

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická

Měření vlastností optických vláken pro použití v obtížném prostředí

František Šimůnek

Vedoucí: doc. Ing. Václav Prajzler, Ph.D.
Květen 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Šimůnek** Jméno: **František** Osobní číslo: **499334**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Měření vlastností optických vláken pro použití v obtížném prostředí

Název bakalářské práce anglicky:

Measuring the Properties of Optical Fibers for Use in Harsh Environments

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s teoretickými principy vedení světla v optických vláknových vlnovodech.
- 2) Věnujte pozornost také mnohavidovým vláknovým vlnodům s velkým průměrem jádra včetně polymerních optických vláken.
- 3) Podílejte se na testování vlastností optických vláken vystavených gama zářením.
- 4) Změřte vlastnosti dostupných optických vláken a studujte vliv gama záření na změny vlastností.
- 5) Dosažené výsledky shrňte do zprávy v rozsahu 30-50 stran.

Seznam doporučené literatury:

1. K. Novotný: Optická telekomunikační technika, ČVUT 1998, skripta.
2. L. Boháč, M. Lucki: Optické komunikační systémy, skripta ČVUT v Praze, 2010.
3. K. Masopustová: Měření vlastností optických vláken a kabelů pro případné použití v extrémních podmínkách. Diplomová práce ČVUT v Praze 2022.
4. J. Senior: Optical Fiber Communications: Principles and Practice. Pearson; 3rd edition (December 3, 2008), ISBN-10: 013032681X.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **23.01.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: **21.09.2025**

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

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce, doc. Ing. Václavu Prajzlerovi, Ph.D., za pomoc při řešení bakalářské práce a za cenné připomínky při konzultacích. Dále bych chtěl poděkovat vedoucímu oddělení Radiační chemie a kvalifikace na prostředí Ing. Vítu Plačkovi, Ph.D. (ÚJV Řež, a. s.) za umožnění provedení testů pomocí gama ozařování v ozařovnách ROZA, PRAZDROJ a PANOZA. Také bych chtěl poděkovat panu Ing. Markovi Zikmundovi za technickou pomoc při měření v laboratoři PLANIO (Laboratoř planárních optoelektronických a optických integrovaných struktur) na Katedře mikroelektroniky, Fakultě elektrotechnické na ČVUT v Praze a panu Ing. Martinu Cabalkovi, Ph.D. za pomoc při experimentech gama ozařování 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, 24. května 2024

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá měřením vlastností mnohavidových optických vláken a studiem změny optického útlumu po vystavení účinkům gama záření. Byl také měřen optický útlum vláken po ozáření vzorků gama zářením a byl sledován relaxační proces optických vláken. Optická vlákna jsou využívána v oblastech, kde jsou vystavena gama záření, například ve farmaceutickém průmyslu, vesmírných aplikacích a jaderných elektrárnách.

V práci jsou měřena polymerní optická vlákna s gradientním indexem lomu PMMA (Polymethylmethakrylát) GI-POF (Gradient-Index Plastic Optical Fiber) s průměrem jádra 980 μm , vlákna FONTEX z fluoropolymeru (CYTOP®) s průměrem jádra 55 μm a s dvojitým pláštěm. Dále jsem měřil vlastnosti mnohavidových optických vláken FG050LGA s průměrem jádra 50 μm a FG105LCA s průměrem jádra 105 μm , optická vlákna mají skokovou změnu indexu lomu, jádro z čistého oxidu křemičitého a plášť z oxidu křemičitého dopovaného fluorem.

Byly provedeny tři experimenty, kdy byla vlákna vystavena různě dávkou gama záření s vysokým dávkovým příkonem a s nízkým dávkovým příkonem. Optická vlákna GI-POF a FONTEX byla vystavena gama záření v ozařovací komoře PANOZA o celkové dávce gama záření 31,6 kGy s dávkovým příkonem 51 Gy/h. Dále byla optická vlákna vložena do ozařovací komory ROZA, kde došlo ke krátkodobému ozařování s celkovou dávkou gama záření 19,2 kGy a dávkovým příkonem 0,83 kGy/h. Optická vlákna FG050LGA a FG105LCA byla vložena do ozařovací komory PRAZDROJ, kde proběhlo ozařování s celkovou dávkou gama záření 266 kGy a dávkovým příkonem 1,02 kGy/h.

Po ozáření jsem provedl měření optického útlumu vláken a byl měřen relaxační proces, při kterém dochází ke snižování optického útlumu po ozáření. Dále byly změřeny spektrální charakteristiky před a po ozáření. Optický útlum vláken FONTEX, FG050LGA a FG105LCA byl měřen na vlnových délkách 850 nm, 980 nm a 1300 nm a vláken GI-POF na vlnových délkách 535 nm a 650 nm. Optický útlum vláken FONTEX, FG050LGA a FG105LCA byl po ozáření nejnižší na vlnové délce 1300 nm, u vláken GI-POF na vlnové délce 650 nm.

Výsledkem práce je zhodnocení změn optického útlumu po vystavení účinkům gama záření a porovnání spektrálních charakteristik měřených optických vláken před a po ozáření.

Klíčová slova: Optická vlákna, mnohavidová optická vlákna, plastová optická vlákna, křemenná optická vlákna, optický útlum, spektrální charakteristiky, gama záření

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

Abstract

The bachelor thesis deals with the measurement of the properties of multimode optical fibers and the study of the change of optical attenuation after exposure to gamma radiation. The optical attenuation of the fibers after irradiation of the samples with gamma radiation was also measured and the relaxation process of the fibers was observed. Optical fibers are used in areas where they are exposed to gamma radiation, for example in the pharmaceutical industry, space applications and nuclear power plants.

