem dotovaného vláknového pro zvýšení účinnosti zesílení signálu [8].

Princip materiálů s dotací erbia je založena na práci ve dvou režimech. Absorpce energie z optického záření a emise fotonů, která probíhá spontánně, a nebo ji stimulujeme pomocí vstupního optického signálu. Při absorpci dochází k využití energie optického záření k excitaci elektronů v atomu erbia a v důsledku této excitace jsou přesunuty elektrony v erbiu na vyšší energetické hladiny. Jev absorbování optické energie je uskutečněn jen při aplikaci takových vlnových délek, které energeticky odpovídají rozdílu energie mezi energetickými hladinami atomu erbia. Jedná se o vlnové délky 980 nm a okolo 1480 nm. Energetické přechody mezi hladinami jsou znázorněny na obrázku 3 [2], [9].



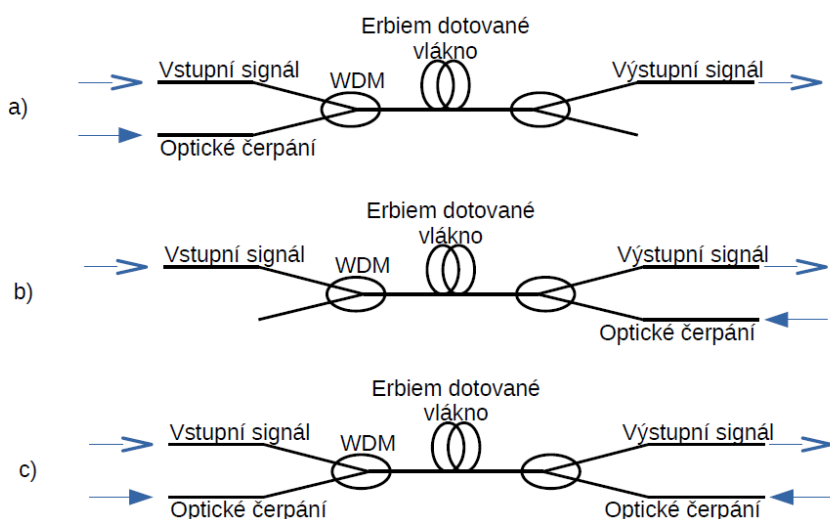
Obrázek 3: Energetické hladiny atomů erbia [2], [9].

Z obrázku 3 je také patrný rozdíl mezi absorpcí optického signálu na vlnové délce 980 nm a 1480 nm. Energie signálu na vlnové délce 1480 nm dokáže excitovat elektrony pouze na energetickou hladinu $4I_{13/2}$, zatímco energie signálu na vlnové délce 980 nm dostane elektrony až na hladinu $4I_{11/2}$. Na této hladině se excitované elektrony dokáží udržet pouze několik málo mikrosekund (okolo 7 μs) a posléze přechází na hladinu $4I_{13/2}$, přičemž energie vyzařované z tohoto přechodu není formou optického záření [9].

Mezi hladinami ${}^4I_{13/2}$ a ${}^4I_{15/2}$ dochází při, zpětném přechodu atomu na původní energetickou hladinu k vyzáření energie. Tato energie je vyzářena v podobě fotonů a optického záření, jehož vlnová délka je okolo vlnové délky 1530 nm. K emisi může docházet spontánně, kdy elektron přejde na nižší energetickou hladinu po určité době samovolně, nebo jev lze vybudit vnějším vlivem a pak se jedná o stimulovanou emisi. Stimulace je dosažena pomocí optického záření, které s atomem erbia dokáže interagovat. V tomto případě se jedná o světlo na vlnové délce okolo 1530 nm. Výsledkem stimulované emise je vyzáření fotonu, který má parametry vlnové délky a fáze stejné, jako foton, který tuto emisi vyvolal a tedy dochází zde k zesílení optického signálu, který byl spouštěcím prvkem emise.

Dotované optické vlákno využívá erbiem dotovaný vláknový zesilovač pro svou činnost, kde využívá zdroj výkonového světelného záření pro čerpání energie do optického vlákna, a vstupní optický signál, který přenáší data optickou komunikační linkou a je třeba jej zesílit. Vstupní signál, se kterým EDFA operuje nejčastěji, je světlo o vlnové délce 1550 nm a pro čerpací signál je využito vlnových délek právě 980 nm, a nebo 1480 nm, aby byla energie z tohoto signálu absorbována do optického vlákna. Volba vlnové délky pro optické čerpání do vláknového zesilovače tvoří v úrovni zesílení rozdíl i v případě, kdy je použito stejného výkonu z čerpacích laserů. Díky větší neefektivitě čerpání na vlnové délce 980 nm, je výsledné zesílení celého zesilovače menší než při použití čerpání na vlnové délce 1480 nm [8].

Čerpací výkonový signál je zaveden do dotovaného optického vlákna pomocí vlnového multiplexu WDM (Wavelength Division Multiplex) společně s vstupním signálem a konfigurace zapojení pro zesilovač může být realizována třemi různými způsoby, jak je uvedeno na obrázku 4. Zavedení je možné ze strany vstupu datového signálu dopřednou metodou (obrázek 4a), nebo zpětnou metodou ze strany výstupního signálu (obrázek 4b), tedy proti směru vstupního signálu. Také je možné realizovat kombinaci obou výše uvedených metod, kdy je zaveden výkonový signál z obou směrů do optického vlákna s dotací erbia (obrázek 4c), této metodě se říká obousměrná. Každá metoda pak vykazuje v parametrech zesílení a šumu odlišné vlastnosti [2].



Obrázek 4: Metody čerpání pro erbiem dotované vláknové zesilovače EDFA. a) dopředné čerpání, b) zpětné čerpání a c) obousměrné čerpání [2].

Dopředná metoda dokáže ze všech možností nejméně zesilovat, její výhodou je naopak nejmenší šum. Zpětnou metodou je velikost zesílení vyšší, než u dopředné metody při použití stejných výkonů čerpání i vstupního signálu. Ovšem šum, vyplývající ze spontánní emise, která je následně díky lavinovému jevu zesilována, je vyšší než u předešlé metody. Největší hodnotu zesílení lze dostat z obousměrné metody. Ovšem při použití čerpání z obou konců optického vlákna je nejvíce ovlivněn faktorem šumu [2].

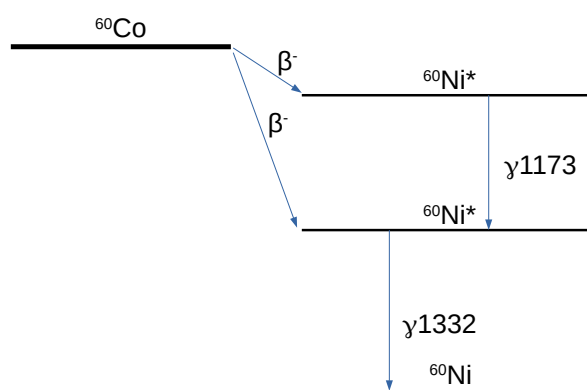
Hlavním vlivem na zesílení optického erbiem dotovaného vláknového zesilovače je hustota dotace iontů erbia v optickém vlákne, kdy se zvyšující se dotací je schopnost absorpce a následné emise vyšší a zesílení se tedy zvyšuje. Stejná závislost platí pro délku dotovaného optického vlákna, kde delší vlákno dokáže zajistit vyšší zesílení. Použití jednoho výkonu může, při narůstající délce vlákna a nebo při příliš velké dotaci, dojít k saturaci a s další narůstající délkou nebo velikostí dotace dochází k opačnému efektu, kdy zesílení začne s narůstající délkou, nebo narůstající koncentrací dotace klesat při stejném výkonu a metodě čerpání [7].

5 Gama ozařování

Gama záření je jedním z produktů nukleárního rozkladu, který dochází u těžších částic. Vedle částic alfa a beta, gama částice je ve formě elektromagnetických vln, která jsou vyzařovány do okolí. Tyto vlny jsou způsobeny spontánní emisí z excitovaného rozkládajícího se atomu produktu štěpení. To znamená, že když dojde k štěpení, dojde nejprve k odtržení protonů jádra (alfa částice), následně k elektronovému odtržení ve formě beta částice, ze štěpeného materiálu pak následně vznikne excitovaný atom, který svou emisí vyzáří gama záření.

Pro ozařování použité v těchto experimentech byl použit radionuklid kobalt ^{60}Co tento radionuklid se vyznačuje tím, že při nukleárním procesu vyzařují pouze částice beta a gama záření, nikoliv však alfa. Poločas rozpadu je pro tento prvek 5,27 let [1].

Radionuklid ^{60}Co prochází procesem nukleárního rozkladu, kdy nejprve dochází k štěpení elektronů od jádra kobaltu. Výsledkem tohoto procesu je produkt excitovaného Niklu ^{60}Ni a také beta záření. Následně dochází k spontánní emisí přebytečné energie z excitovaného atomu do okolí v podobě elektromagnetické vlny gama záření. Celý proces v podání energetické přeměny je znázorněn na Obrázku 5 .



Obrázek 5: Znázorněná produkce gama záření energetickými hladinami [10].

Na obrázku 5 je znázorněno, že po rozkladu a produkci beta (β) záření, ocitnou se elektrony excitovaného niklu ve dvou možných energetických hladinách. Následně je vyzářena energie z gama záření (γ) o velikosti 1,173, nebo 1,332 MeV, závislosti na energetických hladinách, mezi kterými se přechod uskutečnil. Tato energie pak může ovlivnit objekty, tomuto záření vystavené. Přebytečná energie však není natolik velká, aby docházelo k pozdějším nukleárním rozpadům [1], [10].

Pro hodnotu gama záření je pak dále v diplomové práci uváděn parametr obdržené dávky záření. Tento parametr je uváděn jednotce Gray (Gy) a jedná se o základní jednotku SI soustavy, vyjadřující energii záření, kterou vystavený prvek na svojí hmotnost obdržel. Samotný parametr pak dostaneme podle rovnice [1]:

$$D = \frac{E}{m}, \quad (1)$$

Kde D je dávka ozáření v Gy, E je energie záření v [J] a m je hmotnost exponovaného vzorku v [kg].

5.1 Vliv gama záření na optická vlákna

Vysokoenergetické gama záření, které vychází z nukleárního rozpadu, a které působí na materiál optických vláken, ovlivňuje také parametry těchto vláken. Zejména pak jeho optický útlum. Tomuto ovlivnění dochází pomocí třech možných fyzikálních jevů, Comptonova, fotoelektrického jevu a samotného elektromagnetického záření. Tyto jevy ovlivňují vystavený objekt současně [1].

K ovlivnění dochází pomocí Comptonova jevu, kde dochází pomocí fotonů elektromagnetického záření, k interakci s atomy materiálu vlákna a předání energie. Při ztrátě energie elektromagnetické záření prodlouží svou vlnovou délku. Elektron je při této interakci vyvázan z atomu mřížky. Fotoelektrický jev naopak energii gama záření absorbuje do atomu. Absorpce a přebytečná energie následně způsobí vyvázaní elektronů z vazby atomu. Tento způsob je zpravidla nejméně energetický. Třetí možností je tvorba párů elektron-pozitron, kdy dochází předání energie do elektronového obalu a ta vede k ionizaci. Velikost působení závisí na vlnové délce a na velikosti atomu, tedy jeho protonového čísla [1], [12].

Pomocí předání energie dochází k poruchám v krystalické struktuře a ionizaci materiálu optických vláken a energie se projeví navázáním ionizovaných elektronů na mřížku optického vlákna a vznikají tak poruchy v mřížce, díky kterým pak dochází k "tmavnutí" vlákn. Toto tmavnutí je položeno v určitém místě barevného spektra a zvyšuje tam optický útlum vystaveného optického vlákna. Tento optický útlum vlákna nevykazuje svůj útlum na konkrétní vlnové délce, ale působí na širší světelné pásmo přenášeného světla optickým vláknem. Při vyšší dávce může nastat také totální oslepení, kdy neprojde optickým vláknem žádný signál, díky nadměrnému optickému útlumu vlivem rozptylů od vyvolaných poruch [1].

Proces tmavnutí optického vlákna znamená zvyšování optický útlum, který narůstá vlivem gama záření. Tento nárůst optického útlumu je vyjádřen takzvaným parametrem RIA (Radiation Induced Attenuation - Radiací vyvolaný útlum), který je definován vztahem [11]:

$$RIA(\lambda) = (\alpha_{0Gy}(\lambda) - \alpha_{davka}(\lambda))/L, \quad (2)$$

kde RIA je udávána v jednotkách $[dB/m]$, α_{0Gy} je optický útlum vlákna před ozáření v jednotkách $[dB]$, α_{davka} je útlum vlákna po ozáření, také v $[dB]$ a L je délka vlákna v $[m]$. Parametr RIA vyjadřuje rozdíl v útlumu před a po obdržení dané dávky ozáření převedenou na jednotku délky optického vláknového vlnovodu. Tento vliv a změna optického útlumu je ve spektru nekonstantní. Proto parametr RIA je počítán pro každou vlnovou délku zvlášť.

Ve fázi po ozařování gama zářením dochází ke stavu, který se nazývá relaxace optického vlákna. Při této relaxaci dochází k postupnému snižování optického útlumu, který je způsoben gama zářením. Tento proces se děje přirozeně v průběhu času po obdržení gama záření. Tento útlum však neklesne na původní hladinu útlumu, které vlákno mělo před vystavením ozáření, ale dojde pouze k částečnému snížení optického útlumu a ustálení [13].

5.2 Ozařovny ROZA a PANOZA

Pro ozařování prvků byly využity ozařovací komory, které byly poskytnuty pracovníky ÚJV Řež a.s. zde jsou k dispozici tři ozařovací komory pro rychlé i dlouhé ozařování. Tyto komory nesou označení ROZA, PANOZA a PRAZDROJ. Každá z komor obsahuje jinak výkonné zdroje gama záření a slouží k různě rychlým ozařovacím procesům. Pro experimenty v této diplomové práci byly použity pouze dvě ozařovací komory, a to ROZA a PANOZA.

Ozařovna ROZA

Ozařovna ROZA slouží k rychlému ozařování vložených vzorků. Ozařování je prováděno pomocí kobaltového zářiče ^{60}Co s aktivitou přibližně 500 TBq v době přebití, tedy v době, kdy byl zářič instalován. Celý zářič je uchován v kvádřovém kontejneru o rozměrech 120x120x50 cm. Tento zářič je zachycen na obrázku 6 na pravé straně, kde je na levé straně vyobrazena i ozařovací komora studnového typu o průměru 100 cm a hloubce 300 cm, do které je zářič, pro účel ozáření, nasunut pomocí elektromotoru [1].



Obrázek 6: Fotografie ozařovny ROZA.

Vzorky byly při ozařování umístěny do studnové ozařovny a připevněny na kovový štít v určité vzdálenosti od samotného zářiče, která upravuje dávkový příkon gama záření aplikovaný na vzorky. Ozařovna disponuje také průchodkami, kterými může být zavedeno spojovací optické vlákno do ozařovací komory a mohou být měřeny ozařované vzorky přístroji mimo prostředí ozáření. Toto řešení umožňuje měřit optická vlákna během ozařovacího procesu. [1].

Ozařovna PANOZA

PANOZA je panoramatická ozařovna určená pro pomalé, a nebo dlouhodobé ozařování. Kobaltový zářič zde září aktivitou přibližně 100 TBq, ve dni přebití. Samotný tyčový zdroj záření je umístěn v kontejneru z nerezové oceli, jejíž rozměr je 98 cm v průměru a 1,23 m na výšku a je manuálně vysouván pomocí tažného lanka. Celá ozařovna PANOZA, kde je tento zářič umístěn je v půdorysu velký 3x3 m. Fotografie ozařovny PANOZA je znázorněná na obrázku 7 [1].



Obrázek 7: Fotografie ozařovny PANOZA [1].

5.3 Efekt Foto-bělení

K relaxaci optického vlákna po obdržení dávky gama záření dochází přirozeně. Tento proces však může být ovlivněn, a nebo "řízen" vnějšími vlivy. Jedním z těchto vlivů, může být také světlo, které dokáže urychlit a zlepšit vlastnosti optických vláknových vlnodů ve snížení útlumu. Využití optického signálu pro zlepšení útlumu po gama záření se nazývá photobleaching, neboli foto-bělení [13].

Optický paprsek, který je připojený do ozářeného optického vlákna, působí na materiál optického vlákna a ovlivnění vyvolá efekt, působící proti jevům vyvolaným gama ozářením, kde síla ovlivnění závisí na výkonu zavedeného světla. Při aplikování tohoto optického výkonového záření do vlákna, dochází k umocnění jevu relaxace vlákna a ozářené vlákno má potenciál relaxovat na hodnoty menších útlumů, než vlákno, u kterého dochází k relaxaci přirozeně. Také je, díky zavedení vnějšího výkonového světla, proces relaxace urychlen. Síla efektu foto-bělení pak závisí především na velikosti optického výkonu, který optickým vláknem prochází. Ovšem také závisí na délce intervalu, po který je tento výkon do vlákna připojen [13].

Pro měření v experimentech, popsaných v této práci byl jev foto-bělení studován na vláknech s dotací erbia. Na tomto vlákně proces ozáření a relaxace je stejného charakteru, jako u vláken křemenných. Vlákna s dotací erbia se nejvíce používá v optických zesilovačích (popsáno v kapitole 4), kde je využíván jako čerpací signál, neboli zdroj energie, výkonový laser na vlnových délkách 980 nm, nebo 1480 nm. Tento výkonový signál pak může sloužit i jako zdroj pro vyvolání bělicího procesu.

Provedené experimenty, které jsou popsány v této diplomové práci, vycházely z experimentu popsané panem Aubrym ([13]). Tyto experimenty byly zaměřeny na studium efektu foto-bělení pro erbiem dotovaná vlákna vystavená ozáření 17,0 kRad, které znamená hodnotu vystavené dávky gama odpovídající 170 Gy. Této dávky bylo dosaženo za 8 h ozařování.

Při tomto experimentu bylo využito vláken erbiem dotovaných o délce 26,5 m, do kterého bylo připojeno světlo o vlnové délce 975 nm a výkonu 150 mW. Foto-bělení zde probíhalo v době při ozařování ve dvou módech, stále zapnutý výkonový laser a občasné zapnutí laser s výkonem 150 mW, kdy byl laser zapnut 10% času ozařování. Také byl ozařován jeden vzorek, který nebyl ovlivněn. V době při relaxaci po ozáření byl, při všech variantách měření, čerpací laser zapnut a měření zesílení bylo měřené kontinuálně [13].

Změřená data následně ukázala odlišnost ve velikosti zesílení v době těsně po ozařování, kdy zesílení neovlivněného vlákna kleslo díky gama ozáření o 70 dB, zatímco vlákno ovlivněné po celou dobu ozařování ztratilo hodnotu zesílení jen o 20 dB. Prostředím možnost, kdy bylo erbiem dotované vlákno ovlivněné 10% času ozařování bylo reagovalo na gama ozařování poklesem zesílení přibližně o 40 dB [13].

6 Použité přístroje a vybavení

Při experimentech, popsáných v této diplomové práci, byly použity přístroje a komponenty k měření optického útlumu a zesílení optických vláken. Tyto přístroje jsou popsány zde v této kapitole. Při měření optického útlumu byly také měřeny spektrální charakteristiky pomocí spektrálního analyzátoru. Měření probíhalo v laboratoři PLANIO - Laboratoř planárních optoelektronických a optických integrovaných struktur na Kateřde mikroelektroniky, Fakulty elektrotechnické, ČVUT v Praze. Experimenty gama ozařování probíhaly na oddělení Radiační chemie a kvalifikace na prostředí na pracovišti ÚJV Řež, a.s.

6.1 Optické zdroje záření

Pro zdroje optického záření byly využity převážně laserové zdroje pracující na potřebných pracovních vlnových délkách, kterými byly vlnové délky pro optické čerpání erbiem dotovaných vláken. Jednalo se o zdroje s vlnovými délkami 980 a 1480 nm. Při měření erbiem dotovaného vlákna byl také použit laser pracující na vlnové délce 1550 nm, který simuloval zesilovaný vstupní optický signál. Pro tento signál byl využit signál z modulu I.D.I.L., který je popsán níže. Pro zdroj optického záření pro spektrální analyzátor YOKOGAWA však bylo nutné využít zdroj s širší spektrální oblastí působení, aby bylo možné měřit na více vlnových délkách.

Laserový zdroj OFLS-6

Jedním z použitých laserů byl přístroj OFLS-6, který byl využit jako zdroj výkonového záření na vlnové délce 980 nm. Tento laser od firmy Safibra, s.r.o. umožňuje přepínat mezi třemi režimy P2, P1 a P0, kdy tyto režimy slouží k nastavení výstupního optického výkonu. Maximální výstupní výkon zdroje je 171 mW. Tyto přednastavené výstupní optické výkony je možné nastavit v softwaru připojeného počítače. Na tomto přístroji byly přednastavené výkony o hodnotách 12 mW pro P2, 68 mW pro P1 a 138 mW pro P0. K přístroji bylo možné připojit optické vlákno s konektorem typu FC/PC [14].

Laser PL-FP-1480-1-A81-PA

Jako čerpací laser pracující na vlnové délce 1480 nm pro konfiguraci měření dotovaného optického vlákna jako optického zesilovače byl použit výkonový laser PL-FP-1480-1-A81-PA. Tento laser dokáže dosáhnout výstupního výkonu až 400 mW a výstupní optický výkon je možné nastavit pomocí programu V-Drive v připojeném počítači. Tento program pak dokáže nastavit různé pracovní výstupní výkony laseru a nebo teplotu laseru. Laser je připojen na optické vlákno pomocí konektoru typu FC/APC [15].