In this work, polymer optical fibers PMMA (Polymethylmethacrylate) are measured GI-POF (Gradient-Index Plastic Optical Fiber) with a core diameter of 980 μm , FONTEX fluoropolymer (CYTOP®) fibers with a core diameter of 55 μm and double sheath. I also measured the properties of FG050LGA multimode optical fibers with a core diameter of 50 μm and FG105LCA with a core diameter of 105 μm . The optical fibers have a step change in refractive index, a pure silica core, and a fluorine-doped silica cladding.

Three experiments were performed where the fibers were exposed to different doses of high-dose-rate gamma radiation and low-dose-rate gamma radiation. GI-POF and FONTEX optical fibers were exposed to gamma radiation in the PANOZA irradiation chamber, with a total gamma radiation dose of 31.6 kGy with a dose rate of 51 Gy/h. In addition, optical fibers were inserted into the ROZA irradiation chamber, where a short-term irradiation with a total gamma dose of 19.2 kGy and a dose rate 0.83 kGy/h. Optical fibers FG050LGA and FG105LCA were inserted into the PRAZDROJ irradiation chamber, where irradiation was performed with a total gamma dose of 266 kGy and a dose rate of 1.02 kGy/h.

After irradiation, I made measurements of the optical attenuation of the fibers, and the relaxation process by which the optical attenuation decreases after gamma irradiation. Furthermore, the spectral characteristics before and after irradiation were measured. Optical attenuation of FONTEX, FG050LGA and FG105LCA fibers was measured at wavelengths of 850 nm, 980 nm and 1300 nm and of GI-POF fibers at wavelengths of 535 nm and 650 nm. The optical attenuation of the FONTEX, FG050LGA and FG105LCA fibers was lowest at 1300 nm after irradiation, while that of the GI-POF at 650 nm.

As a result of this work, the changes in optical attenuation after exposure to gamma radiation and comparison of the spectral characteristics of the measured optical fibers before and after irradiation.

Keywords: Optical fiber, multimode optical fiber, plastic optical fiber, silica optical fiber, optical attenuation, spectral characteristics, gamma radiation

Title translation: Measuring the Properties of Optical Fibers for Use in Harsh Environments

Obsah

| | |
|-------------------------------------------------------|-----------|
| 1 Úvod | 3 |
| 2 Teoretická část | 5 |
| 2.1 Optická vlákna | 5 |
| 2.2 Přenosové vlastnosti optických vláken | 6 |
| 2.3 Gama záření | 8 |
| 3 Použité měřicí přístroje | 11 |
| 3.1 Měření optického útlumu | 11 |
| 3.2 Měření spektrálních charakteristik | 14 |
| 4 Popis experimentů | 19 |
| 4.1 Gama ozařování vláken | 19 |
| 4.2 Použitá optická vlákna | 21 |
| 5 Výsledky měření | 25 |
| 5.1 Měření vlastností optických vláken FONTEX | 25 |
| 5.2 Měření vlastností optických vláken GI-POF | 31 |
| 5.3 Měření vlastností optických vláken FG050LGA | 35 |
| 5.4 Měření vlastností optických vláken FG105LCA | 38 |
| 6 Závěr | 43 |
| Literatura | 47 |