Širokopásmový zdroj Thorlabs SLS201L/M

Zdroj optického světla Thorlabs SLS201L/M byl použit k měření spektrálních charakteristik na optickém spektrálním analyzátoru YOKOGAWA, jehož parametry jsou popsány níže. Tento zdroj operuje v širokém vlnovém spektru od vlnové délky 360 nm až po vlnovou délku 2600 nm. Celkový výkon optického záření na výstupu zdroje světla je od 10 mW [16].

Hlavice s konektorem je u tohoto přístroje vyměnitelná a je zde možnost připojení pomocí třech konektorů FC/PC, SMA, ST/PC. Pro experimenty, popsané v této diplomové práci byl použit konektor typu FC/PC. Tento konektor je především používán pro vlákna mnohavidová, ale v mém případě byl tento typ konektoru použit i pro měření jednovidových vláken [16].

6.2 Měření optického výkonu

Pro manuální měření optického výkonu jsem používal měřicí konzoly PM100D THORLABS, kterou jsou připojovány k měřicímu senzoru S155C a S415C.

Měřicí konzole PM100D

Pro senzory Thorlabs S415C a S155C byla použita měřicí konzole PM100D, který přijímala vstupní data od detektorů přes komunikační sběrnici RS484. Optický výkon je zobrazován na 4 palcové LCD obrazovce [19].

Senzor Thorlabs S155C

Optický senzor Thorlabs S155C je polovodičový InGaAs detektor, pracující v rozsahu vlnových délek 700 nm až 1800 nm pro výkony od 1 nW do 20 mW. Tento detektor pouze převádí vstupní optický výkon na elektrickou veličinu napětí. Tato hodnota je následně vyhodnocena v měřicí konzole, kde je hodnota měřeného optického výkonu zobrazována na displeji [17].

Tento detektor byl využit při určení převodní konstanty detektoru v modulu I.D.I.L. pro výpočet optického zesílení. Také byl využit pro nastavení vstupního signálu na vlnové délce 1550 nm pro měření optického zesílení erbiem dotovaných vláken.

Senzor Thorlabs S415C

Senzor Thorlabs S415C pracuje na stejném principu jako předchozí detektor Thorlabs S155C. Tento detektor dokáže měřit maximálně výkon 10 W na vlnových délkách od 700 nm po 1800 nm. Díky možné absorpci vyšších výkonů byl tento detektor využit při nastavení čerpacího laseru 1480 nm a kontrole výkonu laseru na vlnové délce 980 nm [18].

6.3 Měřicí přístroj optického výkonu OFT-4212

Přístroj OFT-4212 je čtyřkanálový měřicí přístroj optického útlumu, který byl využit při experimentech studujících závislosti optického útlumu v průběhu času. Tento přístroj je ve dvou verzích určený pro jednovláková optická vlákna, a také pro mnohavláková optická vlákna. Pro obě verze je v tomto přístroji jeden výstup pro zabudované lasery s různými vlnovými délkami. Pro měření jednovlákových vláken je přístroj vybaven lasery na vlnových délkách 1310, 1490, 1550 a 1625 nm. Pro měření vláken vícevlákových je využita verze přístroje s lasery na vlnových délkách 850 a 1300 nm. (V průběhu řešení diplomové práce byl přístroj ještě doplněn o třetí laser pracující na vlnové délce 980 nm) [21].

Výkony laserů zabudovaných v přístrojích jsou různé měření jednovlákových a vícevlákových optických vláken. Při konfiguraci pro jednovláková vlákna je výstupní optický výkon 0 dBm a pro konfiguraci měření mnohavlákových optických vláken je výstupní výkon z laserů -5 dBm [21].

Samotný přístroj má čtyři kanály optických detektorů InGaAs, které snímají optický výkon. Tyto detektory dokáží měřit výkon v rozsahu od -60 dBm do +10 dBm. Přístroj obsahuje také mód měření optického útlumu, který lze měřit po provedení kalibrace. Po připojení řídicího počítače, který obsahuje software OPM, který komunikuje s tímto přístrojem a hodnoty optického výkonu, či optického útlumu odesílány do připojeného počítače. Program v řídicím počítači nastavuje, které vlnové délky budou měřeny a také intervaly, ve kterých je hodnota útlumu, nebo výkonu měřena a uložena do paměti řídicího počítače [21].

Optický přístroj je s měřenými optickými vlákny spojen konektory, které se liší podle konfigurace přístroje. V konfiguraci pro měření jednovlňových vláken je přístroj OFT-4212 vybaven konektory FC/APC, zatímco pro konfiguraci měření mnohovlňových vláken jsou na přístroji použité univerzální spojky, nebo spojky FC/PC.

6.4 Měřicí přístroj PM800 a optický zdroj LS-800 a OFT-840

Měřicí přístroj PM-800 byl využit pro měření na optických kabelech kvůli nedostatku kanálů na přístroji OFT-4212. Tento ruční měřicí přístroj je určen pro detekci vlnových délek 1310, 1490 a 1550 nm. Tento detektor pracuje, stejně jako přístroj OFT-4212, v rozsahu -60 dBm až +16 dBm, s rozlišením 0,01 dB a přesností do 5%. Hodnoty z tohoto přístroje nebylo možné automaticky ukládat do externího zařízení, ale bylo nutné je manuálně odečítat z LCD obrazovky [22].

Detektor samotný nemá v sobě zabudované optické zdroje neobsahuje, a proto je nutné využít externí zdroje laserového záření. Pro tento účel byly využity optické zdroje LS-800 a OFT-840, které byly určeny pro vlnové délky 1310, 1490 a 1550 nm, detekovatelné přístrojem PM-800. Laser LS-800 operuje pouze na vlnových délkách 1490 a 1550 nm, na kterém vyzařuje optický výkon o velikosti 1 mW. Přístroj OFT-840 je zdroj světla na vlnové délce 1310 nm, který má standardní výstupní optický výkon -2 dBm [23], [24].

Přístroje LS-800 a PM-800 byly spojeny s měřenými optickými vlákny konektory typu FC/PC. Přístroj OFT-840, který sloužil jako optický zdroj na vlnové délce 1310 nm byl spojen s optickými vlákny konektory typu FC/APC.

6.5 Optický spektrální analyzátor YOKOGAWA

Pro měření spektrálních charakteristik optických vláken byl využit optický spektrální analyzátor (OSA-Optical Spectral Analyser) YOKOGAWA AQ6370D. Tento analyzátor detekuje vlnové délky v rozsahu 600 až 1700 nm se selektivitou až 0,02 nm až 2 nm a přesností 0,01 nm. Výkony, které je detektor, použitý v analyzátoru, schopný detekovat se pohybuje v rozsahu -90 dBm až do +20 dBm (rozsah od 1 pW až po 100 mW) [20].

Spektrální analyzátor YOKOGAWA používá InGaAs detektor a difrakční mřížky pro dobrou selektivitu jednotlivých vlnových délek měřeného světla. Výstup z detektoru je zpracován a zobrazen na 10,4 palcové obrazovce a měřená data lze uložit do interní paměti přístroje. Komunikace s přístrojem je realizovatelná pomocí USB portů, pro stažení naměřených dat na externí úložiště. Pro připojení optických vláken na optický vstup analyzátoru a výstupu kalibračního zdroje jsou použity konektory typu FC/PC.

Součástí spektrálního analyzátoru je také kalibrační optický zdroj. Pomocí tohoto zdroje byl vždy před každým měřením přístroj kalibrován na daný typ optického vlákna a byly upraveny výkonové úrovně [20].

6.6 Modul I.D.I.L.

Modul of firmy I.D.I.L slouží jako výukový modul pro studium optických vláknových zesilovačů. Pro experimenty popsané v této diplomové práci byla využita jen část komponentů, zabudovaných v tomto modulu. Pro experiment měření optického zesílení byl využit vestavěný optický zdroj, pracující na vlnové délce 1550 nm, který dosahuje maximálního výkonu 2 mW při konstantním záření. Dále byl využit detektor, tvořený InGaAs fotodiodou, která optický výkon převáděla na elektrické napětí. Také byl použit vestavěný optický izolátor [25].

DFB laserová dioda pracující na vlnové délce je nastavitelná pomocí velikosti elektrického proudu. Velikost proud lze ovládat externě pomocí generátoru. Pro experimenty byl použit generátor obdélníkového signálu který v periodě spínal laser na vlnové délce 1550 nm a amplitudou obdélníkového signálu byl nastaven optický výkon laseru. Při měření byl výstupní elektrický signál z detektoru přiveden pomocí koaxiálního kabelu do osciloskopu. Zde byl elektrický signál zobrazen na obrazovce osciloskopu [25].

6.7 Osciloskop GoldStar

Analogový osciloskop OS-5020 od firmy GoldStar je dvoukanálový osciloskop snímající elektrické napětí až 30 V, s rozlišením pohybující se od 5 mV/dílek až po 5 V/dílek. Tento přístroj dokáže správně zobrazit elektrický signál ve frekvenčním pásmu až do 20 MHz. Z tohoto přístroje byla odečítána amplituda elektrického napětí a převáděna na hodnotu optického výkonu [26].

7 Popis experimentů

Byly zkoumány parametry optických kabelů a také vláken s dotací erbia po vystavení gama záření a jejich závislosti na dávkách, jimiž byly vystaveny. Byly provedeny měření optického útlumu a spektrálních charakteristik, případně zesílení pro optická vlákna s dotací erbia a byly sledovány změny vlivem gama záření.

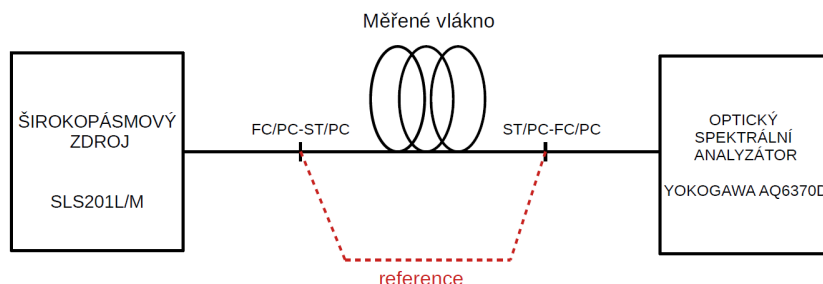
7.1 Měření vlastností optických kabelů CTDS a CTFS

Kabely CTDS a CTFS od firmy OPTOKON Kable Co., Ltd., s.r.o., které byly vyrobeny pro výzkumné účely, byly vystaveny gama záření ve výzkumném ústavu ÚJV Řež, a.s.. Tyto kabely byly vystaveny gama záření po dobu 604 dnů a bylo dosaženo hodnoty absorbované dávky 80,5 kGy, rychlostí ozařování 5,5 Gy/h. Ozáření bylo provedeno v ozařovací komoře PANOZA.

7.1.1 Měření spektrálních charakteristik vláken optických kabelů

Optické kabely CTDS a CTFS byly po vyjmutí z ozařovny PANOZA převezeny do laboratoře PLANIO (Laboratoř planárních optoelektronických a optických integrovaných struktur) na Katedru Mikroelektroniky, FEL, ČVUT v Praze. Zde byly připojeny na spektrální analyzátor YOKOGAWA. Cílem měření na tomto spektrálním analyzátoru bylo změření útlumu v závislosti na vlnové délce.

Měřené vlákna z kabelů byly připojeny na spektrální analyzátor a širokopásmový zdroj světla Thorlabs SLS201L/M pomocí přípojných patchcordů tak, jak je to uvedeno na obrázku 8.



Obrázek 8: Schéma měření spektrálních charakteristik optických vláken pomocí spektrálního analyzátoru YOKOGAWA.

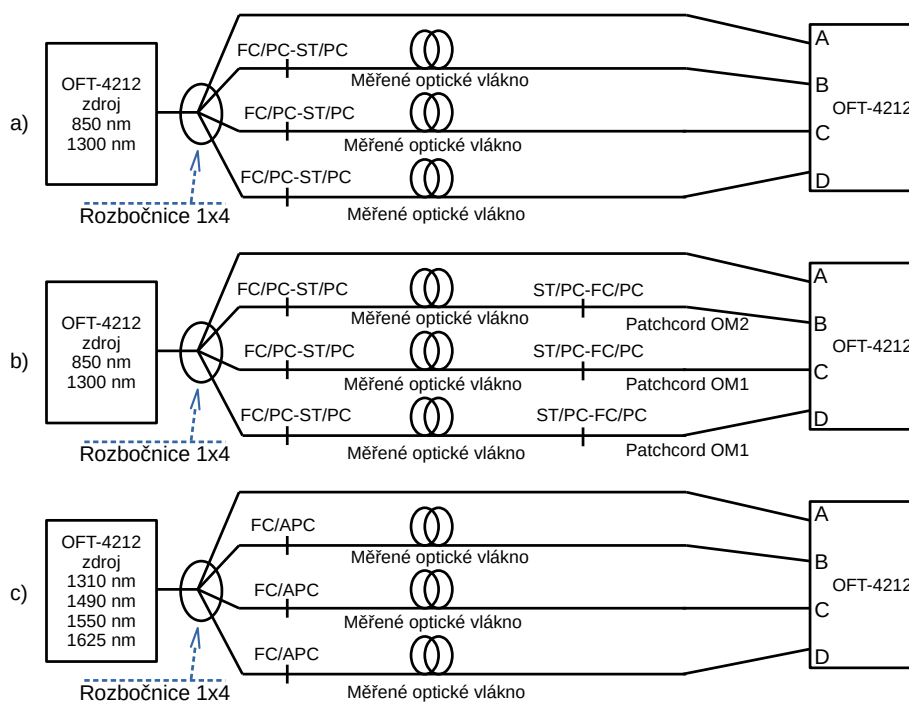
Pro připojovací patchcordy byly zvoleny multimodové vlákna standardů OM1 a OM2 a jednovidová optická vlákna G652. Pro žíly A obou kabelů byly použity vícevidové vlákna standardu OM2, které mají průměr jádra $50 \mu\text{m}$. Pro vlákna žíly B a C, obou kabelů bylo pak použito patchcordů OM1 s průměrem jádra $62,5 \mu\text{m}$, které mají optické kabely v žílech s označením C. Průměr jádra vláken žil B je $200 \mu\text{m}$ a pro tyto žíly byly použity vlákna s největším dostupným průměrem jádra, a tedy $62,5 \mu\text{m}$. Pro jednovidová vlákna (D až H) byly použity jednovidové propojovací vlákna.

Při měření byly přemostěny měřená vlákna kabelů pro získání referenční spektrální charakteristiky (znázorněno na obrázku 8). Následně bylo připojeno i měřené vlákno a provedeno stejné měření na spektrálním analyzátoru. Útlum vláken byl posléze získán po odečtení hodnot naměřeného výkonu vlákna od referenčního měření v jednotlivých bodech spektrální charakteristiky.

7.1.2 Měření optického útlumu vláken optických kabelů

Měření bylo také optický útlum jednotlivých žil kabelů, které jsou popsány v kapitole 3, v průběhu času po gama ozáření. Experiment byl také zaměřen na zjištění optického útlumu, způsobený vystavením gama záření, tedy takzvaný parametr RIA, a následné relaxaci, tedy částečné snížení optického útlumu v průběhu času po gama ozáření. Tyto parametry byly zkoumány pro oba kabely CTDS a CTFS, aby následně bylo možné porovnání vlastností obou kabelů.

Vlákna byla nejprve změřena před vystavením a vložením kabelů do ozařovací komory PANOZA. Útlum optických vláken, umístěných v kabelech byl měřen na přístrojích OFT-4212 (viz kapitola 6). Následně ihned po vystavení dávky a ukončení ozařování byly kabely převezeny do laboratoře PLANIO, kde byla pro měření optického útlumu optických vláken použita měřicí sestava podle schématu znázorněného na obrázku 9.



Obrázek 9: Schéma zapojení CTDS a CTFS kabelů pro měření optického útlumu. Pro a) vlákna více vidová v kabelu CTFS, b) vlákna vícevidová pro kabel CTDS a c) vlákna jednovidová obou kabelů.

Na obrázku 9 je znázorněno zapojení měřicí sestavy s přístrojem OFT-4212, který v sobě obsahuje zdroje optického záření 850 a 1300 nm pro měření vícevidových vláken a 1310, 1490, 1550 a 1625 nm pro jednovidová optická vlákna. Světlo z těchto zdrojů je vyvedeno přes rozbočnici 1x4 do jednotlivých měřených optických vláken. Měřená vlákna jsou pak postupně připojena na jednotlivé kanály detektorů měřicího přístroje OFT-4212.

Jednotlivá vlákna kabelů CTDS a CTFS byla zapojena na pět přístrojů OFT-4212. Dva z těchto přístrojů byly určeny pro měření vícevidových vláken, kde na jeden přístroj byla připojena vícevidová optická vlákna kabelu CTDS a na druhý přístroj byla připojena vlákna kabelu CTFS. Kabel CTFS byl zapojen podle schématu na obrázku 9 a) a kabel CTDS byl zapojen podle schématu na obrázku 9 b).

Přístroj OFT-4212 pro měření vícevidových vláken optických kabelů CTDS (obrázku 9 a)) měl univerzální konektor, kterým bylo možné měřená vlákna připojit přímo. Druhý přístroj,

měřicí kabel CTFS byl konstruován pouze na vlákna s konektory FC/PC a z důvodu toho bylo nutné pro tento přístroj využít připojovací patchcordy a hybridní spojky (obrázku 9 b)). Další tři přístroje měřili parametry jednovidových vláken, kde jako použité zapojení bylo aplikováno schéma z obrázku 9 c).

Pro měření vícevidových vláken obou kabelů byly použity takové přístroje OFT-4212, které realizuje měření na dvou vlnových délkách 850 a 1300 nm. Parametry jednovidových optických vláken v kabelech byly měřeny na čtyřech vlnových délkách, a to 1310, 1490, 1550 a 1625 nm. Do každého z přístrojů OFT-4212 pak byly zapojeny tři žíly kabelů. Vždy jeden kanál zůstal propojen s rozbočnicí (vždy to byl kanál A) pro referenční měření. Žíla G z kabelu CTFS jako jediná nebyla zapojena do přístrojů OFT-4212, a to z důvodu nedostatku kanálů na měřicích přístrojích. Tato žíla byla měřena manuálně pomocí přístroje PM800, s využitím zdroje záření na jednotlivých vlnových délkách z přístroje LS800 a PM840. Těmito přístroji bylo možné měřit vlnové délky 1310, 1490 a 1550 nm. Celá konfigurace zapojení je znázorněná v tabulce 2.

Tabulka 2: Zapojení jednotlivých žil do přístrojů OFT-4212.

přístroj	kanál	zapojené vlákno
OFT-4212 (MM-1)	A	reference
	B	kabel CTDS žíla A
	C	kabel CTDS žíla B
	D	kabel CTDS žíla C
OFT-4212 (MM-2)	A	reference
	B	kabel CTFS žíla A
	C	kabel CTFS žíla B
	D	kabel CTFS žíla C
OFT-4212 (SM-1)	A	reference
	B	kabel CTDS žíla D
	C	kabel CTDS žíla E
	D	kabel CTDS žíla F
OFT-4212 (SM-2)	A	reference
	B	kabel CTFS žíla D
	C	kabel CTFS žíla E
	D	kabel CTFS žíla F
OFT-4212 (SM-3)	A	reference
	B	kabel CTDS žíla G
	C	kabel CTDS žíla H
	D	kabel CTFS žíla H
PM800	–	kabel CTFS žíla G

Před samotným měřením a zapojením optických kabelů k měřicím zařízením byly výstupy rozbočnic připojeny ke vstupům na detektory jednotlivých kanálů a byla provedena kalibrace přístroje. Poté byly připojeny i měřené kabely a jejich jednotlivé žíly a přístroje OFT-4212 byly připojeny k počítači s řídicím programem, který každých 30 minut měřil hodnotu optického útlumu optických vláken připojených na měřicí přístroj. Počítač zaznamenával a ukládal hodnoty do souborů. Optický útlum optických vláken z kabelů CTDS a CTFS byl na přístrojích sledován do chvíle, kdy se optický útlum jednotlivých vláken v čase přestal měnit.

7.2 Měření vlastností optických vláken s dotací erbia

Optický vláknový vlnovod, který je dotován vzácnými zeminami, z nichž nejčastěji se využívá Erbium ve stavu trojmocném, je schopen zesílení optického signálu. Avšak parametr optického útlumu optického vlákna taktéž ovlivňuje celkový přenos tohoto vlákna v optické komunikační lince.

Parametry optického útlumu a zesílení byly měřeny při vystavení optického vlákna s dotací erbia gama záření. Důležitým bodem zkoumání byla jednak změna optického útlumu a zesílení po vystavení dávce gama záření, ale také byly zkoumány tyto hodnoty v průběhu času od ukončení vystavení dávkou gama ozáření.

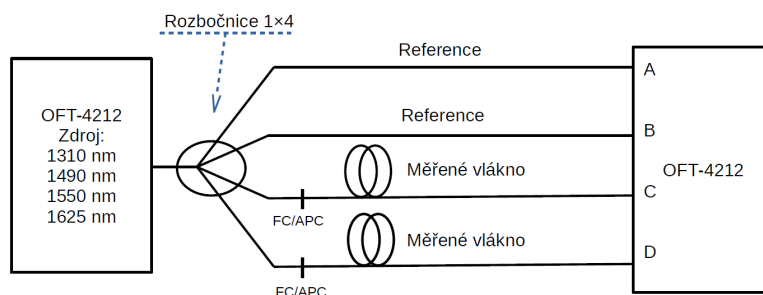
K dispozici jsem měl celkem 15 erbiem dotovaných vláken, z nichž pět vzorků bylo 10 m dlouhých (vzorky s označením I-4(980/125)HC-10m) a deset vzorků mělo délku 3 m. Vzorky o délce 3 m byly ještě rozděleny na 5 vzorků s označením I-4(980/125)HC-3m a pět vzorků s označením I-12(980/125)HC-3m. Tyto vzorky postupně byly použity pro jednotlivé experimenty popsané níže. Rozdělení vzorků je pak shrnuto v tabulce 3.

Tabulka 3: Rozdělení erbiem dotovaných optických vláken do jednotlivých experimentů.

Označení vlákna	Vzorek	Délka [m]	Dávka ozáření [Gy]	Experiment
I-4(980/125)HC	I4-10m-1	10	512	Měření optického útlumu
I-4(980/125)HC	I4-10m-2	10	512	Měření optického útlumu
I-4(980/125)HC	I4-10m-3	10	10	Měření optického zesílení/útlumu
I-4(980/125)HC	I4-10m-4	10	1000	Měření optického zesílení/útlumu
I-4(980/125)HC	I4-10m-5	10	131	Měření optického zesílení/útlumu
I-4(980/125)HC	I4-3m-1	3	512	Měření efektu fotobělení
I-4(980/125)HC	I4-3m-2	3	512	Měření efektu fotobělení
I-4(980/125)HC	I4-3m-3	3	131	Měření optického zesílení/útlumu
I-4(980/125)HC	I4-3m-4	3	1000	Měření optického zesílení/útlumu
I-4(980/125)HC	I4-3m-5	3	10	Měření optického zesílení/útlumu
I-12(980/125)HC	I12-3m-1	3	200	Měření efektu fotobělení
I-12(980/125)HC	I12-3m-2	3	200	Měření efektu fotobělení
I-12(980/125)HC	I12-3m-3	3	–	nevyužit
I-12(980/125)HC	I12-3m-4	3	–	nevyužit
I-12(980/125)HC	I12-3m-5	3	–	nevyužit
Datasheet k erbiem dotovaným optickým vláknům: I-4(980/125)HC [27], I-12(980/125)HC [28].				

7.2.1 Měření optického útlumu

Mimo optického zisku, které je pro vlákna s dotací erbia hlavním a nejdůležitějším parametrem, byl studován také útlum optických vláken a vliv gama záření na tento parametr. Měření bylo provedeno na přístroji OFT-4212, který pracuje na vlnových délkách 1310, 1490, 1550 a 1625 nm a čtyři kanály (A, B, C, D) optických detektorů, které dokáže detekovat optické výkony od úrovně -60 dBm, až do +10 dBm. Schéma zapojení je zobrazeno na Obrázku 10.



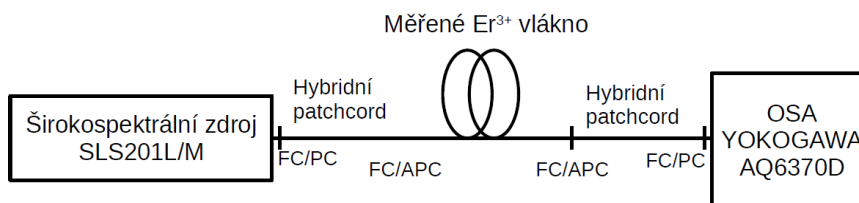
Obrázek 10: Schéma realizace měření útlumu vláken s dotací erbia s využitím přístroje OPTOKON OFT-4212.

Na obrázku 10 je znázorněn Přístroj OFT-4212, který je připojen k rozbočnici se čtyřmi výstupy (1x4Y). Na výstupu rozbočnice byly připojeny dva měřené vzorky a dva výstupy z rozbočnice sloužili pro referenční kontrolní měření. Podle obrázku 10 tak byly měřená erbiem dotovaná vlákna o délkách 3 a 10 m spolu s referenčním 3 m dlouhým křemenným vláknem zapojeny se zdrojem záření na přístroji OFT-4212 přes rozbočnici 1x4Y. Na výstupu jsou měřená vlákna připojena k optickým detektorům. Pro referenci byly volné výstupy z rozbočnice připojeny přímo k optickým detektorům přístroje OFT-4212.

Měření bylo provedeno před ozáření optických vláken s dotací erbia a následně v průběhu relaxace po ukončení vystavení vzorků gama záření. Jednotlivé vzorky měřených optických vláken o délkách 3 a 10 m byly postupně ozářeny dávkami 131 Gy, 512 Gy, 1 kGy a 10 kGy pomalým ozařováním o rychlosti 6 Gy/h. Sledována byla hodnota optického útlumu po ozáření a také změna v průběhu relaxace optického útlumu po ozáření.

U vzorků byly i měřeny spektrální charakteristiky, kdy měření bylo provedeno před a po vystavení gama záření. Z naměřených dat ze spektrálního analyzátoru byl vypočítán parametr RIA. Následně byly sledovány útlumy v časových intervalech pro všechny dávky gama záření a pro všechny ozářené měřené vlákna.

Optický útlum v závislosti na vlnové délce byl měřen na spektrálním analyzátoru YOKOGAWA AQ6370D, na který bylo připojeno měřené vlákno a jako zdroj světla byl využit širokopásmový zdroj Thorlabs SLS201L/M (viz obrázek 11).



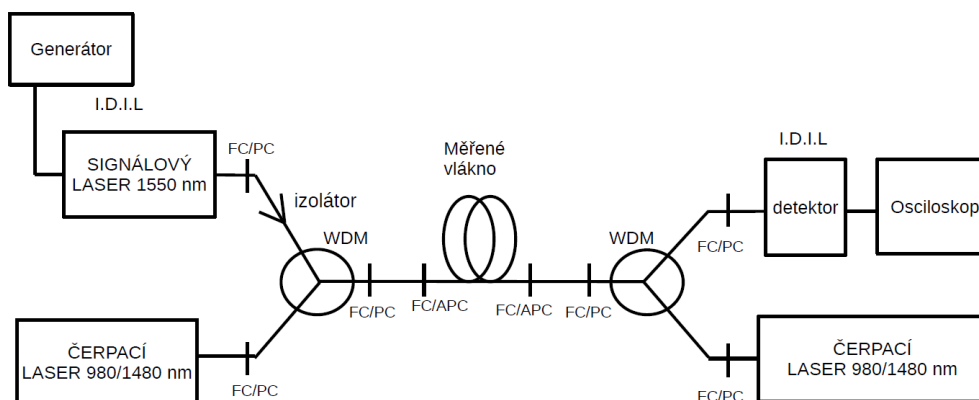
Obrázek 11: Schéma zapojení pro měření spektrálních charakteristik optických vláken s dotací erbia pomocí spektrálního analyzátoru YOKOGAWA.

Na obrázku 11 je znázorněno schéma zapojení měřicí sestavy, kde spektrální analyzátor (OSA - Optical Spectral Analyser) měřil signál na vlnových délkách v rozsahu 600-1700 nm a zdroj optického signálu pracuje na vlnových délkách 360-2600 nm.

Při měření útlumu bylo vždy nejprve změřeno referenční jednovidové křemenné vlákno následně pak toto vlákno bylo nahrazeno měřeným erbiem dotovaným optickým vláknem. Vláknna byla měřena před gama ozařováním a následně po vyjmutí z ozařovací komory po dosažení plánované dávky gama záření (tedy dávky gama záření 131 Gy, 512 Gy, 1 kGy a 10 kGy s dávkovým příkonem 6 Gy/h).

7.2.2 Měření optického zesílení

Hlavním měřeným parametrem optických vláken s dotací erbia je měření zesílení optického signálu. Při měření tohoto parametru jsem použil zdroje a detektory z modulu I.D.I.L, pracující na vlnové délce 1550 nm a měřené vlákno zapojeno podle schématu, které je znázorněno na obrázku 12.



Obrázek 12: Schéma použitého zapojení pro měření optického zesílení erbiem dotovaných vláken.

Zdroj signálu, pracující na vlnové délce 1550 nm, je připojen k vlnovému děliči WDM (Wavelength Division Multiplexer), který světlo ze vstupního zdroje signálu na vlnové délce 1550 nm a zdroje čerpání s pracovní vlnovou délkou 980 nm nebo 1480 nm slučuje do jednovidového vlákna. Optický signál pak vstupuje do měřeného erbiem dotovaného optického vlákna. WDM na výstupní straně následně rozděluje signál na vlnové délce 1550 nm a čerpací optické světlo 980 nm nebo 1480 nm. Zesílený optický signál je na výstupu měřen optickým detektorem, který převádí optický signál na elektrický. Tento elektrický signál je připojen k osciloskopu, kde je výstupní hodnota převedeného optického výkonu zobrazována. Datový signál je generovaný pomocí laseru o vlnové délce 1550 nm a nastavený v režimu externího řízení generátorem. Tento režim byl využit pro lepší oddělení samotného signálu od šumu ASE (Amplified Spontaneous Emission – Zesílená spontánní emise).

Při samotném měření optického zesílení byl signálový laser, pracující na vlnové délce 1550 nm buzený generátorem obdélníkového signálu, podle schématu znázorněného na obrázku 12. Byla sledována amplituda nejdříve referenčního nedotovaného křemenného vlákna, následně pak byla změřena amplituda erbiem dotovaného vlákna.

Tyto amplitudy byly převedeny na odpovídající hodnoty optického výkonu. Následně bylo určeno optické zesílení G :

$$G = 10 \cdot \log\left(\frac{P_o}{P_i}\right), \quad (3)$$

kde P_i je optický výkon měřený na vstupu vlákna a P_o je výstupní optický výkon (oba parametry výkonu jsou v jednotkách mW), vypočítána hodnota optického zesílení G je v jednotkách dB.

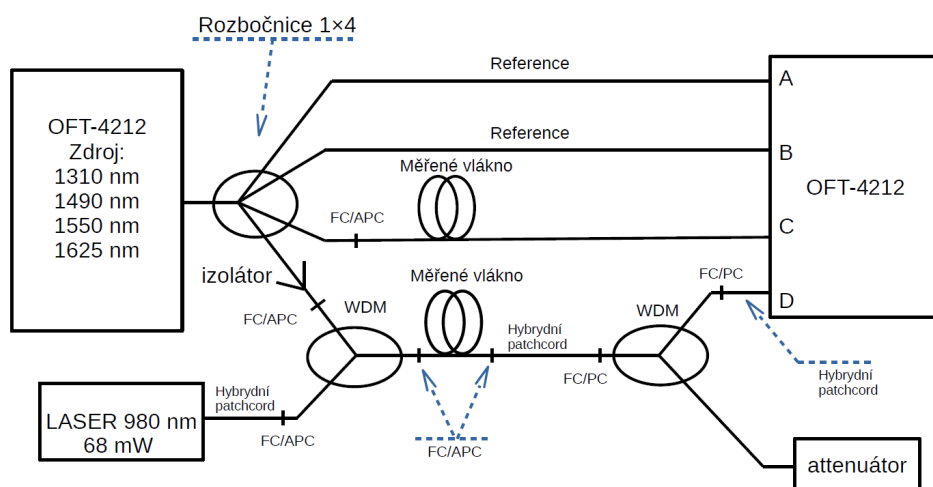
Zesílení G bylo měřeno pro čerpání na vlnových délkách 980 a 1480 nm. Na laserech s těmito vlnovými délkami byl nastaven stejný výkon optického signálu o hodnotě 68 mW. Obě vlnové délky čerpacího signálu byly využity pro dvě různé čerpací metody, tedy dopřednou a zpětnou.

Erbiem dotovaná vlákna byla vystavena dávkám gama záření 131 Gy, 1 kGy a 10 kGy s dávkovým příkonem 6 Gy/h. Zesílení bylo měřeno před vystavením vláken gama záření a následně po vyjmutí vláken z ozařovací komory v průběhu relaxace. Byla sledována velikost a změna optického zesílení při relaxaci optických vláken po ovlivnění gama zářením. Při ozáření dávkou 131 kGy, byl také sledován průběh zesílení v čase, kdy vlákno relaxovalo.

Při měření optického zesílení pro dávku 131 Gy byla již k dispozici rozbočnice 1x2Y, která umožňovala provést metodu obousměrného čerpání oběma vlnovými délkami (980 i 1480 nm). Při měření byl optický výkon čerpacího laseru rozdělen v poměru 1:1 do obou vstupů.

7.2.3 Měření efektu foto-bělení

Na vzorcích vláken dotovaných erbiem byl proveden experiment pro studium foto-bělicího efektu (photobleaching effect), kdy vlákno procházelo světlo na vlnové délce 980 nm o výkonu 68 mW v krátkodobých intervalech a byla sledována změna optického útlumu. Při experimentu bylo nutné zavést do měřeného optického vlákna optický signál, kterým byl měřen útlum ozářeného optického vlákna a také optický výkon pro vyvolání tzv. photobleaching efektu, neboli foto-bělení, který má urychlit a zlepšit fázi relaxace, a tedy zlepšit přenosové vlastnosti vlákna. Pro měření útlumu výstupu optického signálu bylo na výstupu nutné multiplexem oddělit měřený optický signál od signálu ovlivňující vlákno. Schéma zapojení je znázorněno na obrázku 13.



Obrázek 13: Schéma zapojení experimentu pro měření foto-bělicího efektu.

Pro měření byl použit měřicí přístroj OFT-4212 zapojen podle Obrázku 13, jehož zdroj optického signálu na vlnových délkách 1310, 1490, 1550 a 1625 nm byl připojen na jednovidovou rozbočnici 1x4. Byly měřeny dvě ozářené 3 m dlouhá vlákna, která byla ozářená dávkou 512 Gy s dávkovým příkonem 6 Gy/h, přičemž jedno ozářené vlákno (referenční) bylo připojeno přímo na detektor kanálu C, druhé vlákno bylo připojeno k WDM, kde se slučoval optický signál ze zdroje OFT-4212 s optickým signálem z laseru na vlnové délce 980 nm o výkonu 68 mW. Na detektoru kanálu D byl pak díky WDM na výstupní straně měřen pouze optický signál na vlnových délkách 1310, 1490, 1550, a nebo 1625 nm, měřicí útlum testovaného optického vlákna. Do dalších dvou kanálů detektorů byly přímo připojeny volné výstupy z rozbočnice 1x4, kde tyto kanály byly tedy použity pro referenční kontrolní měření.

Obě vlákna byla měřena od prvního dne, kdy byly vyjmuty z ozařovací komory zdroje gama záření a měření probíhalo 35 dní, kdy měřené data se automaticky zaznamenávaly každých 30 minut. Do měřeného vlákna byly v průběhu relaxace vláken připojen výkonový signál s krátkým časovým intervalem o výkonu 68 mW na vlnové délce 980 nm, kdy probíhaly dva 30 minutové bělicí intervaly s pauzou 30 minut první den po ozáření. Následně byly v průběhu relaxace provedeny bělicí intervaly o délce 3 hodiny.

Vyhodnoceny byly rozdíly útlumu před připojením zdroje optického signálu na vlnové délce 980 nm a těsně po jeho odpojení. Následně po stabilizaci optického útlumu bylo na referenčním i měřeném ozářeném vlákne měřeno optické zesílení. Měření bylo provedeno stejným způsobem, jak je popsáno v kapitole 7.2.2 a sledován byl rozdíl v zesílení před ozáření a po ustálení parametrů vláken po ozáření. Také jsem sledoval rozdíly v zesílení mezi optickým vláknem, u kterého bylo provedeno foto-bělení a referenčního neozářeného erbiem dotovaného vlákna.

Při druhém měření byl experiment foto-bělení, také zaměřen na studium změn optického zesílení erbiem dotovaných vláken. Pro druhý experiment byly využity dva vzorky erbiem dotovaného vlákna typu I-12(980/125)HC o délce 3 metry. Tyto vzorky byly, před jejich samotným měřením, ozářeny dávkou 200 Gy s rychlostí ozařování 5,3 Gy/h. Následně byly převezeny do laboratoře PLANIO na katedře mikroelektroniky Fakulty elektrotechnické, ČVUT v Praze, a zde zapojeny pro měření nejprve optického zesílení a následně i optického útlumu.

Před samotným ozáření bylo u optických vláken s dotací erbia změřeno jejich optické zesílení. Následně bylo optické zesílení změřeno u obou vzorků po vyjmutí vláken z ozařovací komory. Poté bylo jedno vlákno zapojeno do měřící sestavy uvedené na obrázku 13, kde toto zapojení bylo použito i při prvním měření. V průběhu 5 dnů, kdy měření probíhalo, byl na jeden vzorek aplikovány bělicí intervaly o délce jedné hodiny. Následně byl opět změřen útlum pro oba vzorky (foto-bělený i referenční). Z tohoto měření byl zkoumán rozdíl v hodnotách zesílení, ale také i optického útlumu, jako tomu bylo pro první měření foto-bělení.

Zesílení při experimentu foto-bělení bylo měřeno přímo na přístroji OFT-4212, kde bylo možné měřit zesílení i v průběhu experimentu mezi bělicími intervaly na ovlivňovaném vlákně. Na referenčním optickém vlákně nebylo možné provádět toto měření, z důvodu ovlivnění reference pro měření rozdílu optických útlumů obou vzorků a nedostatku komponent pro provedení oddělených sestav to toto měření.

Následně byl změřen výstupní výkon při sepnutí laseru vstupního paprsku a čerpacího laseru. Poté bylo odpojeno vstupní světlo a byla měřena hladina šumu. Z rozdílu výkonů byl odečten signál zesílení, který se následně porovnával z referenčním křemenným vláknem. Výpočet optického zesílení, měřeného na přístroji OFT-4212, je definován pomocí rovnice:

$$G = 10 \cdot \log\left(\frac{P_o - P_{ase}}{P_{si}}\right), \quad (4)$$

kde P_{si} je výstupní výkon v jednotkách [mW] při připojení křemenného referenčního vlákna,

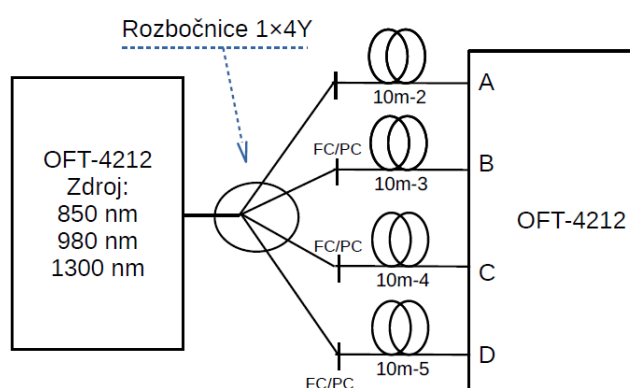
kteřé bylo zapojeno místo erbiového vlákna do sestavy. Následně bylo zapojeno erbiové vlákno a změřen výstupní výkon při zapnutém vstupním laseru na vlnové délce 1550 nm a čerpacím laseru, tento výstupní výkon figuruje v rovnici jako P_o (výkon opět v [mW]). Následně byl odpojen vstupní optický zdroj 1550 nm a byla změřena hladina šumu P_{ase} (jednotka [mW]).

Hodnoty optického zesílení a útlumu byly odečítány vždy před každým bělícím intervalem a po každém bělícím intervalu a byly zaznamenávány hodnoty těchto dvou veličin. V průběhu experimentu byl měřen optický útlum stejně jako při prvním experimentu. Optické zesílení bylo v průběhu experimentu studováno jen v konfiguraci dopředného čerpání na vlnové délce 980 nm, tedy stejně, jakým způsobem byly aplikovány bělící intervaly výkonového světla na vlnové délce 980 nm. Před ozáření a před započítáním foto-bělení, a také po dokončení všech bělících intervalů bylo zesílení změřeno také pro konfiguraci dopředného čerpání na vlnové délce 1480 nm.

7.3 Měření mnohavidových optických vláken s průměrem jádra 105 μm

Vlákna s průměrem jádra 105 μm FG105LCA od firmy THORLABS ([29]) byla podrobena měření jednak po ozáření, stejně jako ostatní vzorky, ale probíhalo měření také v průběhu procesu gama ozařování. K dispozici pro plánované experimenty bylo dohromady osmnáct vzorků, z nichž 12 vláken bylo desetimetrových a 6 bylo dvacetimetrů dlouhých a využity byly jednak pro studium vlastností těchto vláken po ozáření a také sloužily jako připojovací patchcordy k měřicím přístrojům.

První experiment byl zaměřen na měření vlastností optických vláken po působení gama ozáření dávkami 9,9 kGy, 25,6 kGy, 49,8 kGy a 92,7 kGy s dávkovým příkonem 5 Gy/h v ozařovací komoře PANOZA, kterými byly jednotlivé vzorky 20 m dlouhých vláken postupně vystaveny. Těmto vláknům byl změřen optický útlum před vložením do ozařovací komory a následně byly měřeny v časovém intervalu každých 30 minut v průběhu jejich relaxace po vyjmutí z ozařovací komory a připojení k měřicímu přístroji. Měření útlumu bylo provedeno na přístroji OFT-4212, určeným pro měření mnohavidových vláken, který byl pro měření optického útlumu využit i v předchozích experimentech. Použité zapojení pro měření optického útlumu je uvedeno na obrázku 14.