Obrázky

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1 Schéma zapojení pro měření optického útlumu vláken FONTEX a FG050LGA s využitím MM rozbočnice s optickými vlákny s průměrem jádra $50 \mu\text{m}$, FG105LCA s využitím MM rozbočnice s optickými vlákny s průměrem jádra $105 \mu\text{m}$ | 12 |
| 3.2 Fotografie měřicího pracoviště s přístroji OFT-4212MM, použitého pro měření mnohavidových optických vláken a) v laboratoři PLANIO na Katedře mikroelektroniky, b) na pracovišti ÚJV Řež během ozařování. | 13 |
| 3.3 Schéma zapojení pro měření optického útlumu a) referenčního vlákna, b) optických vláken GI-POF. | 14 |
| 3.4 Schéma zapojení pro měření spektrálních charakteristik a) referenčního vlákna, b) měřeného vlákna. | 15 |
| 3.5 Schéma zapojení pro měření spektrálních charakteristik a) referenčního vlákna, b) měřeného vlákna. | 16 |
| 3.6 Schéma zapojení pro měření spektrálních charakteristik a) referenčního vlákna, b) měřeného vlákna. | 18 |
| 4.1 Přehledová fotografie ozařovací komory ROZA zachycuje a) ozařovací zdroj ROZA a realizované měřicí pracoviště s přístrojem OFT-4212MM, b) ozařovací komoru studnového typu s připojenými vzorky. | 20 |
| 4.2 Přehledová fotografie ozařovací komory PRAZDROJ zachycuje a) ozařovací zdroj PRAZDROJ, b) ozařovací komora studnového typu s připojenými vzorky. | 20 |
| 4.3 Přehledová fotografie panoramatické ozařovací komory PANOZA a) uzavřená ozařovací komora, b) upevněné vzorky v ozařovně PANOZA [9]. | 21 |
| 4.4 Fotografie čela optického vlákna FONTEX (vyfoceno s použitím inspekčního videomikroskopu FIP-410B od společnosti Exfo Inc). | 22 |
| 4.5 Spektrální charakteristika optických vláken POF a) se spojitě proměnnou změnou indexu lomu [4], b) se skokovou změnou indexu lomu [18]. | 23 |
| 5.1 Závislost optického útlumu na délce ozáření na vlnových délkách 850 nm, 980 nm a 1300 nm pro vlákno o délce 20 m (F2). Optické vlákno obdrželo celkovou dávku gama záření 19,2 kGy s dávkovým příkonem 0,83 kGy/h. | 25 |
| 5.2 Spektrální charakteristiky vláken FONTEX o délkách 5 m (F6), 10 m (F8) a 20 m (F10) před ozáření a po ozáření dávkou 31,6 kGy s dávkovým příkonem 51 Gy/h v ozařovací komoře PANOZA. | 30 |
| 5.3 Závislost optického útlumu na dávce gama záření na vlnové délce 650 nm pro vlákno o délce 10 m (P2). Optické vlákno obdrželo celkovou dávku gama záření 19,2 kGy s dávkovým příkonem 0,83 kGy/h. | 31 |
| 5.4 Spektrální charakteristika optických vláken GI-POF o délce a) 10 m (P1, P2), b) 10 m (P5, P6), c) 20 m (P7, P8). Optické vlákno P2 o délce 10 m po ozáření v ozařovací komoře ROZA a optické vlákna P6 a P8 o délce 10 m a 20 m po ozáření v ozařovací komoře PANOZA. | 35 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.5 Závislost optického útlumu na dávce gama záření pro vlákna FG050LGA o délce 100 m během ozařování v ozařovně PRAZDROJ a) průběh optického útlumu během 1. dne ozařování, b) celkový průběh optického útlumu. Optické vlákno obdrželo dávku gama záření 266 kGy s dávkovým příkonem 1,02 kGy/h. | 36 |
| 5.6 Spektrální charakteristiky pro optické vlákno FG050LGA o délce 100 m a) pro rozsah vlnových délek 350 nm - 1200 nm, b) pro rozsah vlnových délek 900 nm - 1700 nm. Měřeno před a po ozáření dávkou gama záření 266 kGy s dávkovým příkonem 1,02 kGy/h v ozařovně PRAZDROJ. | 38 |
| 5.7 Závislost optického útlumu na dávce gama záření pro optické vlákna FG105LCA o délce a) 20 m během prvního dne ozařování, b) 20 m po celou dobu ozařování, c) 100 m během prvního dne ozařování, d) 100 m po celou dobu ozařování. Optické vlákno během ozařování v ozařovně PRAZDROJ obdrželo dávku gama záření 266 kGy s dávkovým příkonem 1,02 kGy/h. | 39 |
| 5.8 Spektrální charakteristika optických vláken FG105LCA o délce 20 m a 100 m a) pro rozsah vlnových délek 350 nm - 1200 nm, b) pro rozsah vlnových délek 900 nm - 1700 nm. Měřeno před a po ozáření dávkou gama záření 266 kGy s dávkovým příkonem 1,02 kGy/h v ozařovně PRAZDROJ. | 42 |

Tabulky

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1 Seznam měřených vláken FONTEX s konektory typu FC/PC. | 22 |
| 4.2 Seznam měřených vláken GI-POF s konektory typu ST/PC. | 24 |
| 5.1 Naměřený optický útlum vláken FONTEX před a po ozáření dávkou gama záření 19,2 kGy s dávkovým příkonem 0,83 kGy/h v ozařovně ROZA. | 26 |
| 5.2 Parametr RIA stanovený během relaxačního procesu optických vláken FONTEX, po ozáření dávkou gama záření 19,2 kGy s dávkovým příkonem 0,83 kGy/h v ozařovně ROZA. | 27 |
| 5.3 Naměřený optický útlum vláken FONTEX před a po ozáření dávkou gama záření 31,6 kGy s dávkovým příkonem 51 Gy/h v ozařovně PANOZA. | 28 |
| 5.4 Parametr RIA během relaxačního procesu optických vláken FONTEX, po ozáření dávkou gama záření 31,6 kGy s dávkovým příkonem 51 Gy/h v ozařovně PANOZA. | 29 |
| 5.5 Naměřený optický útlum vlákna GI-POF před a po ozáření dávkou gama záření 19,2 kGy s dávkovým příkonem 0,83 kGy/h v ozařovně ROZA. | 32 |
| 5.6 Parametr RIA během relaxačního procesu optického vlákna GI-POF o délce 10 m, po ozáření dávkou gama záření 19,2 kGy s dávkovým příkonem 0,83 kGy/h v ozařovně ROZA. | 33 |
| 5.7 Naměřený optický útlum vláken GI-POF před a po ozáření dávkou gama záření 31,6 kGy s dávkovým příkonem 51 Gy/h v ozařovně PANOZA. | 33 |
| 5.8 Hodnoty pro parametr RIA během relaxačního procesu optických vláken GI-POF o délce 10 m a 20 m, po ozáření dávkou gama záření 19,2 kGy s dávkovým příkonem 0,83 kGy/h v ozařovně ROZA. | 34 |
| 5.9 Naměřený optický útlum vlákna FG050LGA o délce 100 m před a po ozáření dávkou gama záření 266 kGy s dávkovým příkonem 1,02 kGy/h v ozařovně PRAZDROJ. | 37 |
| 5.10 Hodnoty parametru RIA pro vlákno FG050LGA o délce 100 m před a po ozáření dávkou gama záření 266 kGy s dávkovým příkonem 1,02 kGy/h v ozařovně PRAZDROJ. | 37 |
| 5.11 Naměřený optický útlum vláken FG105LCA před a po ozáření dávkou gama záření 266 kGy s dávkovým příkonem 1,02 kGy/h v ozařovně PRAZDROJ. | 40 |
| 5.12 Hodnoty parametru RIA pro vlákna FG105LCA o délce 20 m a 100 m před a po ozáření dávkou gama záření 266 kGy s dávkovým příkonem 1,02 kGy/h v ozařovně PRAZDROJ. | 41 |