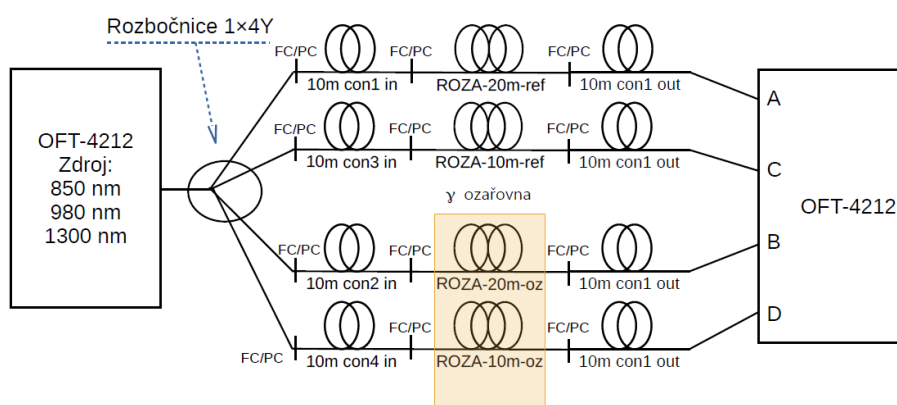


Obrázek 14: Schéma zapojení optických vláken s průměrem jádra 105 μm pro měření optického útlumu po ozáření v ozařovací komoře PANOZA.

Na obrázku 14 je uveden postup měření pro 4 optická mnohavidová vlákna (označení vláken 20m-2, 20m-3, 20m-4 a 20n-5) ozářené dávkami 9,9 kGy, 25,6 kGy, 49,8 kGy a 92,7 kGy, připojené k rozbočnici 1x4Y a na kanály A, B, C a D. Vzorek s označením 20m-2 byl při

experimentu ozáření dávkou 9,9 kGy, vzorek 20m-3 podstoupil ozáření o dávce 25,6 kGy, optické vlákno s označením 20m-4 bylo vystaveno dávce 49,8 kGy a vzorek 20m-5 byl vyjmut z ozařovací komory s dávkou 92,7 kGy. Všechny vzorky byly ozařovány s dávkovým příkonem 5 Gy/h.

Pro druhý experiment byl přístroj společně s měřenými vzorky dvou dvacetimetrových vláken (vzorky ROZA-20m-ref a ROZA-20m-oz) a dvou desetimetrových vláken (vzorky ROZA-10m-ref a ROZA-10m-oz) a přípojovacími vlákny odvezen na pracoviště UJV Řež, a.s. Zde byly dvě optická vlákna (označení vláken ROZA-20m-oz a ROZA-10m-oz) nainstalovány do ozařovny a přes průchodky připojeny k měřicímu přístroji OFT-4212 podle konfigurace znázorněné na obrázku 15. Jedno vlákno 10 m a jedno 20 m metrů dlouhé pak byly uloženy mimo ozařovací komory a sloužily jako reference.



Obrázek 15: Schéma zapojení pro měření optického útlumu vláken s průměrem jádra $105 \mu\text{m}$ při procesu gama ozařování v ozařovně ROZA.

Jak je znázorněno na obrázku 15, výstup z přístroje OFT4212 je připojen na optickou rozbočnici 1X4Y, jejíž jádro mělo stejně jako připojená vlákna $105 \mu\text{m}$. Výstupy rozbočnice 1x4Y byly postupně připojovány k trojicím vláken, spojených konektory FC/PC. Tyto trojice vždy tvořili dvě přípojná vlákna délky 10 m, které byly třeba k zavedení optického signálu k měřeným optickým vláknům z oddělené operační místnosti do ozařovací komory. Mezi dvojicí přípojovacích optických vláken bylo vždy připojeno měřené optické vlákno. Takto byly připojeny dva vzorky optických vláken s délkou 20 m (vzorky ROZA-20m-ref a ROZA-20m-oz) a dvou vláken desetimetrových (vzorky ROZA-10m-ref a ROZA-10m-oz).

Jeden vzorek 20metrového a 10metrového zkoumaného vlákna byly umístěny do ozařovací komory a tyto vlákna byla vystavena vlivu gama záření o rychlosti ozařování $1,9 \text{ kGy/h}$. Zbylé dva vzorky sloužily jako neovlivněná reference pro kontrolu měření.

V průběhu ozařování byl měřen optický útlum na kanálech měřicího přístroje, kde byla data automaticky odečtena každých 10 minut a uložena do souboru v řídicím počítači. Měření byly vždy výsledky na třech vlnových délkách, 850 nm, 980 nm a 1300 nm. Měření bylo ukončeno při dosažení dávky gama záření 181 kGy.

Tyto vlákna byly následně přesunuty na pracoviště PLANIO na Fakultě Elektrotechnické ČVUT v Praze a bylo pokračováno v měření změny parametru útlumu jednotlivých měřených optických vláken. Toto měření probíhalo stejně, jako při prvním experimentu s optickými vlákny s průměrem jádra $105 \mu\text{m}$.

8 Výsledky měření

Cílem experimentů je studium vlastností optických vláknových vlnodů a kabelů na působení gama záření. Měřil jsem vlastnosti optických kabelů CTDS a CTFS, které byly dodány firmou OPTOKON Kable Co., Ltd., s.r.o., vícevidové optické vlákna FG105LCA s průměrem jádra 105 μm , která jsou určena pro využití v technologii PoF (Power over Fiber). Dále jsem také měřil vláknové vlnodody s dotací erbia, které se využívají v optických zesilovačích. Experimenty byly zaměřeny na měření optického útlumu a transmisních spekter. Také jsem zkoumal ovlivnění útlumu gama zářením a s tím spojený parametr RIA (definice uveden v kapitole 5.1). Níže jsou pak popsány dosažené výsledky jednotlivých experimentů.

8.1 Měření vlastností optických kabelů CTDS a CTFS

Měřené vzorky optických kabelů CTDS a optických kabelů CTFS podstoupili dlouhodobé ozáření na pracovišti ÚJV Řež, a.s., kde obdržely dávku gama záření o velikosti 80,5 kGy s dávkovým příkonem 5,5 Gy/h. Poté byly měřeny spektrální charakteristiky pomocí analyzátoru YOKOGAWA, kde bylo zkoumáno spektrum přenosu těsně po převozu na pracoviště ČVUT v Praze a následně bylo dlouhodobě měřeno pomocí přístrojů OFT-4212, kde byla měřena změna optického útlumu vláken vlivu prostředí gama záření a změna útlumu v průběhu času po ozáření, při měření relaxačního procesu.

8.1.1 Měření spektrálních charakteristik

Po připojení vlákna na optický spektrální analyzátor YOKOGAWA AD3072Q, byl spektrální analyzátor konfigurován pro měření ve spektrálním rozsahu vlnových délek 600-1700 nm s rozlišením 1 nm. Byla proměřena nejprve vlákna referenční, a to jednak jednovidová, tak také vícevidová. Následně byly proměřeny všechny žíly obou optických kabelů. Ze změřených výkonů reference a zkoumaných vzorků, byl vypočítán útlum vláken v jednotlivých vlnových délkách spektra. Pro výpočet byl použit vztah:

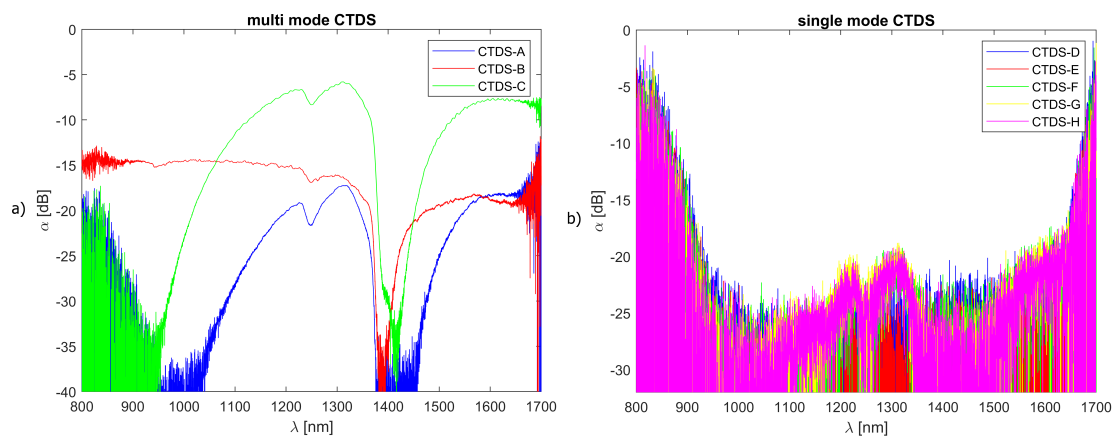
$$\alpha(\lambda) = P_{mp}(\lambda) - P_{ref}(\lambda), \quad (5)$$

kde $\alpha(\lambda)$ je útlum, $P_{mp}(\lambda)$ je výkon měřeného optického vlákna a $P_{ref}(\lambda)$ je změřený výkon referenčního optického vlákna (schéma zapojení viz kapitola 7.1.1). Hodnoty změřených výkonů jsou pak v jednotkách dBm a optický útlum je uveden v dB .

Následně byla vypočítána charakteristika optického útlumu pro každou žílu optických kabelů. Tyto charakteristiky byly vyneseny do grafů a jsou znázorněny na obrázku 16 a obrázku 17.

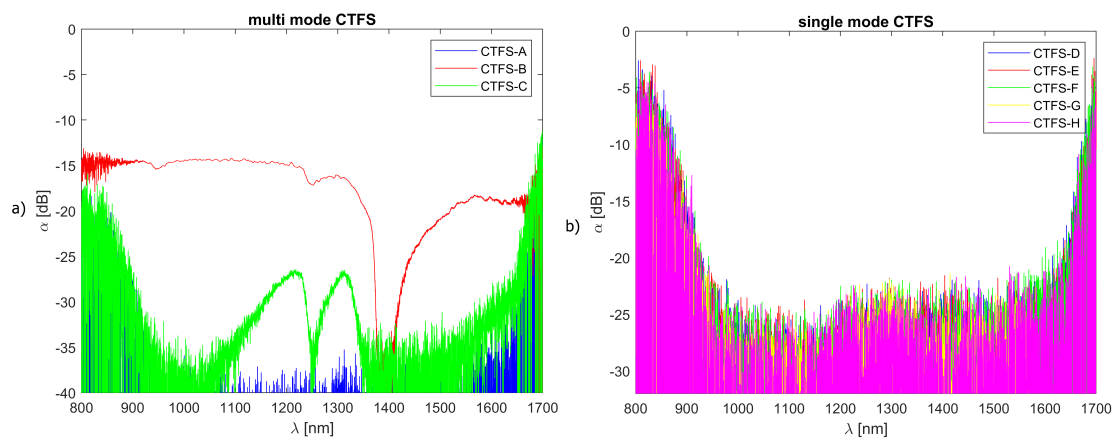
Na obrázku 16a) jsou zobrazeny spektrální charakteristiky útlumu mnohavidových vláken z měřeného optického kabelu CTDS, kde modrý průběh znázorňuje spektrální charakteristiky žíly A, červený průběh odpovídá spektru žíly B a zelený je spektrum vlákna v žíle C. Z těchto charakteristik vyplývá, že z vícevidových vláken v kabelu CTDS nejmenší optický útlum má žíla C, kde nejmenší útlum je -5,85 dB, a to na vlnové délce okolo 1300 nm. Naopak vlákno největším útlumem je vlákno v žíle A, kde minimální útlum je na stejné vlnové délce, jako u žíly C, avšak zde se útlum pohybuje okolo 15 dB.

Na obrázku 16b) jsou znázorněny spektrální průběhy vláken jednovidových žil D až H. Žíla D je znázorněna modrým průběhem, E červeným průběhem, F průběhem zeleným, žlutým průběhem je znázorněna žíla G a žíla H je znázorněna fialově.



Obrázek 16: Výsledky měření spektrálních charakteristik kabelu CTDS pro a) vícevidová vlákna (žíly A, B, C), b) jednovidová vlákna (žíly D, E, F, G, H).

Tyto průběhy spadají do oblasti šumu. Důvodem měření šumu je malý vstupní výkon, který je navázaný z širokospektrálního zdroje do měřeného vlákna, který je způsoben špatnému navázání světla v široko spektrálním zdroji do jednovidového optického vlákna, jelikož se jedná o konektor konfigurovaný na vícevidová vlákna. Konektor neměl optimalizovanou vazbu na jednovidová optická vlákna, a tak tento spoj umožňoval spojení jen s vysokým optickým útlumem, které se projevovaly nízkým výstupním výkonem.



Obrázek 17: Výsledky měření spektrálních charakteristik kabelu CTFS pro a) mnohavidová vlákna (žíly A, B, C), b) jednovidová vlákna (žíly D, E, F, G, H).

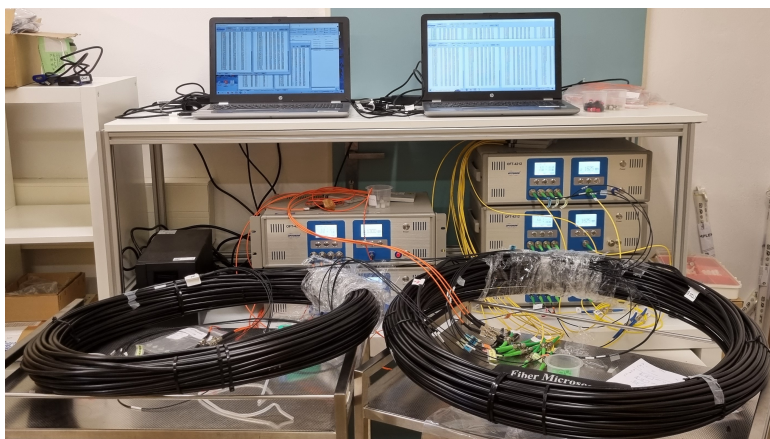
Na obrázku 17 a) je znázorněno spektrum vícevidových optických vláken v kabelu CTFS. Barevné rozlišení jednotlivých žil v grafu se shoduje s měřením na optickém kabelu CTDS (obrázek 16 a)). Zde můžeme vidět, že nejnižší optický útlum má žíla B, kde minimální útlum je 15 dB na vlnové délce okolo 1100 nm. Výstupní výkon na optickém vlákne žíly A byl pro spektrální analyzátor pod jeho rozlišovací výkonovou hladinou. Pro žílu C byly hodnoty měřitelné pro spektrální rozsah od 1100 nm až po vlnovou délku 1350 nm, ostatní vlnové délky pro toto vlákno byly také neměřitelné, z důvodu minimální měřitelné výkonové úrovně.

Při měření spektrálních charakteristik vláken jednovidových z optických kabelů CTFS (znázorněné na obrázku 17 b), je vidět, že útlum těchto vláken je vyšší, než je možné změřit s dostupnými analyzátory spektra, které byly k dispozici. Změřené vysoké hodnoty optického útlumu jsou opět způsobeny vazbou ze širokospektrálního zdroje do jednovidových optických vláken.

Při porovnání vláken z obou typů optických kabelů (CTDS a CTFS), výsledky měření na spektrálním analyzátoru ukázaly rozdíly mezi jednotlivými žilami optických kabelů CTDS a CTFS. Jednotlivé vícevidové žíly (A, B a C) se mezi kabely lišila žíla A i C, kde kabel CTFS byl vlivem gama záření více ovlivněn a dosahoval vyšších hodnot optického útlumu. Rozdíl lze pozorovat i na obrázku 16 a obrázku 17, kde lze vidět, že na žíle C se liší minimální útlum (okolo vlnové délky 1300 nm) o hodnotu 22 dB. Změna naopak nebyla pozorována na vlákně žíly B, kde v obou typech optického kabelu je po vystavení dávky gama záření měřený útlum srovnatelný.

8.1.2 Měření optického útlumu vláken optických kabelů

Po změření spektrálních charakteristik byly optické kabely CTDS a CTFS okamžitě připojeny k přístrojům OFT-4212, které byly již zkalibrovány a byl měřen jejich optický útlum. Fotografie měřicího pracoviště je uvedena na Obrázku 18.



Obrázek 18: Fotografie experimentu měření optického útlumu optických kabelů CTDS a CTFS.

Na Obrázku 18 jsou uvedeny dva optické kabely smotané a připojené na pět přístrojů OFT-4212. Tři přístroje umístěné na pravé straně stolu měřily vlákna jednovidová v žilách D až H obou optických kabelů. Jediné vlákno žíly G kabelu CTFS nebylo zapojeno na OFT-4212, z důvodu nedostatku detektorů. Toto vlákno bylo připojeno na přístroj OFT-820, sledující optický výkon (detailní popis měření je uveden v kapitole 7.1). Na levém okraji stolu se nachází dva přístroje, které měří mnohavidová vlákna v žilách A, B a C obou optických kabelů. Nad těmito přístroji jsou dva řídicí počítače HP, které zaznamenávaly hodnoty útlumu, z každého měřicího přístroje.

Dva počítače, z nichž jeden sledoval přístroje, měřící mnohavidová vlákna a druhý měřil vlákna jednovidová v nastavených intervalech na přístrojích OFT-4212 a automaticky ukládaly tyto hodnoty do předem určených souborů. Perioda měření všech žil optických kabelů CTDS a CTFS byla nastavena na 30 minut a hodnoty se ukládaly ve formátu textového dokumentu. Průběhy byly sledovány od prvního dne ukončení ozáření a převezení z pracoviště ÚJV Řež po dobu, kdy byla pozorována relaxace na ozářených optických vláknech.

Tyto vlákna byla měřena v laboratoři PLANIO na Katedře mikroelektroniky Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze, kde byla konstantní teplota 20,4°C. Po 30. dni po ozařování nastalo zvýšení teploty na hodnotu 24,2°C a způsobilo to ovlivnění měření útlumu u jednotlivých žil optických kabelů. Tyto vzorky pak byly přeměřeny ještě 140 dní po ukončení ozáření, kdy vlákna již byly stabilizována a již nebyly pozorovány změny v optickém útlumu.

Naměřené výsledky optického útlumu pro jednotlivá vlákna z kabelů CTDS a CTFS jsou shrnuta v Tabulkách 4 a 5. Zde jsou uvedeny hodnoty optického útlumu z času před ozářením, z času těsně po vyjmutí z ozařovací komory, 30. dne po ozařování, kdy byla data ovlivněna změnou teploty a ze 140. dne po ozáření z důvodu ověření změn optického útlumu.

Tabulka 4: Výsledky měření optického útlumu a vypočítaný parametr RIA pro optický kabel CTDS po ozáření dávkou 80,5 kGy s dávkovým příkonem 5,5 Gy/h.

Žíla	Vlnová délka [nm]	Optický útlum [dB]				RIA [dB/m] (1. den)
		před ozářením*	1. den po ozáření.	30. den po ozáření	140. den po ozáření.	
A	850	-0,88	–,–	–,–	–,–	–,–
	1300	-0,03	-15,83	-13,24	-12,39	0,16
B	850	-2,01	-13,70	-13,46	-13,32	0,12
	1300	-1,52	-13,93	-13,52	-12,27	0,12
C	850	-0,34	–,–	–,–	-50,11	–,–
	1300	-0,82	-5,91	-5,13	-4,96	0,05
D	1310	-1,15	-41,43	-37,63	-34,24	0,40
	1490	-0,81	-47,39	-44,80	-43,20	0,47
	1550	-0,75	-36,27	-33,88	-31,51	0,36
	1625	-0,80	-32,26	-30,22	-28,20	0,31
E	1310	-0,62	-42,63	-38,70	-35,51	0,42
	1490	-0,47	-48,14	-45,49	-43,79	0,48
	1550	-0,44	-36,84	-34,42	-31,65	0,36
	1625	-0,51	-32,70	-30,54	-28,42	0,32
F	1310	-0,74	-23,24	-21,11	-19,82	0,23
	1490	-0,71	-33,25	-31,72	-30,91	0,33
	1550	-0,52	-25,03	-23,65	-22,79	0,25
	1625	-0,60	-22,97	-21,82	-21,13	0,22
G	1310	-4,18	-22,94	-20,76	-18,44	0,19
	1490	-3,70	-31,75	-30,29	-27,80	0,28
	1550	-3,64	-24,36	-23,01	-20,84	0,21
	1625	-2,95	-22,55	-20,82	-19,09	0,20
H	1310	-4,84	-23,19	-21,00	-18,89	0,18
	1490	-4,24	-32,24	-30,72	-28,66	0,28
	1550	-4,39	-24,68	-23,20	-21,47	0,20
	1625	-3,59	-22,71	-20,92	-19,83	0,19
–,– ... optický útlum byl vyšší než nejnižší možná měřitelná hodnota přístrojovým vybavením.						
* ... Převzato z [1].						

Pro hodnoty útlumů změřených 1. den byl spočítán parametr RIA (Radiation Induced Attenuation - zářením způsobený optický útlum), který určuje zvýšený útlum způsobený vlivem gama záření na vlákna, jejichž délka činila 100 m. Naměřené hodnoty RIA (rovnice 2, která počítá tento parametr, je uvedena kapitole 5) jsou shrnuty v Tabulkách 4 a 5.

Tabulka 5: Výsledky měření optického útlumu a vypočítaný parametr RIA pro optický kabel CTFS po ozáření dávkou 80,5 kGy s dávkovým příkonem 5,5 Gy/h.

Žíla	Vlnová délka [nm]	Optický útlum [dB]				RIA [dB/m] (1. den)
		před ozářením*	1. den po ozáření.	30. den po ozáření	140. den po ozáření.	
A	850	-0,09	–,–	–,–	–,–	–,–
	1300	-0,02	-45,56	-40,85	-40,85	0,46
B	850	-1,50	-2,46	-1,86	N	0,01
	1300	-2,57	-3,10	-2,65	N	0,01
C	850	-0,54	–,–	–,–	–,–	–,–
	1300	-0,34	-29,23	-27,47	-25,84	0,29
D	1310	-0,17	–,–	–,–	–,–	–,–
	1490	-0,05	–,–	–,–	–,–	–,–
	1550	-0,17	–,–	–,–	–,–	–,–
	1625	-0,58	–,–	–,–	–,–	–,–
E	1310	-0,33	–,–	–,–	–,–	–,–
	1490	-0,15	–,–	–,–	–,–	–,–
	1550	-0,32	–,–	–,–	–,–	–,–
	1625	-0,86	–,–	–,–	–,–	–,–
F	1310	-0,60	-30,66	-28,38	-26,25	0,30
	1490	-0,44	-43,91	-42,13	-41,73	0,43
	1550	-0,61	-33,62	-32,02	-30,38	0,33
	1625	-0,95	-30,74	-29,36	-27,96	0,30
G	1310	-3,99	-29,29	-26,59	-24,42	0,25
	1490	-3,53	-42,91	-39,58	-37,83	0,39
	1550	-3,60	-33,58	-30,72	-28,43	0,30
	1625	-3,11	N/A	N/A	-26,16	–,–
H	1310	-4,47	-31,23	-28,19	-26,04	0,27
	1490	-3,93	-44,68	-42,71	-40,08	0,41
	1550	-3,94	-34,94	-32,05	-30,22	0,30
	1625	-3,39	-31,47	-29,73	-27,76	0,28

–,– ... optický útlum byl vyšší než nejnižší možná měřitelná hodnota
N/A ... měřicí přístroj nebyl konstruován na tuto vlnovou délku
* ... Převzato z [1].

Z výsledků měření na optických kabelech CTDS, uvedených v tabulce 4, je patrné, že obecně vícevidová vlákna měla hodnotu optického útlumu nižší, než vlákna jednovidová. Nejmenší útlum byl měřený na vícevidovém vlákne žíly C, kde útlum na vlnové délce 1300 nm dosahoval hodnoty -5,91 dB. Z jednovidových vláken to bylo vlákno v žíle G, kde na vlnové délce 1310 nm byl útlum nejnižší, a to -18,44 dB. Naopak nejvyšší hodnota útlumu byla změřena na vlákne žíly E, na vlnové délce 1490 nm, kde byla změřena hodnota optického útlumu -48,14 dB.

Parametr RIA, který určuje ovlivnění kabelů gama zářením byl určen pro všechny žíly a všechny měřené vlnové délky. Z výsledků shrnutých v tabulce 4 vyplývá, že nejvyšší hodnoty RIA byly měřené na žíle E, a tedy toto vlákno bylo ozářováním nejvíce negativně ovlivněné. Maximální hodnota zde byla dosažena 0,48 dB/m na vlnové délce 1490 nm. Nejmenší hodnoty RIA pro jednovidová vlákna byla naopak pozorována na žíle H, kde na vlnové délce 1310 nm dosahovala hodnoty 0,18 dB/m. Celkově nejmenší hodnota RIA byla změřena na mnohavidovém vlákně žíly C, a to 0,05 dB/m, kde tato hodnota byla měřitelná pouze pro vlnovou délku 1300 nm, pro vlnovou délku 850 nm bylo vlákno ozářováním ovlivněno více, než bylo možné přístroji změřit.

Relaxace byla po dobu měření pozorována u všech vláken a změna útlumu od doby těsně po dobu 30. dne, kdy bylo měření ovlivněno okolní teplotou. Největší změnu zaznamenalo vlákno E, kde se útlum snížil až o 2,65 dB. Při přeměření po 140. dnu kde již nebyla pozorována změna v útlumu. Mezi 30. a 140. dnem po ozáření ještě hodnota útlumu na všech optických vláknech klesala. Maximální pokles byl zaznamenán na žíle D, kde na vlnové délce 1310 nm klesl útlum ještě o 3,39 dB.

Měření optického kabelu CTDS mohlo být ovlivněno na žíle B, kde pro multimodové vlákna musely být použity přípojovací vlákna k detektorům na přístroji. Díky specifickým rozměrům vlákna v žíle B (průměr jádra 200 μm), nebyly k dispozici vlákna, která by mohly být použity jako přípojovací vlákna a měly stejné rozměry jádra připojeny tak byly mnohavidová vlákna s průměrem jádra 62,5 μm . Kvůli těmto parametrům docházelo k ovlivnění měření a ke ztrátám na konektoru a útlum byl měřen vyšší, než byl reálný útlum měřeného optického vlákna.

Při měření útlumu žil optického kabelu CTFS, byl zjištěn maximální měřitelný útlum na žíle H, s hodnotou -42,71 dB. Z tabulky 5 je patrné, že na žíle A byl změřen nejvyšší parametr RIA s hodnotou 0,46 dB/m. Na vláknech žil D a E byly útlumy vyšší, než bylo možné měřit na dostupných přístrojích. Nejnižší útlum i hodnota RIA byla naproti tomu naměřena na žíle B kde RIA byla naměřena pouze 0,01 dB/m a útlum zde byl -2,46 dB na vlnové délce 850 nm.

Při porovnání výsledků měření útlumů obou optických kabelů CTDS a CTFS a jejich jednotlivých žil lze pozorovat že optický kabel CTFS, kde je technologicky použit ochranný gel oproti optickým kabelům CTDS, vykazuje větší ovlivnění vystavení gama zářením. Příkladem může být třeba optické vlákno v žíle F, kde na vlnové délce 1550 nm byla změřena hodnota RIA 0,33 dB/m pro optický kabel CTFS, ovšem na kabelu CTDS je stejná žíla na stejné vlnové délce 1550 nm, 0,25 dB/m.

Rozdíl v parametrech mezi optickými kabely pak může způsobovat právě ochranný gel, který byl aplikován v kabelu CTFS. Tento gel také reaguje na gama záření, kterému je vystaven, a to nabobtnáváním. Tímto negativně ovlivňuje všechny optická vlákna, která jsou v kabelu umístěna. Tento efekt byl popsán v publikaci [30], kde také bylo pozorováno, že optické kabely, které ve své konstrukci používají gel mají po ozáření vyšší hodnoty optického útlumu, než kabely bez gelu.

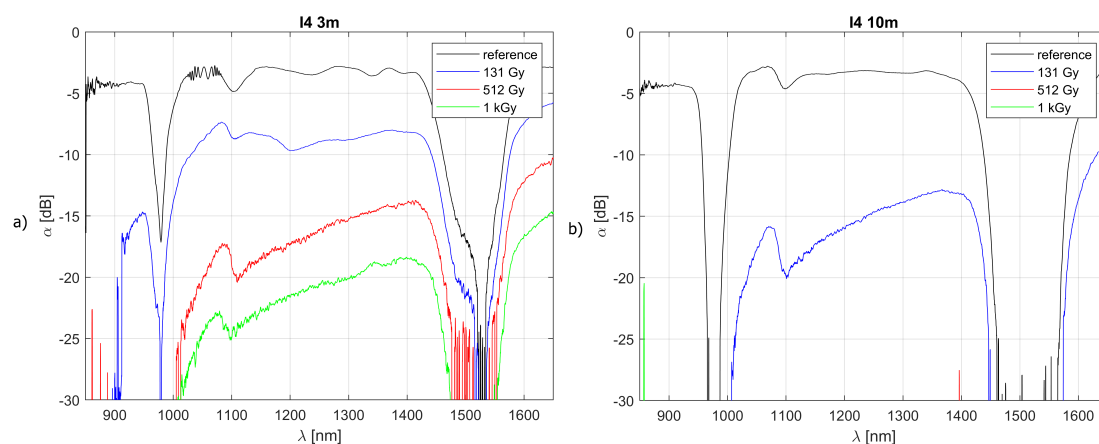
8.2 Měření vlastností optických vláken dotovaných erbiem

Pro studium vlivu gama záření na vlastnosti erbiem dotovaných optických vláken jsem měl k dispozici pět vláken typu I-4(980/125)HC délky 3 m a pět vzorků 10 m vláken. Po pěti vzorcích bylo erbiem dotovaných vláken typu I-12(980/125)HC 3 m dlouhých. Zaměřil jsem se na vlastnosti optického zesílení a optického útlumu vláken po vystavení dávek gama záření 131 Gy, 512 Gy, 1 kGy a 10 kGy s dávkovým příkonem 6 Gy/h. Také byly zkoumány hodnoty optického útlumu ve spektrální oblasti.

Na optických vláknech dotovaných erbiem byl také studován foto-bělící efekt, který měl za cíl prokázat zlepšení a zrychlení relaxační fáze. Tento efekt byl zkoumán při použití výkonového zdroje záření, pracující na vlnové délce 980 nm.

8.2.1 Měření optického útlumu erbiem dotovaných vláken

Pro měření optického útlumu erbiem dotovaných vláken jsem měl k dispozici vlákna po vystavení gama záření dávkami 131 Gy, 512 Gy, 1 kGy a 10 kGy o rychlosti ozařování 6 Gy/h. Změřeny byly nejprve spektrální charakteristiky optického útlumu jednak vláken před ozářením a následně těsně po ozáření. Tyto charakteristiky jsou uvedeny na obrázku 19.

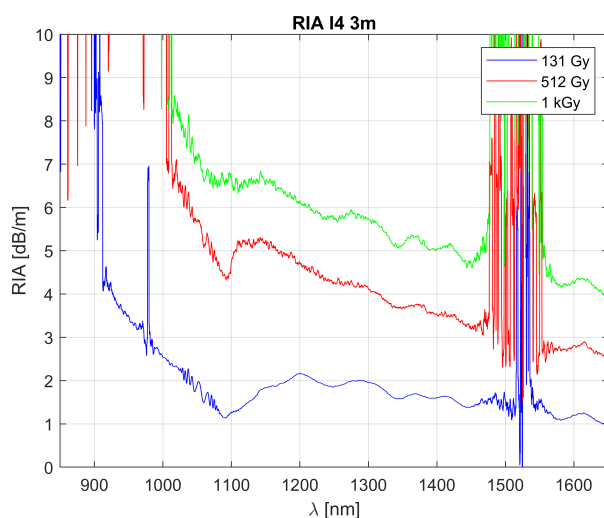


Obrázek 19: Měření transmisní spektrální charakteristiky erbiem dotovaných vláken (referenční neozářené vlákno a ozářená vlákna) o délce a) 3 m a b) 10 m po ozáření dávkami 131 Gy, 512 Gy a 1 kGy s dávkovým příkonem 6 Gy/h.

Obrázek 19 ukazuje spektrální charakteristiky pro dvě délky erbiem dotovaného vlákna 3 m (obrázek 19 a) a 10 m (obrázek 19 b)). V těchto grafech je znázorněn útlum vláken pouze po vystavení dávek 131 Gy, 512 Gy a 1 kGy. Měření pro dávku 10 kGy není v grafu uvedené, jelikož dávka gama záření, kterou vlákno obdrželo, způsobilo příliš velký optický útlum na to, aby bylo možné jej změřit. Také pro vlákna desetimetrová byla již dávka 1 kGy, příliš velká na to, aby byl možné měřit optický útlum vlákna.

Změřené průběhy optického útlumu v závislosti na vlnové délce před ozářením a po ozářením jsem použil jako proměnné pro výpočet charakteristik RIA, tedy útlumu způsobeného radiační dávkou gama záření. Pro výpočet tohoto parametru byl použit vzorec 2 z kapitoly 8.1.2. Průběhy RIA ve vlnovém spektru jsou znázorněny na Obrázku 20.

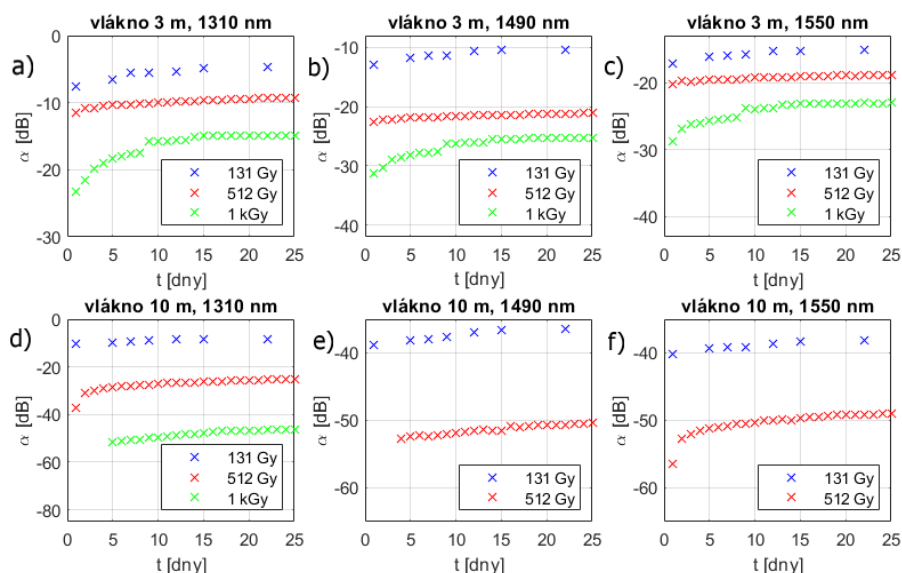
Na obrázku 20 jsou znázorněny průběhy pro tři dávky 131 Gy, 512 Gy a 1 kGy s dávkovým příkonem 6 Gy/h, kterým bylo vystaveno 3 m dlouhé optické vlákno, na kterém byl parametr RIA určen. Z tohoto obrázku je také patrné, že při zvyšování dávek gama záření se



Obrázek 20: Graf vypočítaného parametru RIA pro vlákna délky 3 m ozářené dávkami 131 Gy, 512 Gy a 1 kGy s dávkovým příkonem 6 Gy/h.

útlum v důsledku ozáření zvyšuje. Optický útlum ozářeného vlákna se také pro různé vlnové délky procházejícího optického signálu mění. Pro vlnové délky nižší byl měřen vyšší útlum, který se v závislosti na narůstající vlnové délce snižoval. Na obrázku 20 jsou také dvě oblasti okolo vlnových délek 980 nm a okolo 1530 nm, kde parametr RIA nemohl být přesně určen z důvodů absorpce erbiem dotovaného vlákna a jeho vysokému útlumu.

Optický útlum byl také měřen v průběhu času na přístrojích OFT-4212 po vyjmutí vláken z ozařování komory. Zde byl zkoumán průběh relaxace vlákna po dobu, kdy útlum klesal, až do ustálení. Změřené průběhy relaxace jsou uvedeny na obrázku 21.



Obrázek 21: Průběh relaxace optického útlumu pro 3 m dlouhé erbiem dotované vlákna na vlnové délce, a) 1310 nm, b) 1490 nm a c) 1550 nm a 10 m dlouhé erbiem dotované vlákna na vlnové délce, d) 1310 nm, e) 1490 nm a f) 1550 nm.

Na obrázku 21 jsou průběhy relaxace pro měřená vlákna ozářená čtyřmi již zmíněnými dávkami na vlnových délkách 1310 nm (obrázku 21 a)), 1490 nm (obrázku 21 b)) a 1550 nm (obrázku 21 c)). Ze kterých je patrný snižující se útlum měřených erbiem dotovaných optických vláken v průběhu času od ozáření. Hodnoty optického útlumu byly ustáleny v průběhu 35. dne po ozáření. Hodnoty optického útlumu před ozáření, prvního dne po ozáření a 35. dne po ozáření jsou shrnuty v tabulce 6. Zde jsou uvedeny výsledky útlumu bezprostředně po ozáření a po ustálení pro 3 m erbiem dotovaná optická vlákna a v tabulce 7 jsou uvedeny data pro vlákna s délkou 10 m.

Tabulka 6: Optický útlum 3 m optických vláken s dotací erbia s dávkou gama záření 131 Gy, 512 Gy a 1,0 kGy s dávkovým příkonem 6 Gy/h.

Dávka [kGy]	Vlnová délka [nm]	Optický útlum [dB]			RIA [dB/m] (1. den)
		před ozáření	1. den po ozáření	35. den po ozáření	
0,131	1310	-2,84	-7,05	-4,73	1,40
	1490	-10,20	-12,92	-10,18	0,97
	1550	-14,20	-17,26	-15,00	0,89
0,512	1310	-1,79	-11,46	-8,98	3,22
	1490	-13,34	-22,68	-20,90	3,11
	1550	-11,41	-20,21	-18,58	2,93
1,0	1310	-1,89	-22,55	-14,82	6,89
	1490	-15,34	-31,18	-25,31	5,28
	1550	-13,41	-28,54	-23,08	5,04

Z tabulek je patrný narůstající útlum vláken v závislosti na obdržené dávce, stejně jako je to možné pozorovat v měření spektrálních charakteristik na obrázku 19. Při relaxačním období po ozáření optické vlákna s dotací erbia klesl jeho optický útlum maximálně o 12,35 dB, kde je tato hodnota poklesu optického útlumu možná pozorovat na vlnové délce 1310 nm při měření 10 m erbiem dotovaného vlákna po ozáření dávkou 1 kGy.

Tabulka 7: Optický útlum 10 m optických vláken s dotací erbia pro dávky gama záření 131 Gy, 512 Gy, 1,0 kGy.

Dávka [kGy]	Vlnová délka [nm]	Optický útlum [dB]			RIA [dB/m] (1. den)
		před ozáření	1. den po ozáření	35. den po ozáření	
0,131	1310	-1,98	-10,13	-8,20	0,82
	1490	-31,43	-38,89	-36,39	0,74
	1550	-32,90	-40,12	-38,00	0,72
0,512	1310	-2,03	-36,99	-24,64	3,50
	1490	-34,09	–	-49,87	–
	1550	-33,00	-56,46	-48,53	2,35
1,0	1310	-2,07	–	–	–
	1490	-33,47	–	–	–
	1550	-33,58	–	–	–
–. – ... optický útlum byl vyšší než nejnížší možná měřitelná hodnota					

Při porovnání výsledků z tabulky 6, znázorňující útlumy pro vlákna 3 m, a tabulky 7, ukazující vlastnosti přenosu 10 m vláknových vlnodů, lze pozorovat podobné hodnoty parametru RIA u 3 m a 10 m optických vláken pro shodné dávky gama záření. Rozdíl hodnot, který mezi těmito hodnotami je, může být způsoben vlivem optického útlumu konektorů, kterými bylo vlákno k měřicím přístrojům připojeno.

8.2.2 Měření optického zesílení

Optická vlákna s dotací erbia byla podrobena studiu vlastnosti zesílení optického signálu na vlnové délce 1550 nm. Optické zesílení bylo zkoumáno na vláknech, kdy byly postupně jednotlivé vzorky ozařovány různými dávkami gama záření. Vlákna tak byla postupně vystavena dávkám 131 Gy, 1 kGy a 10 kGy s dávkovým příkonem 6 Gy/h.

Zesílení erbiem dotovaného vláknového zesilovače bylo měřeno, pro ozářená vlákna v době relaxace útlumu po vyjmutí vzorků z prostoru ozařování. Měření optického zesílení dotovaných vláken bylo provedeno pro dvě metody čerpání, dopřednou a zpětnou, s čerpáním na dvou vlnových délkách 980 a 1480 nm. Toto zesílení bylo měřeno před ozářením, těsně po ozářením a 35 dnech po ozářením, kdy byly vzorky ozářených vláken v optickém útlumu ustálené.

Optické zesílení bylo měřeno při vstupním optickém výkonu 2,0 μ W optického zdroje 1550 nm a pro výkon čerpání 68 mW pro obě vlnové délky, jak 1480 nm, tak pro laser emitující na vlnové délce 980 nm. Výsledky zesílení pak jsou uvedeny v tabulkách 8 a 9, kde jsou hodnoty zesílení pro vlákna o délce 3 m a 10 m.

Tabulka 8: Naměřené optické zesílení pro erbiem dotovaná vlákna délky 3 m. Při ozářením dávkami 131 Gy a 1,0 kGy, měřeno dopřednou a zpětnou metodu čerpání na vlnových délkách 980 a 1480 nm.

Dávka [kGy]	Vlnová délka čerpání [nm]	Metoda čerpání	Optické zesílení [dB]		
			před ozářením	1. den po oz.	35. den po oz.
0,131	1480	Dopředné	10,9	6,0	8,8
		Zpětné	11,1	6,2	8,9
0,131	980	Dopředné	10,0	7,3	9,3
		Zpětné	10,2	7,5	9,8
1,0	1480	Dopředné	10,9	-3,2	-2,2
		Zpětné	11,1	-2,6	-2,2
1,0	980	Dopředné	10,0	-13,0	-12,2
		Zpětné	10,2	-11,4	-10,8

Z naměřených výsledků v tabulce 8 vyplývá, že před zesílením byly hodnoty zesílení pro čerpání na vlnové délce 1480 nm vyšší, než na vlnové délce 980 nm. Tyto hodnoty se však lišily pouze v desetinách decibel. Stejně je to při použití různých metod čerpání, kdy vyšší zesílení bylo měřeno pro zpětnou metodu čerpání, než pro dopřednou metodou. Při následném gama ozářením se v důsledku vystavení gama záření zesílení snížilo pro všechny metody a obě vlnové délky.

Při ozářením dávkou 131 Gy byl pozorován pokles útlumu, který na vlákna o délce 3 m měl vliv poklesu útlumu z maximálně naměřené hodnoty 11,1 dB (při zpětné metodě čerpání na vlnové délce 1480 nm před ozářením) na hodnotu 6,2 dB. Při následné relaxaci pak docházelo ke znovu nabytí optického zesílení v erbiem dotovaných vláknech. Při porovnání jednotlivých metod, při konstrukci zesilovače, je vidět, že zpětná metoda čerpání dokáže zajistit lepší zesilovací vlastnosti. Nepatrně lépe se také jeví použití čerpacího laseru na vlnové délce 980 nm,

kde rozdíl mezi čerpacím výkonem na vlnové délce 980 nm a vlnové délce 1480 nm činí maximálně 1,3 dB.