Seznam použitých zkratk

| Zkratka | Význam v anglickém jazyce | Význam v českém jazyce |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| CYTOP® | Amorphous Fluoropolymer | Amorfní fluoropolymer |
| ČVUT | Czech Technical University in Prague | České vysoké učení technické v Praze |
| FEL | Faculty of Electrical Engineering | Fakulta elektrotechnická |
| GI | Gradient-Index | Spojitě proměnný index lomu |
| MM | Multimode | Mnohavidové |
| OPM | Optical Power Monitor | Monitor optického výkonu |
| PoF | Power over Fiber | Přenos optického výkonu s využitím optických vláken |
| POF | Plastic Optical Fiber | Plastové optické vlákno |
| PMMA | Polymethyl methacrylate | Polymethylmethakrylát |
| PLANIO | Laboratory of planar optoelectronic and optical integrated structures | Laboratoř planárních optoelektronických a optických integrovaných struktur |
| SI | Step-Index | Skoková změna indexu lomu |
| SiO ₂ | Silicon dioxide | Oxid křemičitý |
| ÚJV | Institute of Nuclear Research | Ústav jaderného výzkumu |

Seznam použitých symbolů

| Symbol | Jednotka | Význam |
|------------|----------|-------------------------------------------------------|
| α | dB/km | Měrný optický útlum |
| α_A | dB/km | Koeficient absorpce |
| α_M | dB/km | Koeficient rozptylu na mikroohybech |
| α_N | dB/km | Koeficient rozptylu na makroskopických neregularitách |
| α_O | dB/km | Koeficient rozptylu na ohybech a jiných deformacích |
| α_R | dB/km | Koeficient Rayleigho rozptylu |
| α_1 | dB/km | Koeficient útlumu |
| λ | m | Vlnová délka |
| D | Gy | Absorbovaná dávka gama záření |
| E | J | Absorbovaná energie |
| L | m | Délka optického vlákna |
| m | kg | Hmotnost |
| P | dBm | Optický výkon |
| RIA | dB/m | Radiací způsobený útlum |
| t | s | Čas |
| u | dB | Optický útlum |
| u_{po} | dB | Optický útlum po ozáření dávkou gama záření |
| u_{pred} | dB | Optický útlum před gama ozařováním |

Kapitola 1

Úvod

Moderní optické komunikační systémy pro přenos informace používají optická vlákna. Hlavní výhodou optických vláken v porovnání s metalickým nebo bezdrátovým spojením jsou jejich přenosové vlastnosti, zejména nízký optický útlum, který umožňuje přenos dat na větší vzdálenost při současném zachování velké šířky přenosového pásma. Další výhodou je odolnost vůči elektromagnetickému rušení a nižší hmotnost optických vláken ve srovnání s metalickým kabelem [1].

Pro spoje na větší vzdálenost se využívají křemenná optická vlákna s optickým útlumem kolem 0,2 dB/km na vlnové délce 1550 nm, křemenná optická vlákna se v dnešní době využívají pro přenos dat až na stovky kilometrů. Přenos u jednovidových optických vláken probíhá standardně na vlnové délce 1310 nm a 1550 nm. U mnohavidových optických vláken na vlnové délce 850 nm a 1300 nm. Pro spoje na krátké vzdálenosti (do 100/200 m) je možné použít plastová optická vlákna (POF - Plastic Optical Fiber), v předložené práci byla použita optická vlákna se spojitě proměnným indexem lomu, která jsou cenově výhodnější, ale mají vysoký optický útlum v rozmezí od 50 dB/km do 1000 dB/km na vlnové délce 650 nm. Měřená optická vlákna FONTEX mají optický útlum ≤ 70 dB/km na vlnové délce 850 nm a optická vlákna GI-POF (Gradient-Index Plastic Optical Fiber) mají optický útlum 0,2 dB/m na vlnové délce 650 nm [2], [3], [4].

Optický útlum vláken je také ovlivněn změnou vlastností prostředí, kde jsou instalovány. Jedná se například o změnu teploty, vlhkosti a deformace vláken. V určitých aplikacích se vlákna vystavují nebo mohou být při nestandardních situacích vystaveny vlivu gama záření. Optická vlákna vlivem gama záření degradují, kvůli čemuž dojde zejména ke zvýšení optického útlumu.

Předložená bakalářská práce se zabývá měřením vlivu gama záření na optická vlákna. V práci je zkoumána změna přenosových vlastností optických vláken během ozáření a v době po ozáření. Po ozáření dochází k relaxaci vláken, kdy dochází k poklesu optického útlumu. V práci jsou měřena vlákna, která mají jádro vlákna z polymethylmethakrylátu (PMMA) GI-POF s průměrem jádra 980 μm a vlákna FONTEX, která mají jádro

1. Úvod

vlákna z polymeru CYTOP® s průměrem jádra $55\ \mu\text{m}$. Dále byla měřena optická vlákna se skokovou změnou indexu lomu FG050LGA s průměrem jádra $50\ \mu\text{m}$ a FG105LCA s průměrem jádra $105\ \mu\text{m}$, tyto vlákna mají jádro z čistého oxidu křemičitého a plášť z oxidu křemičitého dopovaného fluorem. U těchto vláken předpokládáme aplikaci PoF (Power over Fiber) - přenos energie pomocí optického signálu a jeho přeměna zpět na elektrickou energii [5]. Oblast využití optických vláken, kde dochází k vystavení gama záření je například v medicíně (sterilizace nástrojů), kosmickém průmyslu a v jaderných elektrárnách.