Při vyšší dávce 1 kGy pak je z výsledků uvedených v tabulce 8 patrné, že rozdíl mezi použitými vlnovými délkami je pro čerpací signál daleko významnější, kde optické zesílení erbiem dotovaného vlákna má výrazně vyšší hodnoty při použití čerpání na vlnové délce 1480 nm, a tento rozdíl činí minimálně 8,2 dB. Obecně však optický vláknový zesilovač s dotací erbia při ozáření touto dávkou při vloženém čerpacím výkonu 68 mW. Ztrácí zesilovací vlastnost a převažuje zde optický útlum vlákna.

Tabulka 9: Naměřené optické zesílení pro erbiem dotovaná vlákna délky 10 m. Při ozáření dávkami 131 Gy a 1,0 kGy, měřeno dopřednou a zpětnou metodu čerpání na vlnových délkách 980 a 1480 nm.

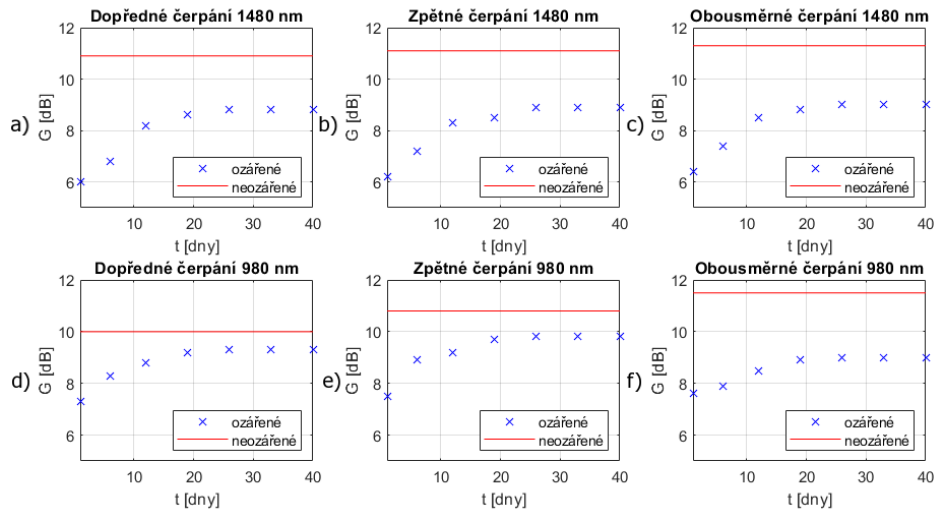
Dávka [kGy]	Vlnová délka čerpání [nm]	Metoda čerpání	Optické zesílení [dB]		
			před ozářením	1. den po oz.	35. den po oz.
0,131	1480	Dopředné	24,7	10,0	19,0
		Zpětné	26,2	10,2	19,1
0,131	980	Dopředné	23,2	-2,5	-1,0
		Zpětné	23,7	-2,2	5,6
1	1480	Dopředné	24,7	–,–	–,–
		Zpětné	26,2	–,–	–,–
1	980	Dopředné	23,7	–,–	–,–
		Zpětné	24,7	–,–	–,–

–,– ... optický útlum byl vyšší než nejnižší možná měřitelná hodnota

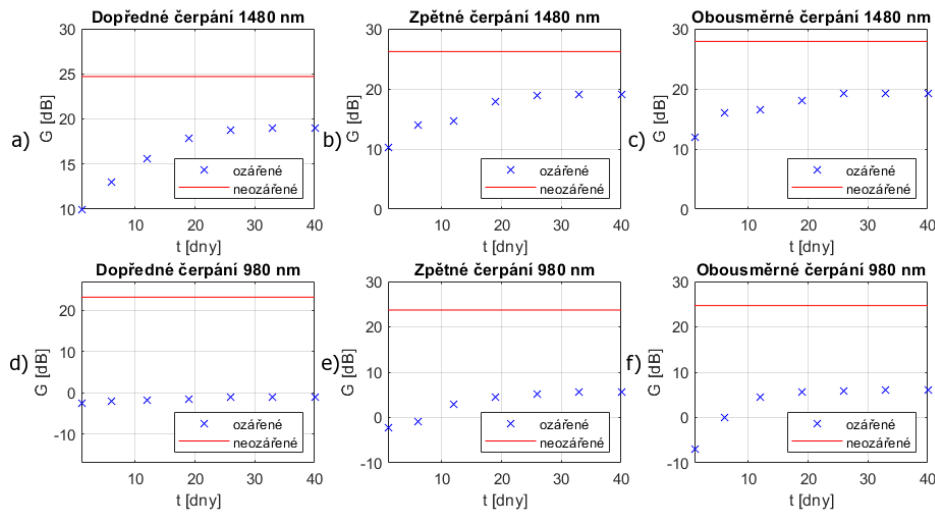
Při vystavení dávce 131 Gy byl pozorován pokles optického zesílení, kdy pro vlákna o délce 10 m, jejichž zesílení je uvedeno v tabulce 9, byl pokles zesílení v důsledku ozáření výraznější, než pro vlákna 3 m. Zde, stejně jako z předešlých výsledků pro kratší vlákna, byly pozorovány rozdíly při použití čerpacích laserů pracujících na různých vlnových délkách. Výsledky měření optického zesílení ukazují, že použití čerpací vlnové délky 1480 nm bylo daleko účinnější, než při použití laseru pracujícího na vlnové délce 980 nm. S čerpáním na vlnové délce 1480 nm tak útlum po ozáření poklesl o 14,7 dB, pro dopřednou metodu čerpání a o 16 dB, pro zpětnou metodu. Naproti tomu čerpání na vlnové délce 980 nm při stejném výkonu vedlo k poklesu zesílení po obdržení dávky gama záření o 25,7 dB, při dopředném čerpání a 25,9 dB, při zpětném čerpání. Rozdíly naměřeného zesílení pak mohou být způsobeny díky různým útlumům na vlnových délkách 980 nm a 1480 nm které působí na čerpací signál. Vlastnosti optických vláken s dotací erbia jsou také popsány v předešlé kapitole 8.2.1.

Ozáření dávkou 1 kGy bylo příliš velké pro vlákna 10 m dlouhá, a optický útlum výrazně převyšoval v bilanci zesílení tak, že jej nebylo možné změřit. Tento stav nastal při měření optického zesílení pro obě délky erbiem dotovaných vláken (3 a 10 m) při vystavení dávce 10 kGy.

U optického vlákna dotovaného erbiem a s dávkou gama záření 131 Gy byla sledována i celá charakteristika optického zesílení při době relaxace optických vláken s dotací erbia, kdy byl tento parametr v průběhu relaxace měřen. Optické zesílení je znázorněno na Obrázku 22, kde jsou hodnoty pro vlákna délky 3 m dopřednou metodou (obrázek 22 a), zpětnou metodou (obrázek 22 b) a obousměrnou metodou (obrázek 22 c) pro čerpání 1480 nm. Výsledky pro čerpání na vlnové délce 980 nm je pro dopřednou metodu na obrázku 22 d), zpětnou na obrázku 22 e) a obousměrnou metodou na obrázku 22 f).



Obrázek 22: Výsledky optického zesílení 3 m dlouhá optická vlákna v průběhu relaxace vláken pro a) dopřednou metodu čerpání na vlnové délce 1480 nm, b) zpětnou metodu čerpání na vlnové délce 1480 nm, c) obousměrnou metodu čerpání na vlnové délce 1480 nm, d) dopřednou metodu čerpání na vlnové délce 980 nm, e) zpětnou metodu čerpání na vlnové délce 980 nm a f) obousměrnou metodu čerpání na vlnové délce 980 nm.



Obrázek 23: Výsledky optického zesílení pro 10 m dlouhá optická vlákna v průběhu relaxace vláken pro a) dopřednou metodu čerpání na vlnové délce 1480 nm, b) zpětnou metodu čerpání na vlnové délce 1480 nm, c) obousměrnou metodu čerpání na vlnové délce 1480 nm, d) dopřednou metodu čerpání na vlnové délce 980 nm, e) zpětnou metodu čerpání na vlnové délce 980 nm a f) obousměrnou metodu čerpání na vlnové délce 980 nm.

Na obrázku 23 jsou výsledky měření vláken pro optické vlákno s délkou 10 m. Stejně jako graf pro vlákno 3 m, znázorňuje tento graf průběhy optického zesílení v závislosti na čase pro jednotlivé metody čerpání. Dopředné čerpání na vlnové délce 1480 nm je znázorněno na obrázku 23 a), zpětné čerpání na vlnové délce 1480 nm je na obrázku 23 b) a obousměrné čerpání

vlnovou délkou 1480 nm na obrázku 23 c). Obdobně je znázorněno dopředné čerpání na vlnové délce 980 nm (obrázek 23 d)) zesílení při metodě zpětného čerpání na vlnové délce 980 nm (obrázek 23 e)) a obousměrné metodě čerpání na vlnové délce 980 nm, které je znázorněno na obrázku 23 f).

Na obrázcích 22 a 23 lze vidět největší změny v prvních dnech po ozáření, kde docházelo k výraznější obnově optického zesílení, který byl potlačen vlivem gama záření. Větší vliv pak lze pozorovat u vláken 10 m dlouhých, které jsou daleko více odchýleny od hodnoty útlumu z doby před ozářením, a to díky délce vlákna, které je vytaveno gama záření.

8.2.3 Studium efektu foto-bělení

Při studiu foto-bělení (Photobleaching) efektu byla použita dvě 3 m dlouhá erbiem dotovaná optická vlákna, která byla ozářena stejnou dávkou gama záření, a to 512 Gy s rychlostí ozařování 6 Gy/h. Jedno vlákno bylo použito jako reference, která určovala přirozenou relaxaci optického vlákna a druhé vlákno bylo v krátkodobých intervalech vystavováno výkonovému optickému signálu na vlnové délce 980 nm o výkonu 68 mW.

Průběhem relaxace byla provedena série krátkodobých intervalů (bělicích intervalů), kdy byl výkonový laser na vlnové délce 980 nm zapnutý. Měření započalo v době těsně po vyjmutí vláken z ozařovny, kdy byla vlákna zapojena k měřicím přístrojům. V první den po ozáření byl aplikován první bělicí interval o délce 30 minut, následoval stejně dlouhý interval po 30 minutách po konci prvního intervalu. Posléze následovaly v dalším průběhu bělicí intervaly o délce 3 hodiny až do ustálení optického útlumu obou optických vláken.

Měřen byl optický útlum vždy před provedeným bělicím intervalem a po provedeném intervalu, kdy při měření tohoto útlumu nebyl zapnut výkonový laser s vlnovou délkou 980 nm. Zkoumány byly hodnoty útlumu na čtyřech vlnových délkách 1310, 1490, 1550 a 1625 nm, na kterých přístroj OFT-4212 dokáže měřit optický výkon. Optický útlum optických vláken s dotací erbia byl změřen vždy před a po jednotlivých "bělicích" intervalech a změřené výsledky jsou uvedeny v Tabulce 10.

Společně se změřenými daty je zaznamenaný v Tabulce 10 také rozdíl optického útlumu, který byl změřen před a po provedeném bělicím intervalu. Také je zaznamenaný den od ozáření, kdy bylo bělení provedeno a délka bělicího intervalu. Společně se zkoumaným vláknem byly rozdíly vypočítány i pro vlákno neovlivněné referenční optické vlákno.

Z naměřených dat vyplývá, že vláknu, které bylo běleno laserem s optickým výkonem 68 mW na vlnové délce 980 nm, se po dvou bělicích intervalech o délce 30 minut snížil optický útlum maximálně o 3,21 dB, a to na vlnové délce 1310 nm. Nejmenší pokles byl pozorován na vlnové délce 1625 nm, a to pokles o 1,89 dB. Na vlnové délce 1550 nm, na které erbiem dotované vlákno operuje byl změřen pokles optického útlumu 2,25 dB. Za dobu měření ovlivňovaného vlákna poklesl útlum referenčního vlákna na vlnové délce 1310 nm o 0,06 dB, na vlnové délce 1550 nm a 1625 nm o 0,05 dB. Rozdíl mezi ovlivněným a neovlivněným vláknem tvořil na vlnové délce 1310 nm 3,15 dB, na vlnové délce 1550 nm 2,20 dB a na vlnové délce 1625 byl rozdíl 1,84 dB.

Při následném provedení bělicích intervalů o délce trvání 3 hodiny, které byly prováděny od 7. dne po ozáření, byl pozorován již vliv menší a při každém pulzu se snižoval. Celkový rozdíl mezi vláknem referenčním a tím, které podstoupilo intervaly foto bělení bylo změřeno nejvíce na vlnové délce 1310 nm o hodnotě 0,68 dB, nejméně pak 0,34 dB na vlnové délce 1625 nm. Rozdíl poklesů optického útlumu na vlnové délce 1550 nm činil 0,41 dB.

Tabulka 10: Změřené hodnoty optického útlumu a změny optických útlumů před a po každé z 30 minutových a 3 h period vystavení laserovému záření 980 nm s výkonem 68 mW. Pro ovlivněné a referenční erbiem dotované optické vlákno.

Den po ozáření	Délka pulzu [min]	Vlnová délka [nm]	Testované Er ³⁺ optické vlákno			Referenční Er ³⁺ optické vlákno		
			Útlum před periodou [dB]	Útlum po periodě [dB]	Rozdíl útlumu [dB]	Útlum před periodou [dB]	Útlum po periodě [dB]	Rozdíl útlumu [dB]
1	30	1310	-12,64	-10,06	2,58	-11,46	-11,42	0,04
		1490	-24,41	-22,52	1,89	-22,67	-22,66	0,01
		1550	-22,38	-20,53	1,85	-20,21	-20,20	0,01
		1625	-10,13	-8,61	1,52	-8,03	-8,02	0,01
1	30	1310	-10,06	-9,43	0,63	-11,42	-11,40	0,02
		1490	-22,52	-22,12	0,40	-22,66	-22,63	0,03
		1550	-20,53	-20,13	0,40	-20,20	-20,16	0,04
		1625	-8,61	-8,24	0,37	-8,02	-7,98	0,04
7	180	1310	-7,36	-7,01	0,35	-10,90	-10,76	0,14
		1490	-19,92	-19,66	0,26	-22,30	-22,22	0,08
		1550	-17,84	-17,60	0,24	-20,03	-19,87	0,16
		1625	-6,10	-5,89	0,21	-7,92	-7,78	0,14
10	180	1310	-7,01	-6,83	0,18	-10,18	-10,10	0,08
		1490	-19,66	-19,49	0,17	-21,82	-21,76	0,06
		1550	-17,57	-17,41	0,16	-19,48	-19,37	0,11
		1625	-5,89	-5,76	0,13	-7,46	-7,44	0,02
14	180	1310	-6,83	-6,68	0,15	-9,91	-9,90	0,01
		1490	-19,49	-19,35	0,14	-21,62	-21,61	0,01
		1550	-17,41	-17,27	0,14	-19,27	-19,26	0,01
		1625	-5,71	-5,60	0,11	-7,39	-7,34	0,05
21	180	1310	-6,69	-6,58	0,11	-9,90	-9,89	0,01
		1490	-19,41	-19,30	0,11	-21,46	-21,45	0,01
		1550	-17,36	-17,27	0,11	-19,11	-19,10	0,01
		1625	-5,60	-5,52	0,08	-7,24	-7,20	0,04
31	180	1310	-6,58	-6,49	0,09	-9,39	-9,39	0,00
		1490	-19,30	-19,23	0,07	-21,24	-21,24	0,00
		1550	-17,25	-17,19	0,06	-18,88	-18,85	0,03
		1625	-5,52	-5,46	0,06	-7,02	-7,02	0,00
34	180	1310	-6,49	-6,45	0,04	-9,09	-9,09	0,00
		1490	-19,25	-19,23	0,02	-21,09	-21,09	0,00
		1550	-17,19	-17,17	0,02	-18,65	-18,65	0,00
		1625	-5,46	-5,46	0,00	-6,76	-6,75	0,01

Při druhém experimentu byly použity dva vzorky vláken dotovaných erbiem s označením I-12(980/125)HC a délkou 3 metry. Tyto vzorky byly ozářeny dávkou gama záření 200 Gy s dávkovým příkonem 5,3 Gy/h. a následně byl jejich útlum sledován na přístroji OFT-4212. Jedno vlákno pak bylo ovlivňováno bělicími intervaly dlouhými 1 hodinu a druhé bylo ponecháno relaxaci vlastní a bylo použito jako reference. V průběhu 6 dní po ozáření bylo celkově aplikováno 14 těchto bělicích intervalů a při těchto intervalech byl útlum měřen vždy před a po provedeném intervalu, tedy stejně, jako to bylo měřeno při prvním experimentu. Rozdíly mezi útlumy před a po provedeném bělicím intervalu byly počítány pro každou měřenou vlnovou délku, jimiž byly 1310, 1490, 1550 a 1625 nm a výsledky jsou uvedeny v tabulce 11.

Tabulka 11: Změřené a vypočítané rozdíly změny optických útlumů před a po každé 1 h bělicí periodě, pro ovlivněné a referenční erbiem dotované optické vlákno.

vlnová délka [nm]		Rozdíl optických útlumů před a po periodě [dB]							
		Testované vlákno				Referenční vlákno			
		1310	1490	1550	1625	1310	1490	1550	1625
1. den po ozáření	interval č.: 1	1	0,80	0,78	0,77	0,07	0,06	0,06	0,11
	2	0,26	0,20	0,20	0,19	0,05	0,05	0,04	0,01
2. den po ozáření	interval č.: 3	0,15	0,15	0,14	0,08	0,06	0,02	0,03	0,03
	4	0,22	0,15	0,13	0,19	0,04	0,02	0,02	0,10
	5	0,14	0,11	0,11	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00
	6	0,11	0,10	0,10	0,11	0,04	0,00	0,00	0,03
5. den po ozáření	interval č.: 7	0,10	0,10	0,08	0,03	0,00	0,02	0,00	0,00
	8	0,08	0,04	0,03	0,00	0,04	0,01	0,00	0,00
	9	0,06	0,03	0,04	0,05	0,02	0,01	0,02	0,05
	10	0,03	0,02	0,02	0,12	0,03	0,02	0,00	0,12
6. den po ozáření	interval č.: 11	0,03	0,05	0,04	0,00	0,04	0,04	0,02	0,00
	12	0,03	0,00	0,00	0,09	0,01	0,02	0,00	0,08
	13	0,01	0,03	0,00	0,06	0,04	0,00	0,00	0,00
	14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,00	0,00
celkový rozdíl útlumu		2,22	1,78	1,67	1,71	0,48	0,30	0,20	0,53

V tabulce 11 jsou zaznamenány změny útlumu před a po provedeném bělicím intervalu pro vzorek ovlivňovaný a referenční a je zde také zaznamenán den provedení každého intervalu. První den byly provedeny dva bělicí intervaly s délkou 1 h a s jedno hodinovou přestávkou mezi intervaly a následně vždy po čtyřech intervalech opět se stejně dlouhými přestávkami mezi intervaly v druhém, pátém a šestém dni po ozáření. Na posledním řádku této tabulky je také zaznamenán celkový rozdíl hodnot optického útlumu před započítáním foto-bělení a po skončení všech bělicích pulzů pro oba měřené vzorky.

Z naměřených výsledků vyplývá, že největší celkový pokles optického útlumu, a to o 2,22 dB je na vlnové délce 1310 nm. Rozdíl oproti referenčnímu vzorku pak tento pokles činil 1,74 dB. Nejmenší rozdíl mezi vzorky byl pozorován naopak na vlnové délce 1625 nm, kde tento rozdíl činil 1,18 dB. Na vlnové délce 1550 nm, kde erbiem dotované vlákno je v optických komunikacích provozováno, rozdíl v poklesech útlumu mezi vzorkem ovlivněným výkonem 68 mW na vlnové délce 980 nm a mezi referenčním optickým vláknem činil 1,47 dB.

Při experimentu foto-bělení se vzorky I-12(980/125)HC bylo také měřeno optické zesílení pro vlnovou délku vstupního signálu 1550 nm. Toto měření bylo provedeno před ozáření, po ozáření před započítáním bělicích intervalů a po provedení všech bělicích intervalů. V těchto časových bodech bylo měřeno optické zesílení pro dvě vlnové délky čerpání na vlnových délkách 980 a 1480 nm při dopředné metodě čerpání. V průběhu foto-bělení po každém bělicím intervalu byla hodnota optického zesílení přeměřena. Při průběžném měření bylo měřeno optické zesílení pouze pro dopřednou metodu čerpání na vlnové délce 980 nm a výkonem 68 mW, tedy byla použita stejná konfigurace a laser jako pro vyvolání efektu foto-bělení.

Výsledky optického zesílení z měření před ozáření, před foto-bělením a po všech foto-bělicích intervalech jsou shrnuty tabulky 12, kde jsou zapsány výsledky opět pro obě vlákna (jedno, které bylo ovlivňováno výkonem 68 mW na vlnové délce 980 nm, a druhé vlákno referenční, které bylo ponecháno přirozené relaxaci).

Tabulka 12: Zesílení před a po všech provedených foto-bělicích periodách erbiem dotovaných vláken ozářených dávkou 200 Gy.

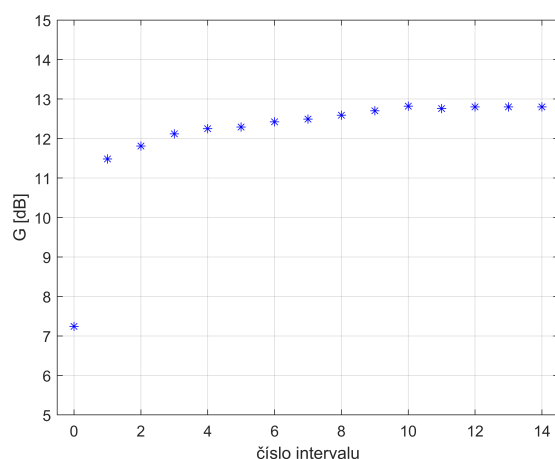
Vlnová délka čerpacího laseru [nm]	Vlákno	Optické zesílení [dB]			Rozdíl zesílení způsobený foto-bělením [dB]
		před ozáření	po ozáření	po foto-bělení	
980	Ovlivněné	16,9	7,2	12,8	5,6
	Referenční	17,0	7,2	9,0	1,8
1480	Ovlivněné	19,1	13,9	18,4	4,5
	Referenční	19,0	13,7	14,7	1,0

Výsledky v tabulce 12 ukazují, že zesílení před ozáření a po vytažení vláken z ozařovací komory je u obou ozářených a měřených vzorku velice podobná, kdy je rozdíl maximálně 0,2 dB. Po provedeném foto-bělení byl pozorován rozdíl v zesílení mezi vzorky ovlivněným a referenčním, kde vlákno ovlivněné vykazovalo o 3,8 dB větší optické zesílení než vlákno referenční pro čerpání na vlnové délce 980 nm. Pro čerpání na vlnové délce 1480 nm byl rozdíl v optickém zesílení mezi vzorky 3,7 dB.

Také byl měřen rozdíl mezi zesílením v době po ozáření a po foto-bělení. Zde bylo pozorováno navýšení zesílení o 5,6 dB při aplikaci foto-bělení a čerpání na vlnové délce 980 nm a navýšení zesílení o 4,5 dB pro vlákno ovlivněné při použití čerpacího laseru s vlnovou délkou 1480 nm. Zatímco vlákno referenční zvedlo svoje optické zesílení o 1,8 dB pro čerpání na vlnové délce 980 nm a 1,0 dB pro čerpání na vlnové délce 1480 nm.

Jak již bylo zmíněno výše, pro foto-bělené erbiem dotované vlákno bylo měřeno po každém provedeném bělicím intervalu provedeno měření zesílení při čerpání na vlnové délce 980 nm dopředným čerpáním. Výsledky tohoto měřeného zesílení jsou uvedeny na obrázku 24.

Na obrázku 24 je znázorněna závislost zesílení na počtu provedených pulzů, kde v bodě 0 počtu intervalů je uvedena hodnota před započítáním foto-bělení. Z grafu je patrné, že první aplikovaný interval, který trval jednu hodinu byl nejefektivnější a je patrné zvýšení optického zesílení. Od 10. bělicího intervalu již změna zesílení nebyla rozpoznatelná a byla na úrovni chyby měření.

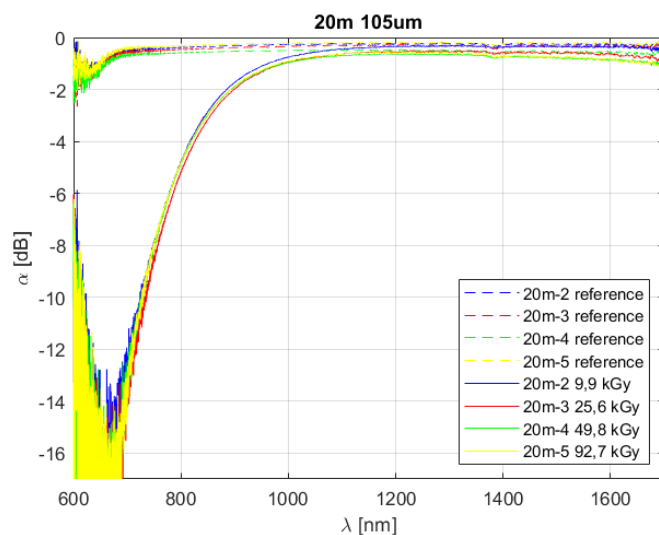


Obrázek 24: Průběh měřeného zesílení foto-běleného erbiem dotovaného optického vlákna pro metodu dopředného čerpání na vlnové 980 nm s výkonem 68 mW v závislosti na počtu provedených bělicích intervalů. Po ozáření 200 Gy dávkovým příkonem 5,3 Gy/h.

8.3 Výsledky měření optického útlumu vláken s průměrem jádra 105 μm

Posledním typem vláken, které byly zkoumány v experimentech při řešení této diplomové práce, byly vlákna s průměrem jádra 105 μm . Šest vzorků dvacetimetrových a dva vzorky desetimetrové byly využity pro testování vlivu dávek gama záření na tento typ vláken.

Prvním experimentem byly testovány vlákna na pomalé ozařování dávkovým příkonem 5 Gy/h v ozařovně PANOZA, kde byly postupně vzorky dvacetimetrových vláken (vzorky 20m-2 až 20m-5) ozařovány na dávky 9,9, 25,6, 49,8 a 92,7 kGy. U těchto vzorků byla, stejně jako při předešlých výše popsaných experimentech, změřena spektrální charakteristika těsně po převozu do laboratoří PLANIO a tyto charakteristiky byly porovnávány s charakteristikami, změřenými v době před ozářením. Tyto charakteristiky jsou znázorněny na obrázku 25.



Obrázek 25: Spektrální charakteristika optického útlumu vzorků 20 m vláken před a po ozáření dávkami 9,9 kGy (20m-2), 25,6 kGy (20m-3), 49,8 kGy (20m-4) a 92,7 kGy (20m-5) s dávkovým příkonem 5 Gy/h.

Na tomto obrázku jsou tedy znázorněny stejné vzorky v době před ozářením, které jsou znázorněny čárkovanými čarami, a v době po ozáření, jež jsou znázorněny plnou čarou. Z těchto průběhů je patrné, že efekt gama záření ovlivnil vlákna pro určité spektrum, kde pro vlnové délky do 1100 nm je pozorován výrazný nárůst optického útlumu oproti stejným vzorkům z doby před ozářením. Tento optický útlum se s narůstající vlnovou délkou konstantně snižuje. Nad vlnovou délkou 1100 nm je pak rozdíl útlumu v době po ozáření a před ozářením je velmi malý. Pozorovaný rozdíl hodnot optických útlumů může být také přisouzen chybě vznikající na konektorech při spojování optických vláken. Také nejsou pozorovány rozdíly optického útlumu ve spektru mezi vzorky, které byly ozářeny různými dávkami.

Po měření spektrálních charakteristik byla tato optická vlákna připojena na přístroj OFT-4212, kde byl měřen optický útlum v průběhu času po ozáření. Do tabulky 13 byly vyneseny záznamy optického útlumu změřené u každého vzorku před ozářením a následně také první den po ozáření, ze kterých byl také určen parametr RIA, určující ovlivnění vzorků gama zářením. Vyneseny jsou také záznamy optického útlumu z 20. dne po ozáření, kde je sledována změna útlumu při relaxaci optických vláken.

Tabulka 13: Výsledky optického útlumu vláken s průměrem jádra 105 μm po ozáření dávkami 9,9 kGy, 25,6 kGy, 49,8 kGy a 92,7 kGy s dávkovým příkonem 5 Gy/h v ozařovně PANOZA.

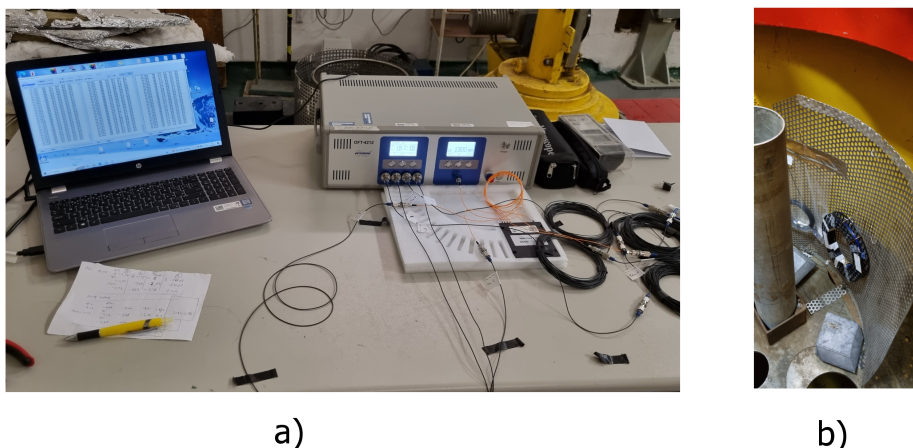
Dávka gama záření [kGy]	Vlnová délka [nm]	Optický útlum [dB]			RIA [dB/m] (1. den)
		před ozářením	1. den po ozáření	20. den po ozáření	
9,9	850	-0,36	-2,44	-2,41	0,10
	980	-0,27	-0,52	-0,66	0,01
	1300	-0,25	-0,31	-0,41	0,00
25,6	850	-0,42	-2,58	-2,66	0,07
	980	-0,35	-0,43	-0,44	0,01
	1300	-0,32	-0,35	-0,33	0,00
49,8	850	-0,55	-2,47	-2,29	0,10
	980	-0,50	-0,62	-0,65	0,00
	1300	-0,49	-0,57	-0,43	0,01
92,7	850	-0,28	-1,84	-1,80	0,08
	980	-0,22	-0,56	-0,47	0,02
	1300	-0,21	-0,41	-0,32	0,01

Výsledky optického útlum měřených vzorků na powermetru OFT-4212, které jsou zobrazeny v tabulce 13, potvrzují měření na spektrálním analyzátoru. Měřené hodnoty největšího optického útlumu a také největšího ovlivnění gama zářením (parametr RIA) byl pozorován na vlnové délce 850 nm, kde RIA dosahovala hodnot 0,10 dB/m. Na vlnové délce 1300 nm byly pozorovány změny optického útlumu vlivem ozáření maximálně 0,01 dB/m, kde byla RIA nejmenší.

Mezi vzorky 20 metrů dlouhých optických vláken s průměrem jádra 105 μm , které byly ozářeny dávkami 9,9 kGy, 25,6 kGy, 49,8 kGy a 92,7 kGy s dávkovým příkonem 5 Gy/h, nebyl pozorován nezanedbatelný rozdíl, tedy rozdíly mezi různě ozářenými vzorky byly na úrovni chyby měření. V průběhu následných 20ti dní se útlum vláken také neměnil více, než byla chyba měření. Tato chyba byla způsobena jednak samotným měřicím přístrojem a také nekonstantní teplotou, která se během měření pohybovala v rozmezí 18,8 až 21,1°C.

Druhý experiment, který byl proveden s vlákny s průměrem jádra $105 \mu\text{m}$, byl experiment pozorování změny optického útlumu v průběhu rychlého ozařování v ozařovně ROZA, kdy byl aplikován dávkový příkon dávka 181 kGy s dávkovým příkonem $1,9 \text{ kGy/h}$. Ozařované byly dvě délky optických vláken 10 a 20 metrů a byly porovnávány s referenčními vzorky stejně dlouhými. Testovaná optická vlákna byla měřena na třech vlnových délkách 850 , 980 a 1300 nm v průběhu celého ozařování a data byla zaznamenávána na připojený řídicí počítač každých deset minut.

Samotné měření optického útlumu bylo provedeno na přístroji OFT-4212, který byl umístěn u ozařovací komory ROZA a do komory vedly pouze přípojné 10 metrová optická vlákna skrze průchodky, kde byly připojeny k ozařovaným vzorkům 10 a 20 metrů dlouhým (vzorky ROZA-10m-oz a ROZA-20m-oz). Fotografie z prováděného měření z ozařovny ROZA je uvedeno na obrázku 26, kde na obrázku 26 a) je zobrazen přístroj OFT-4212, k němuž jsou připojeny vzorky referenční a ozařované pomocí přípojných vláken, a také řídicí počítač, kam byly ukládány naměřené výsledky. Na obrázku 26 b) je pak fotografie z ozařovací studny ROZA, do které jsou pak ozařované vzorky optických vláken umístěny ozařované vzorky nastavené v ozařovací komoře ROZA.



Obrázek 26: Fotografie měřicího pracoviště a) měřicí přístroj OFT-4212 a řídicí počítač. b) Fotografie Fotografie ozařovaných vzorků umístěných v ozařovně ROZA.

Měření a ukládání naměřených optických útlumů pro jednotlivé vzorky započalo těsně před vložením kobaltového zářiče do ozařovny k optickým vláknům a plánováno bylo ukončit měření a ukládání dat v době po ukončení ozařování. V průběhu měření však došlo k výpadku připojeného počítače, jejímž důsledkem bylo přerušení ukládání naměřených do souboru v počítači.

Tento výpadek nastal při dosažení dávky 161 kGy a došlo k němu $10,5$ hodiny před ukončením ozařování, které celkově trvalo $94,3$ hodin a skončilo při obdržené dávce gama záření 181 kGy . Ukládání dat bylo následně obnoveno těsně před skončením ozařování, kdy byla provedena i recalibrace přístroje OFT-4212.

Naměřené výsledky optických útlumů ozářených vláken 10 a 20 metrů dlouhých (vzorky ROZA-10m-oz a ROZA-20m-oz) jsou shrnuty v tabulce 14. Zde jsou výsledky optického útlumu pro vlnové délky 850 , 980 a 1300 nm v době po připojení vláken v ozařovací komoře před ozářením, následně v době výpadku ukládání naměřených dat a také poslední měření při dosažení dávky 181 kGy s dávkovým příkonem $1,9 \text{ kGy/h}$. Také je uveden vypočítaný parametr RIA pro hodnoty optických útlumů vláken při dosažení dávky 181 kGy .

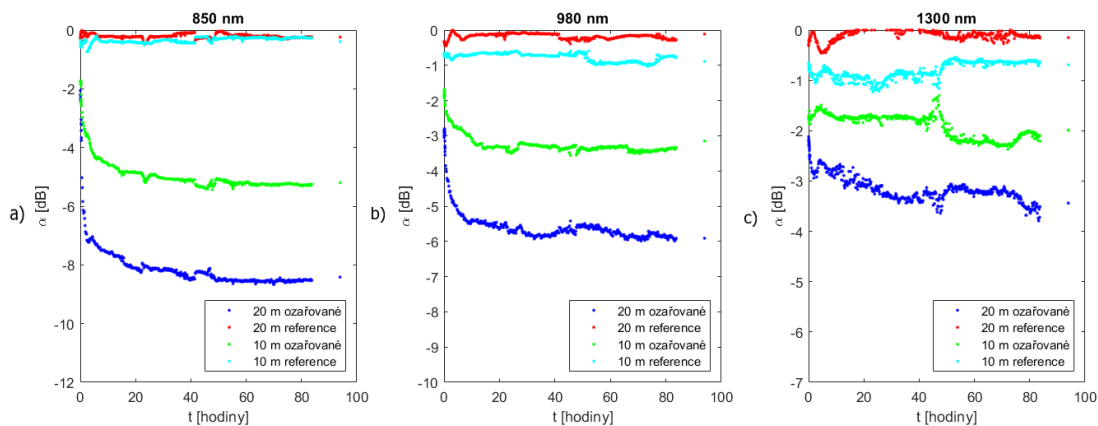
Tabulka 14: Výsledky optického útlumu vláken s průměrem jádra 105 μm v průběhu ozařování na dávku 181 kGy s dávkovým příkonem 1,9 kGy/h v ozařovně ROZA.

Měřený vzorek	Vlnová délka [nm]	Optický přenos [dB]			RIA [dB/m] (při dávce 181 kGy)
		před ozářením	při dosažení dávky 161 kGy*	při dosažení dávky 181 kGy	
10 m (ROZA-10m-oz)	850	-1,76	-5,25	-5,20	0,34
	980	-1,87	-3,33	-3,15	0,13
	1300	-1,73	-2,21	-1,99	0,02
20 m (ROZA-20m-oz)	850	-2,06	-8,52	-8,42	0,32
	980	-2,85	-5,91	-5,91	0,15
	1300	-2,19	-3,51	-3,44	0,06

* ... Hodnoty útlumu těsně před přerušením ukládání změřených dat

Vliv rychlého ozařování na vzorky optických vláken s průměrem jádra 105 μm je znatelný, kdy největší vliv byl pozorován na vlnové délce 850 nm pro obě délky optického vlákna (10 a 20 metrů). Díky vlivu gama záření stoupl optický útlum u vzorku dlouhého 10 m o 0,34 dB/m a u vzorku dlouhého 20 metrů byl pozorován nárůst optického útlumu o 0,32 dB/m.

Z tabulky 14 je patrné, že gama záření, se vzrůstající vlnovou délkou, ztrácí svůj vliv na ozařovaný vzorek. To také dokládají výsledky na vlnové délce 1300 nm kdy vliv na 20metrové vlákno byl 0,06 dB/m a na 10 metrů dlouhé vlákno byl vliv 0,02 dB/m. Zároveň je z tabulky patrné, že mezi dobou, kdy vypadl řídicí počítač a dobou, kdy skončilo ozařování, se hodnoty útlumu více nezvyšovaly. Tento časový průběh je znázorněn na obrázku 27, kde jsou zobrazeny průběhy měnícího se optického útlumu v čase pro vlákna ozařovaná a referenční dvou délek 10 a 20 m. Průběhy jsou pak uvedeny pro tři měřené vlnové délky 850 nm (obrázek 27 a)), 980 nm (obrázek 27 b)) a 1300 nm (obrázek 27 c)).



Obrázek 27: Průběh hodnot optického útlumu v závislosti na čase ozařování pro optická vlákna s průměrem jádra 105 μm v ozařovně ROZA. Průběhy hodnot na vlnové délce a) 850 nm, b) 980 nm a c) 1300 nm.

Z grafů na obrázku 27 vyplývá, že největší nárůst optického útlumu na ozařovaných vzorcích nastal těsně po započatí ozařování. Další navyšování optického útlumu u ozařovaných vzorků postupně ustávalo.

Následně po vytažení vzorků z ozařovací komory a převozu vzorků a měřicího přístroje do laboratoří PLANIO, byl měřen optický útlum v průběhu času po ozáření. Z tohoto měření byly do tabulky 15 vyneseny hodnoty optického útlumu z prvního dne po ukončení ozařování. Také jsou zde zaznamenány hodnoty optického útlumu z 20. dne po ozáření, kdy byly již hodnoty útlumu již ustáleny.

Tabulka 15: Výsledky optického útlumu vláken s průměrem jádra 105 μm po ozáření dávkou 181 kGy.

Délka vlákna [kGy]	Vlnová délka [nm]	Optický přenos [dB]			RIA [dB/m] (1. den)
		před ozářením	1. den po ozáření	20. den po ozáření	
10	850	-0,54	-2,22	-1,57	0,17
	980	-0,65	-1,29	-1,03	0,07
	1300	-0,51	-0,79	-0,74	0,03
20	850	-0,24	-3,81	-2,97	0,18
	980	-0,35	-1,67	-1,16	0,07
	1300	-0,27	-1,18	-0,91	0,05

Tabulka 15 uvádí také parametr RIA, který byl určený pro obě délky optických vláken a pro tři vlnové délky 850, 980 a 1300 nm. Pro naměřené výsledky je pak patrné, že největších hodnot tento parametr dosahuje na vlnové délce 850 nm, kde dosahuje 0,17 dB/m pro vlákno dlouhé 10 m a 0,18 dB/m pro vlákno 20 m. Nejmenší hodnot naopak parametr RIA dosahoval pro obě vlákna na vlnové délce 1300 nm, kde je hodnota pro parametr RIA 0,03 dB/m pro vlákno dlouhé 10 m a 0,05 dB/m pro vlákno dlouhé 20 m.

9 Závěr

Předložená diplomová práce se zabývá měřeními vlastností optických vláken a optických kabelů, vystavených účinkům gama záření. V rámci diplomové práce jsem provedl experimenty s optickými kabely CTDS a CTFS, optickými vlákny dotovanými erbiem a mnohavidovými optickými vlákny s průměrem jádra $105 \mu\text{m}$. Vzorčky byly vystaveny pomalému, a nebo rychlému ozařování gama zářením. Studoval jsem změny optického útlumu v důsledku ozáření. Prováděl jsem toto měření také po ukončení ozařování a měřil jsem vliv relaxace. V případě erbiem dotovaného vlákna jsem sledoval také změny zesílení.

Při studiu optických kabelů CTDS a CTFS, které byly ozářeny dávkou $80,5 \text{ kGy}$ pomalého ozařování s dávkovým příkonem $5,5 \text{ Gy/h}$, jsem se zaměřil na měření rozdílu optického útlumu z doby před ozářením a doby po ozáření. Tento rozdíl jsem vyjadřoval pomocí parametru RIA, který uvádí změnu optického útlumu vlivem gama záření. Také jsem porovnával oba typy kabelů, kde konstrukce CTDS a CTFS kabelů se liší v použití ochranného gelu v kabelu CTFS, který je aplikován mezi optickými vlákny. Při měření byly také porovnávány hodnoty optického útlumu jednotlivých optických vláken mezi sebou.