Kapitola 2

Teoretická část

2.1 Optická vlákna

Optická vlákna jsou jediným vhodným řešením pro přenos dat na velké vzdálenosti. Jsou také jedním z nejdůležitějších prvků, které určují parametry komunikační soustavy. Ačkoliv konstrukce optických kabelů, které využívají optická vlákna je z hlediska geometrie relativně jednoduchá, tak analýza šíření signálu optickým vláknem je výrazně složitější než u metalických vlnovodů. Samotné šíření signálu je totiž ovlivňováno výrazně vyšším množstvím různých parametrů a vlivů. Toto je zapříčiněno tím, že okrajové podmínky na rozhraní dielektrik jsou složitější než na plášti kovového vlnovodu a také kvůli tomu, že v dielektrickém vlnovodu se vlna šíří v podstatně složitějším prostředí, jehož parametry závisí na vlnové délce [6].

Mezi základní parametry vláknových vlnovodů z hlediska komunikační techniky patří jeho přenosové vlastnosti, které jsou především určeny disperzí a optickým útlumem. Přenosové vlastnosti optických vlnovodů je možné ve vysoké míře ovlivňovat jejich konstrukčními parametry. Mezi základní konstrukční parametry patří použitý materiál pro jádro a plášť vlnovodu, příčné rozměry a rozložení indexu lomu materiálu. Vnitřní oblast vlnovodu se nazývá jádro, které je obklopeno jednou nebo několika vrstvami, kterým se říká plášť [6].

Optická vlákna se skokovou změnou indexu lomu se označují SI (Step-Index) a jsou tvořena jednou nebo více vrstvami homogenního dielektrika. U SI vláken se vlna šíří odrazem na rozhraní jádro - plášť. Optická vlákna se spojitě proměnným indexem lomu se označují GI (Gradient-Index) a mají nehomogenní vnitřní oblast (jádro). U GI vláken se vlna šíří ohybem [6].

2.2 Přenosové vlastnosti optických vláken

Optický útlum

Optický útlum je určen z poměru vstupní a výstupní úrovně optického výkonu, typicky se vyjadřuje v decibelech a je dán vztahem:

$$u = 10 \log \frac{P_1}{P_2} \quad [\text{dB}], \quad (2.1)$$

kde P_1 je optický výkon po průchodu signálu referenčním vláknem, P_2 je optický výkon po zapojení měřeného vlákna a u je útlum měřeného vlákna v dB. V optických komunikacích se útlum také vyjadřuje jako měrný optický útlum, který je vztažený na jednotku délky a je dán vztahem:

$$\alpha = \frac{u}{L} \quad [\text{dB/km}], \quad (2.2)$$

kde u je útlum optického vlákna, L je délka měřeného vlákna a α je měrný útlum v dB/km [2].

Měření optického útlumu

Pro měření optického útlumu byla využita metoda vložných ztrát. Na rozdíl od metody dvou délek je tato metoda nedestruktivní, což je pro měření vzorků vyžadováno. Avšak není tak přesná, protože nelze zajistit opakovatelnou vazbu zdroje s měřenými vzorky [6]. Měření spočívá v tom, že se nejdříve mezi zdroj optického záření a detektor připojí referenční vlákno se známým útlumem. Zaznamenaná se naměřená hodnota optického výkonu P_1 a referenční vlákno se buď vymění za měřené, nebo se připojí za něj a následně odečteme hodnotu optického výkonu P_2 . Optický útlum měřeného vlákna se určí podle vztahu (2.1).

Ztráty v optických vlnovodech

Ztráty v optických vlnovodech jsou hlavním faktorem, který omezuje jejich použitelnost. Ztráty v optickém vlnovodu se dělí na ztráty absorpční, ztráty rozptylem, makroskopické neregularity, mikroohyby a ohyby vlákna.

Závislost energie šířící se vlny v optickém vlnovodu na podélné souřadnici z můžeme vyjádřit vztahem [6]:

$$P \approx e^{\alpha_1 z}, \quad (2.3)$$

kde α_1 je koeficient útlumu a z je souřadnice ve směru osy z . Koeficient útlumu α_1 obsahuje všechny druhy ztrát a můžeme ho vyjádřit vztahem:

$$\alpha_1 = \alpha_A + \alpha_R + \alpha_N + \alpha_M + \alpha_O, \quad (2.4)$$

kde α_A je koeficient absorpce, α_R je koeficient Rayleighova rozptylu, α_N je koeficient rozptylu na makroskopických neregularitách, α_M je koeficient rozptylu na mikroohybech, α_O je koeficient rozptylu na ohybech a jiných deformacích a α_1 je koeficient útlumu [6].

Ztráty absorpční

Hlavní příčinou absorpčních ztrát je přítomnost iontů kovů a vody ve skle. Kde sklo se používá jako základní materiál pro optické vláknové vlnovody. Především se jedná o ionty kovů: Fe, Cu, Cr, Ni, V. Mechanismem ztrát je rezonance těchto iontů na určitých kmitočtech, u iontů OH rezonanční kmitočet odpovídá vlnové délce 2,8 μm , která leží většinou mimo pásmo používané pro optický přenos, avšak třetí a čtvrtá harmonická spadá do oblasti využívaného pásma. Například pro útlum 1 dB/km musí být koncentrace iontů železa v taveném křemenu SiO_2 menší než 10^{-9} , iontů OH menší než $1,2 \cdot 10^{-7}$. Oblast, na které je pro SiO_2 možné dosáhnout měrného útlumu nižšího než 1 dB/km se nachází v rozsahu vlnových délek 800 nm až 1700 nm [6].

V závislosti na materiálu a vlnové délce dochází k pohlcení světelné energie. Absorpční ztráty u plastových optických vláken jsou způsobeny elektronickými přechody a vibracemi molekul polymeru. Při absorpci fotonu dochází k přechodu mezi elektronickými energetickými hladinami v materiálu. Absorpcí fotonů dochází k excitaci elektronického stavu. Absorpce způsobená vibrací molekul se projevuje převážně na vlnových délkách ve viditelné až infračervené oblasti. V případě optických vláken z PMMA, kde je vliv absorpce způsobené elektronickými přechody zanedbatelně malý, jsou molekulární vibrace převládajícím faktorem přispívajícím k útlumu vlákna [7].

Ztráty rozptylem

Vlivem náhodného rozložení molekul v amorfním materiálu vznikají mikronehomogenity indexu lomu materiálu. V případě, že tyto nehomogenity a drobné nečistoty jsou rozměrově malé proti vlnové délce, tak se rozptylové ztráty nazývají Rayleighova rozptyl. Z hlediska Rayleighova rozptylu se za perspektivní oblast pro použití optických vláken pokládá oblast vlnových délek 10 μm , kde jsou ztráty způsobené Rayleighovým rozptylem menší než 0,01 dB/km. V případě, že je rozměr nehomogenit srovnatelný s vlnovou délkou, pak se ztráty nazývají Mieovy ztráty [6].

Makroskopické neregularity

Makroskopické neregularity jsou především makronečistoty, vzduchové bublinky, trhliny v materiálu, poruchy tvaru a rozměrů mezi jádrem a pláštěm. Ztráty vznikající na makroskopických neregularitách lze regulovat vhodně vybraným technologickým postupem při výrobě vláken. Uvedené ztráty jsou zahrnuty ve ztrátách uvedených výrobcem [6].

Mikroohyby

Jedná se o poruchu přímočarosti osy vlnovodu. Vznikají při výrobě a vlivem působení okolních elementů vlákna v optickém kabelu. Typická amplituda pro mikroohyby je kolem jednoho mikrometru a perioda opakování o délce v rozsahu milimetrů až centimetrů. Mikroohyby mohou podstatně ovlivnit útlum optického vlnovodu, jelikož se vyskytují po celé jeho délce [6].

Ohyby vlákna

Při praktickém použití optických vláken vznikají ohyby, například připojením zdroje a detektoru, nebo vlivem nerovnosti trasy. Při ohybu vyšším, než je určitá mez poloměru křivosti, může docházet k vyzařování energie z vlákna a zvýšení útlumu. Poloměr křivosti je závislý na konstrukci vlákna [6].

Disperze

Disperze optického signálu způsobuje zkreslení digitálního i analogového přenosu po optických vláknech. V případě využití digitální modulace se vlivem disperze přenášené světelné pulzy rozšiřují a překrývají s ostatními. Maximální možná šířka pásma pro konkrétní optické vlákno je omezena disperzí do takové míry, aby bylo možné jednotlivé pulzy od sebe rozeznat [2].

Chromatická disperze je důsledkem konečné šířky spektra optického zdroje. Optické zdroje nevyzařují pouze na jedné vlnové délce, ale na určitém spektru, jehož složky mají odlišnou rychlost šíření. Rozdíl ve zpoždění také může být způsoben vlastnostmi materiálu vlnovodu (materiálová disperze), nebo vlivem vedení uvnitř struktury vlákna (vidová disperze) [2].

2.3 Gama záření

Gama záření je elektromagnetické záření s velmi krátkou vlnovou délkou kolem 10^{-11} m až 10^{-13} m. Vzniká při jaderných reakcích nebo při přechodu jádra z vyššího do nižšího energetického stavu, kdy se jádro zbavuje své excitační energie. Gama záření má čárové spektrum, radionuklid emituje pouze fotony s určitou energií, která je pro jeho přeměnu charakteristická [8].

U radionuklidu ^{60}Co je vyzářena energie o velikosti 1,17 MeV nebo 1,33 MeV [9].

Při experimentech byl jako zdroj gama záření využit radionuklid ^{60}Co , který má poločas rozpadu 5,27 let. Při rozpadu radionuklidu ^{60}Co dochází k vyzáření částic beta záření a gama záření, ale ne alfa záření [9].

Mezi základní veličiny patří absorbovaná dávka, která se značí D a je definována jako poměr absorbované energie E vztažené na hmotnost m v kg. Jednotkou absorbované dávky je Gray = J/kg a značí se Gy. Další podstatnou veličinou je dávkový příkon, který vyjadřuje přírůstek dávky D za čas t . Jednotkou dávkového příkonu je Gy/s [8].