Z výsledků měření kabelů CTDS vyplynulo, že obecně menší citlivost na gama záření mají vlákna mnohavidová, než žíly tvořené vlákny jednovidovými. Nejmenší změna pak byla pozorována na žíle C s mnohavidovým vláknem s průměrem jádra $50 \mu\text{m}$, kde na vlnové délce 1300 nm byl měřen parametr RIA o velikosti $0,05 \text{ dB/m}$. Největší změna pak byla pozorována na žíle A, kde na vlnové délce 1300 nm parametr RIA dosahoval hodnoty $0,16 \text{ dB/m}$. Obecně byl útlum měřený po ozáření na vlnové délce 1300 nm menší, než na vlnové délce 850 nm a také změna optických útlumů před a po ozáření vykazovala tento trend. Z vláken jednovidových pak nejmenší změnu vykazovalo vlákno v žíle H optického kabelu CTDS. Zde bylo pozorováno navýšení optického útlumu, na vlnové délce 1625 nm , o $0,19 \text{ dB/m}$. Nejhůře obstálo vlákno v žíle D, kde byly pozorovány největší změny útlumu vlivem gama záření. Tyto změny dosahovaly na vlnové délce 1310 nm hodnoty $0,40 \text{ dB/m}$, na 1490 nm byla změna $0,47 \text{ dB/m}$, na vlnové délce 1550 nm byla změřena hodnota $0,36 \text{ dB/m}$ a na vlnové délce 1625 nm byla velikost parametru RIA $0,31 \text{ dB/m}$.

Z žil kabelu CTFS útlum nejméně poklesl vlivem gama záření na žíle B na vlnové délce 1300 nm , kde byl měřen parametr RIA pouze $0,01 \text{ dB/m}$. Největší rozdíl pro mnohavidová vlákna byl pak, stejně jako u kabelu CTDS, měřen na žíle A, kde se jednalo o hodnotu $0,46 \text{ dB/m}$. Mezi vlákny jednovidovými byl změřen nejnižší optický útlum pro žílu H, kde byl na vlnové délce měřen parametr RIA $0,28 \text{ dB/m}$.

Všechny žíly obou kabelů vykazovaly v průběhu relaxace po ozáření pokles útlumu. Po 30 dnech klesl každé žíle kabelu CTDS optický útlum, nejvíce však žíle E na vlnové délce 1310 nm o hodnotu $3,93 \text{ dB}$. Následně 140. den po ozáření rozdíl optického útlumu od 1. dne po ozáření dosáhl $7,14 \text{ dB}$ na vlnové délce 1310 nm . Pro kabel CTFS byl po 30 dnech od ozáření měřen pokles optického útlumu o $3,33 \text{ dB}$ na žíle H a $5,08 \text{ dB}$ po 140. dni od ozáření na vlnové délce 1490 nm .

Při porovnání optických útlumů vláken obou kabelů mezi sebou, vykazují optická vlákna v kabelu CTDS větší odolnost vůči gama ozařování. Na všech žilách a vlnových délkách, kromě žíly B, byl na kabelu CTDS měřen parametr RIA nižší, než na vláknech kabelu CTFS. Toto může být zapříčiněno nabobtnáním ochranného gelu v kabelu CTFS, který negativně působí na optická vlákna.

Druhý experiment se zaměřil na měření vlastností optických vláken s dotací erbia, kdy byla tato vlákna ozařována dávkami 131 Gy , 512 Gy , $1,0 \text{ kGy}$ a 10 kGy dávkovým příkonem 6 Gy/h . Následně jsem pozoroval změny optického útlumu a optického zesílení ozářených vzorků, které

byly dlouhé 3 a 10 m. Tyto vlastnosti byly také sledovány v průběhu času po ozáření v době označované jako relaxace.

Výsledky měření optického útlumu ukázaly, že optický útlum, způsobený gama zářením, se v těchto vláknech zvyšuje s dávkou gama záření. Ze spektrálních charakteristik, které měří optický útlum v závislosti na vlnové délce, bylo zjištěno, že parametr RIA dosahuje vyšších hodnot pro kratší vlnové délky a s prodlužující se vlnovou délkou hodnota tohoto parametru klesá. Dokládá to například měření 3 m dlouhé vlákno při ozáření dávkou 131 Gy, kde má parametr RIA na vlnové délce 1310 nm hodnotu 1,40 dB/m a na vlnové délce 1550 nm hodnota tohoto parametru je pouze 0,89 dB/m.

Také je z naměřených výsledků patrné, že s narůstající délkou je rozdíl optického útlumu, mezi dobou před a po ozáření, úměrně vyšší u 10 m dlouhého vlákna, než u vlákna 3 m. Bylo to možné pozorovat hlavně po ozáření dávkou 131 Gy, kdy 3 m dlouhé erbiem dotované vlákno má optický útlum na vlnové délce 1310 nm -4,73 dB, na rozdíl od vlákna 10 m dlouhého, který má na stejné vlnové délce při stejné dávce ozáření optický útlum -8,20 dB.

Při měření optického útlumu optických vláken s dotací erbia byly změřeny hodnoty pro všechny obdržené dávky kromě dávky 10 kGy. Při této dávce byly měřeny parametry 3 a 10 m dlouhých optických vláken, avšak útlum na obou délkách vláken byl příliš vysoký, než aby mohl být změřen. Dávka 1,0 kGy, která byla aplikována na obě délky optických vláken, způsobila stejný neměřitelný optický útlum pro vlákno dlouhé 10 m.

Při studiu zesílení erbiem dotovaných vláken jsem provedl měření pro dvě vlnové délky čerpání 980 a 1480 nm o výkonu 68 mW, které jsem přivedl do vlákna dopřednou a zpětnou metodou čerpání. Následně jsem pro vzorky ozářené dávkou 131 Gy proměřil průběh měnicího se optického zesílení pro obě délky (3 a 10 m) erbiem dotovaných vláken. U tohoto měření bylo využito také obousměrné metody čerpání pro každou vlnovou délku.

Z naměřených výsledků optického zesílení z doby před ozářením dosahovalo optické vlákno v zapojení jako zesilovač nejvyššího zesílení při konfiguraci obousměrného čerpání na vlnové délce 1480 nm, kde bylo dosaženo zisku 11,5 dB pro 3 m dlouhé vlákno a 27,9 dB pro vlákno 10 metrové. Tato metoda čerpání vykazuje hodnoty vyšší než při obousměrném čerpání na vlnové délce 980 nm a konfiguraci zpětné metody čerpání na vlnové délce 1480 nm, kde byly měřeny hodnoty 11,1 dB pro 3 m a 26,2 dB pro 10 metrů dlouhé vlákno. Po gama ozáření hodnoty optického zesílení u všech ozářených vzorků klesly, vlivem nárůstu optického útlumu měřeného vlákna. Pro dávku 131 Gy se jeví nepatrně lepší čerpání na vlnové délce 980 nm, kde byla dosažena hodnota optického zesílení 7,5 dB pro zpětnou metodu čerpání, oproti čerpání na vlnové délce 1480 nm, kde bylo dosaženo zesílení 6,2 dB pro stejnou metodu čerpání.

Při dávce ozáření 1,0 kGy se však hodnoty zesílení pro použití různých vlnových délek čerpacího laseru začínají výrazně odlišovat ve prospěch čerpání na vlnové délce 1480 nm. Zde bylo dosaženo zpětného čerpání s laserem na vlnové délce 1480 nm -2,6 dB, zatím co při zpětném čerpání na vlnové délce 980 nm bylo dosaženo, -11,4 dB. U obou hodnot však je patrné, že optický útlum převážil schopnost zesilování vlákna. Na rozdíl od 10 m dlouhého vlákna, kde při dávce 131 Gy bylo dosaženo pro konfiguraci s čerpáním na vlnové délce 1480 nm zesílení maximálně 10,2 dB, pro stejnou konfiguraci s laserem 980 nm bylo zesílení sníženo optickým útlumem vlákna natolik, že je zde měřen útlum o velikosti -2,2 dB.

Obecně lze z naměřených výsledků usuzovat, že čerpání na vlnové délce 1480 nm je efektivnější, než čerpání na vlnové délce 980 nm. Možnou příčinou pak může být útlum způsobený gama zářením, který na kratších vlnových délkách dosahuje vyšších hodnot, a tak tlumí čerpání na vlnové délce 980 nm více, než na vlnové délce 1480 nm a díky tomu není plně využit optický výkon čerpacího laseru.

Pro vzorky optických vláken o délce 3 a 10 m byly měřeny průběhy zesílení při relaxaci. Z těchto průběhů vyplývá, že nejvýraznější obnova optického zesílení po obdržené dávce probíhá v prvních dnech po ozáření a ustaluje se okolo 35 dne po ozáření.

Na vzorcích erbiem dotovaných vláken jsem také ověřoval jev zvaný foto-bělení, který jsem vyvolával čerpacím laserem na vlnové délce 980 nm s výkonem 68 mW. Dva experimenty, při nichž jsem se zaměřil jednak na změnu optického útlumu, vyvolanou fotobělením, ale následně také na změnu optického zesílení.

Výsledky prvního měření, které byly změřeny při porovnání optického útlumu vlákna fotoběleného a vlákna referenčního, bylo zjištěno, že po sérii 8 bělících intervalů o délce 30 min a následně 3 h, trvajících dohromady 19 h, tento rozdíl činil 3,15 dB, a to na vlnové délce 1310 nm. Na vlnové délce 1550 nm, na které erbiem dotované vlákno standardně provozováno, byl rozdíl optického útlumu o velikosti 2,20 dB.

Druhý experiment byl proveden u optického vlákna s dotací erbia, ozářeném dávkou 200 Gy s rychlostí ozařování 5,3 Gy/h. Zde byly provedeny bělící intervaly o délce 1 h a optické vlákno bylo celkově běleno 14 h. Pozoroval jsem rozdíl maximálně 1,74 dB na vlnové délce 1310 nm a na vlnové délce 1550 nm to byl rozdíl 1,48 dB. Při obou měření ovlivněné optické vlákno vykazovalo velkou změnu při prvních provedených intervalech foto-bělení a při pokračujícím foto-bělení se efekt postupně snižoval.

Při druhém měření jsem sledoval i změnu optického zesílení pro dopřednou metodu na dvou vlnových délkách 980 a 1480 nm. Zde byl pozorován rozdíl optického zesílení mezi dobou před a po provedení foto-bělení, kdy vláknu bělenému vzrostla hodnota zesílení o 5,6 dB a referenčnímu optickému vláknu (u kterého nebyl proces foto bělení aplikován) se tato hodnota změnila pouze o 1,8 dB. Tento rozdíl byl pozorován pro čerpání na vlnové délce 980 nm. Při použití čerpacího laseru s pracovní vlnovou délkou 1480 nm bylo pozorováno zlepšení optického zesílení na foto-běleném vlákne o hodnotu 4,5 dB a na referenčním vlákne optický útlum klesl pouze o 1,0 dB.

Poslední experimenty byly zaměřeny na měření vlastností optických vláken s průměrem jádra 105 μm s délkou optických vláken 10 m a 20 m. Bylo provedeno ozařování o rychlosti 5 Gy/h, při niž byla využita ozařovací komora PANOZA, kde byly čtyři vzorky ozářeny dávkami 9,9 kGy, 25,6 kGy, 49,8 kGy a 92,7 kGy a následně byl sledován optický útlum po ozáření. Pro rychlé ozařování, kde byl dávkový příkon 1,9 kGy/h, byla využita ozařovna ROZA. Při rychlém ozařování byl jeden vzorek délky 10 m a jeden vzorek s délkou 20 m optického vlákna ozářen dávkou 181 kGy a optický útlum těchto vzorků byl sledován v průběhu ozáření a následně, po převezení do laboratoří PLANIO byl také relaxační proces v průběhu času po ozáření.

Z měření spektrálních charakteristik optického útlumu po ozáření pomalým ozařováním vyplývá, že gama záření ovlivňuje nejvíce nižší vlnové délky do 1100 nm, nad touto vlnou délkou byly rozdíly útlumu způsobené gama zářením srovnatelná s chybou měření optického útlumu. Parametr RIA, který určuje změnu optického útlumu způsobenou gama zářením, vycházel vyšší pro vlnovou délku 850 nm, kde hodnota dosahovala 0,1 dB/m. Nejmenší hodnota RIA pak byla změřena na vlnových délkách 1300 nm kde se tento parametr pohyboval pouze okolo 0,01 dB/m. Optický útlumu i parametr RIA se, mezi vzorky ozářenými různými dávkami gama záření, výrazněji nelišil a indukovaný optický útlum z gama záření RIA byl v průběhu doby po ozáření konstantní. Z naměřených dat vyplývá, že velikost dávky do 92,7 kGy při pomalém ozařování, nemá na vzorky optických vláken s průměrem jádra 105 μm délky 20 m vliv.

Při rychlém ozařování optických vláken s průměrem jádra $105\ \mu\text{m}$, kdy byl měřen optický útlum v průběhu ozařování, je z výsledků měření patrný nárůst optického útlumu v začátku ozařování a optický útlum se v průběhu pěti dní ozařování postupně ustaloval na maximální hodnoty $-5,25\ \text{dB}$ pro vlákno dlouhé $10\ \text{m}$ a $-8,42\ \text{dB}$ pro vlákno $20\ \text{m}$ měřené na vlnové délce $850\ \text{nm}$. Zde parametr RIA dosáhl maximálně $0,34\ \text{dB/m}$ na vlnové délce $850\ \text{nm}$ a pro obě délky vlákna byla hodnota tohoto parametru na každé měřené vlnové délce podobná. Na vlnové délce $980\ \text{nm}$ vycházel parametr RIA maximálně $0,15\ \text{dB/m}$ a na vlnové délce $1300\ \text{nm}$ byl tento parametr maximálně $0,06\ \text{dB/m}$ (obě hodnoty byly měřeny na vlákne 20 m dlouhém).

Reference

- [1] MASOPUSTOVÁ, Kateřina. *Měření vlastností optických vláken a kabelů pro případné použití v extrémních podmínkách*. Praha, 2022. Diplomová práce. ČVUT v Praze Fakulta elektrotechnická.
- [2] ZIKMUND, Marek. *Studium vlastností optických vláken s dotací ionty erbia*. Praha, 2021. Bakalářská práce. ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická.
- [3] Optická trasa a její součásti [online] Optoelektrotechnika. publi.cz ©2011-2023. [cit. 16.3.2023]. Dostupné z:<https://publi.cz/books/185/07.html>.
- [4] ČERVENKA, Dušan, Bc. *METODY ŘEŠENÍ VLIVU OPTICKÉ DISPERZE NA STÁVAJÍCÍCH OPTICKÝCH SÍŤÍCH*. Brno, 2011. Diplomová práce. VUT v Brně Fakulta elektrotechniky a komunikační techniky ústav telekomunikací.
- [5] Mode field diameter [online] Fibercore. Humanetics ©2023. [cit. 17.3.2023]. Dostupné z: <https://fibercore.humaneticsgroup.com/services-support/fiberpaedia/m/mode-field-diameter-mfd>.
- [6] BHUMIK, Sudipta a Andrew MCGRATH. Differences between OM1, OM2, OM3, OM4, OS1, OS2 fiber optic cable nomenclatures Sterlight Tech, Prosinec 2013, [online] [cit. 16.3.2023]. převzato z: https://www.stl.tech/optical-interconnect-products/opticalfibre/pdf/Differences_between_OM1_OM2_OM3_OM4_.pdf.
- [7] SALEH, Bahaa E.A. a Malvin C. TEICH *Fundamentals of Photonics*, New York, N.Y.: © John Wiley & Sons, Inc. 1991. ISBN 0-471-2-1374-8.
- [8] POLMAN, A. *Erbium as a probe of everything?*, Physica B: Condensed Matter, Kruislaan 407, 1098 SJ Amsterdam, The Netherlands 2001, 300. ročník, str. 78-90. ISSN 0921-4526.
- [9] MLEJNEK, Zbyněk. *Optické zesilovače* [online], Brno, 2008 [cit. 20.4.2023]. Bakalářská práce. VUT v Brně. Převzato z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=8652.
- [10] MIHAIL-RAZVAN, Ioan, Cristian POSTOLACHE, Viroel FUGARU, S. BARCEA, Aurelia CELAREL a C. CENUSA. *Computational method for the determination of intense gamma-rays sources activity by using GEANT4*. Romanian Reports v publikaci: Physics. 2018.
- [11] KIM, Youngwoong, Seongmin JU, Seongmook JEONG, Seung Ho LEE, Won-Taek HAN. *Gamma-ray radiation response at 1550 nm of fluorine-doped radiation hard single-mode optical fiber*. Optics Express. 2016. Vydání 24, číslo 4, strana 3920. DOI:10.1364/OE.24.003910
- [12] Radiobiologie. *ZÁŘENÍ GAMA. Kapitola: 1.4.3.* [online], [cit. 10.3.2023]. Dostupné z:<http://fbmi.sirdik.org/1-kapitola/14/143.html>.
- [13] AUBRY, M., A. MORANA A. LAURENT, L. MESCIA, J. MEKKI, N. BALCON, T. ROBIN, E. MARTIN, Y. OUERDANE , A. BOUKENTER , S. GIRARD, *Optimization of the Radiation Response of Backup Optical Fiber Amplifiers for Space Missions*. IEEE Transactions v publikaci: Nuclear Science, ročník 69, no. 7, strany 1500-1505, Červenec 2022, doi: 10.1109/TNS.2022.3142953.

- [14] SAFIBRA. *Ovladač optického zdroje záření OFLS driver* [online], Safibra, s.r.o., ©2023 [cit. 19.4.2023]. převzato z: <https://safibra.cz/produkty/ovladac-optickeho-zdroje-zareni-ofls-driver/>.
- [15] LD-PD INC. *1480nm FP PM Raman Pump Laser Diode* [online], LD-PD Inc. Ltd., ©2012-2023 [cit. 19.4.2023]. Převzato z: <http://www.ld-pd.com/?a=cpinfo&id=500>.
- [16] THORLABS. *SLS201L/M - Stabilized Fiber-Coupled Light Source* [online], Thorlabs, Inc., ©1999-2023 [cit. 19.4.2023]. Převzato z: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=SLS201L/M>.
- [17] THORLABS. *S155C - Compact Fiber Photodiode Power Sensor, InGaAs, 800 - 1700 nm, 20 mW* [online], Thorlabs, Inc., ©1999-2023 [cit. 14.4.2023]. Převzato z: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=S155C>.
- [18] THORLABS. *S415C - Thermal Power Sensor Head, Surface Absorber* [online], Thorlabs, Inc., ©1999-2023 [cit. 14.4.2023]. Převzato z: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=S415C>.
- [19] THORLABS. *Digital Handheld Optical Power and Energy Meter Console* [online], Thorlabs, Inc., ©1999-2023 [cit. 15.4.2023]. Převzato z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=3341.
- [20] YOKOGAWA *Spektrální analyzátor*, [online]. Yokogawa Test & Measurement Corporation ©, 2008-2023 [cit. 19.4.2023]. Převzato z: <https://tmi.yokogawa.com/solutions/products/optical-measuring-instruments/opticalspectrum-analyzer/aq6370d-optical-spectrum-analyzer/>.
- [21] OPTOKON. *OFT-4212 Fiber optic 4-channels optical testing system* [online], OPTOKON, a.s., ©2020 [cit. 16.4.2023]. převzato z: <https://www.optokon.com/product/220-of-4212-fiber-optic-4-channels-optical-testing-system>.
- [22] OPTOKON. *PM-800 Optical Power Meter* [online], OPTOKON, a.s., ©2020 [cit. 12.4.2023]. převzato z: <https://www.optokon.com/product/36-pm-800-g-l-optical-power-meter>.
- [23] OPTOKON. *LS-800 – Light Source* [online], OPTOKON, a.s., ©2020 [cit. 19.4.2023]. převzato z: <https://www.optokon.com/product/37-ls-800-light-source>.
- [24] OPTOKON. *OFT-840 Loss Test Set with RL* [online], OPTOKON, a.s., ©2020 [cit. 12.5.2023]. převzato z: <https://www.optokon.com/product/42-of-840-loss-test-set-with-rl>.
- [25] SAFIBRA. *Ampli kit* [online], Safibra, s.r.o. ©2023 [cit. 19.4.2023] převzato z: <http://www.safibra.cz/ampli-kit>.
- [26] EZ Digital. *OS-5020/5020C Analog Oscilloscope Operation Manual* [online], EZ Digital co., ltd. [cit. 20.4.2023] převzato z: <http://bee.mif.pg.gda.pl/ciasteczkowypotwor/Goldstar/OS-5020%5E1.pdf>.
- [27] FIBERCORE. *High Efficiency C-Band Erbium Doped Fibers*. Product variant: I-4(980/125)HC. ©Humanetics. 2023. převzato z: <https://fibercore.humaneticsgroup.com/products/doped-fiber/erbium-doped-fiber-isogain/high-efficiency-c-band-erbium-doped-fibers/i-4980125hc>.

- [28] FIBERCORE. *L-Band & C-Band Erbium Doped Fibers*. Product variant: I-12(980/125)HC. ©Humanetics. 2023. převzato z: <https://fibercore.humaneticsgroup.com/products/doped-fiber/erbium-doped-fiber-isogain/l-band-c-band-erbium-doped-fibers/i-12980125hc>.
- [29] THORLABS. *FG105LCA - Multimode Fiber, 0.22 NA, Low OH, Ø105 µm Core, 400 - 2400 nm* [online], Thorlabs, Inc., ©1999-2023 [cit. 1.5.2023]. Převzato z: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=FG105LCA>.
- [30] ŠAROUNOVÁ, Z., V. PLAČEK, V. PRAJZLER, K. MASOPUSTOVÁ, P. HAVRÁNEK. *Influence of Optic Cable Construction Parts on Recovery Process after Gamma Irradiation*. Energies. 2022. 15(2):599. Převzato z: <https://doi.org/10.3390/en15020599>.