RIA

RIA (Radiation Induced Attenuation - Radiací způsobený útlum) je významným faktorem ovlivňujícím přenosové vlastnosti optických vláken provozovaných v prostředí s vlivem gama záření. Parametr RIA vyjadřuje velikost optického útlumu vyvolaného účinkem gama záření na optické vlákno v závislosti na délce optického vlákna [10]. Pro výpočet RIA byl využit vztah:

$$RIA = (u_{po} - u_{pred})/L \quad [\text{dB/m}], \quad (2.5)$$

kde u_{po} je optický útlum měřeného vlákna po ozáření dávkou gama záření, u_{pred} je optický útlum vlákna před ozářením, L je délka měřeného vlákna a RIA je Radiací způsobený útlum v dB/m.

Kapitola 3

Použité měřicí přístroje

3.1 Měření optického útlumu

OFT-4212MM

Čtyřkanálový měřicí přístroj OFT-4212MM (Multimode) od společnosti OPTOKON, a.s. byl využit v experimentech pro měření optického útlumu polymerních vláken FONTEX a optických vláken z čistého křemene FG050LGA a FG105LCA. Je navržen pro dlouhodobé měření změn úrovně optického výkonu. Přístroj obsahuje 4 vstupní kanály pro měření optického výkonu a 3 optické zdroje. Přístroj je řízen pomocí PC s nainstalovaným softwarem - Optical Power Monitor (OPM). Pro měření mnohavidových optických vláken přístroj obsahuje zdroje optického záření na vlnových délkách 850 nm, 980 nm a 1300 nm. Výstupní hodnota optického výkonu laserů zabudovaných v přístroji je -5 dBm [11].

Přístroj je vybaven konektory typu FC/PC. Pro měření mnohavidových vláken obsahuje 4 fotodetektory 3,6 mm Si. Přístroj má dynamický rozsah -60 dBm až +10 dBm, rozlišení 0,01 dBm a nejistotu ± 5 %. Přístroj je možno přepnout do režimu měření optického útlumu, kde je třeba před měřením provést kalibraci. K přístroji je možné připojit řídicí počítač a pomocí software OPM nastavit interval měření optického výkonu a nastavit měřené vlnové délky. Naměřené hodnoty optického útlumu software ukládá do paměti řídicího počítače [11].

Pro propojení výstupu přístroje s detektorem byla využita rozbočnice 1x4Y a mnohavidové optické vlákno OM2 s gradientním indexem lomu a průměrem jádra 50 μm . Při měření optických vláken FG105LCA byla použita optická rozbočnice 1x4Y, která využívala optických vláken se skokovou změnou indexu lomu a s průměrem jádra 105 μm .

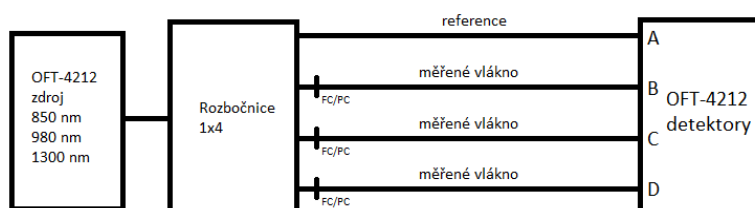
Zapojení pro měření optického útlumu

Optický útlum vláken byl nejdříve změřen před vložením do ozařovací komory ROZA/PRAZDROJ/PANOZA. Následně byl optický útlum měřených vláken

3. Použité měřicí přístroje

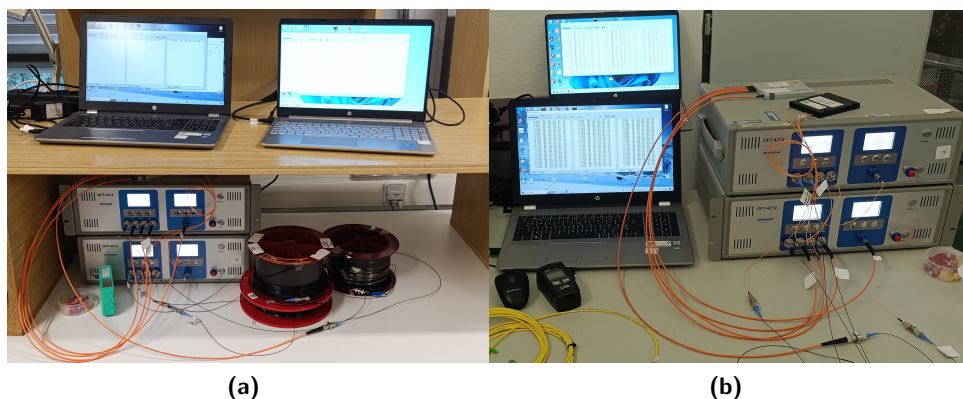
v ozařovně ROZA a PRAZDROJ měřen během ozařování. Po ukončení ozařování došlo k převozu optických vláken do laboratoře PLANIO (Laboratoř planárních optoelektronických a optických integrovaných struktur) na Katedře mikroelektroniky, FEL ČVUT v Praze, kde byla měřena relaxace optických vláken a spektrální charakteristiky.

Pro měření optického útlumu byla měřená vlákna zapojena podle schématu uvedeného na obrázku 3.1. Nejprve byl změřen optický výkon referenčního vlákna, přístroj OFT-4212MM byl následně přepnut do režimu měření optického útlumu a byla provedena kalibrace pro všechny měřené vlnové délky. Po připojení měřeného vlákna za vlákno referenční přístroj zobrazoval hodnotu optického útlumu měřeného vlákna.



Obrázek 3.1 Schéma zapojení pro měření optického útlumu vláken FONTEX a FG050LGA s využitím MM rozbočnice s optickými vlákny s průměrem jádra $50 \mu\text{m}$, FG105LCA s využitím MM rozbočnice s optickými vlákny s průměrem jádra $105 \mu\text{m}$.

Na obrázku 3.2 je fotografie měřicího pracoviště s přístroji OFT-4212MM v laboratoři PLANIO na Katedře mikroelektroniky se zapojenými optickými vlákny FG050LGA a FG105LCA. Optická vlákna FG050LGA jsou propojena s využitím $50 \mu\text{m}$ rozbočnice 1x4Y MM a optická vlákna FG105LCA jsou propojena s využitím $105 \mu\text{m}$ rozbočnice 1x4Y MM.



Obrázek 3.2 Fotografie měřicího pracoviště s přístroji OFT-4212MM, použitého pro měření mnohavidových optických vláken a) v laboratoři PLANIO na Katedře mikroelektroniky, b) na pracovišti ÚJV Řež během ozařování.

OFT-820-POF

Měřicí přístroj OFT-820-POF od společnosti OPTOKON, a.s. je určen pro měření optických vláken POF a byl použit v experimentech pro měření optického útlumu vláken GI-POF. Přístroj je vybaven 2 zdroji optického záření s vlnovými délkami 535 nm a 650 nm a 3 mm Si fotodetektořem pro měření optického výkonu. Výstupní výkon laserů je 0 dBm. Dynamický rozsah fotodetektoru je -65 dBm až +10 dBm, rozlišení 0,01 dBm a nejistotu ± 5 %.

Přístroj je vybaven konektory typu ST/PC. Po nastavení referenční hodnoty optického výkonu lze přístroj přepnout do režimu měření optického útlumu. Přístroj je možné připojit k řídicímu počítači a pomocí software OPM nastavit interval měření optického výkonu a měřené hodnoty ukládat do paměti počítače [12].

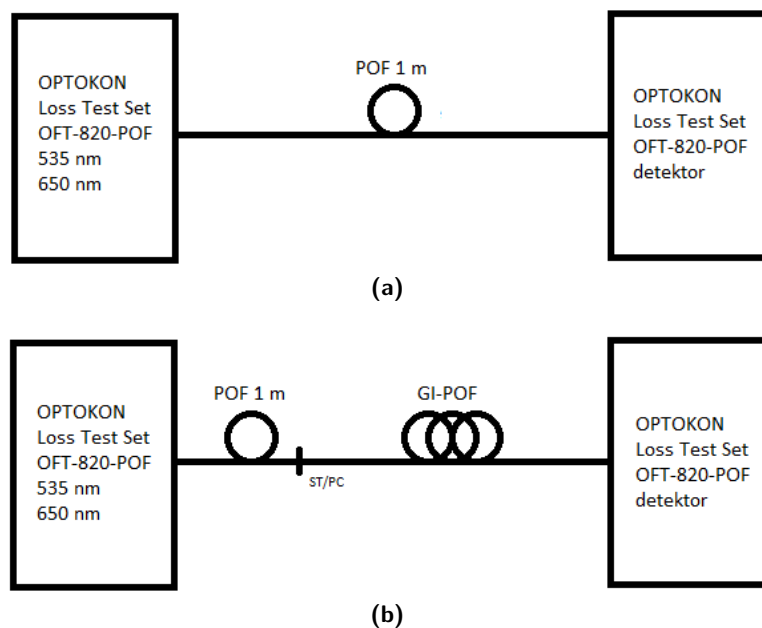
Zapojení pro měření optického útlumu

Optický útlum vláken byl nejdříve změřen před vložením do ozařovací komory ROZA/PANOZA. Po ukončení ozařování byl změřen optický útlum po vystavení gama záření a následně byla měřena relaxace optických vláken. Přístroj OFT-820-POF obsahuje 2 výstupní konektory a 1 vstupní, z tohoto důvodu měření probíhalo primárně na 650 nm, kde mají vlákna nižší útlum. Po ukončení měření relaxace byl změřen útlum na vlnové délce 535 nm.

Pro měření optického útlumu byla měřená vlákna GI-POF zapojena podle schématu na obrázku 3.3. Nejprve byla provedena kalibrace změřením optického výkonu referenčního vlákna zapojeného podle obrázku 3.3 a), který se uložil v měřicím přístroji OFT-820-POF a následně bylo za referenční vlákno

3. Použité měřicí přístroje

zapojeno měřené vlákno viz obrázek 3.3 b). Po přepnutí do režimu měření útlumu přístroj zobrazoval optický útlum měřeného vlákna.



Obrázek 3.3 Schéma zapojení pro měření optického útlumu a) referenčního vlákna, b) optických vláken GI-POF.

3.2 Měření spektrálních charakteristik

YOKOGAWA AQ6373B

Optický spektrální analyzátor YOKOGAWA AQ6373B od společnosti Yokogawa Electric Corporation byl použit pro měření spektrálních charakteristik polymerních vláken FONTEX a optických vláken z čistého křemene FG050LGA a FG105LCA. Spektrální analyzátor měří v rozsahu vlnových délek 350 nm - 1200 nm s přesností $\pm 0,05$ nm a rozlišením 0,02 nm. Maximální vstupní výkon je +20 dBm, citlivost -90 dBm a dynamický rozsah 78 dB. Při měření spektrálních charakteristik byl využit zdroj optického záření SLS201L/M, který byl ke spektrálnímu analyzátoru připojen mnohavidovým optickým vláknem OM2 s gradientním indexem lomu a průměrem jádra 50 μm . Spektrální analyzátor obsahuje konektory typu FC/PC [13].

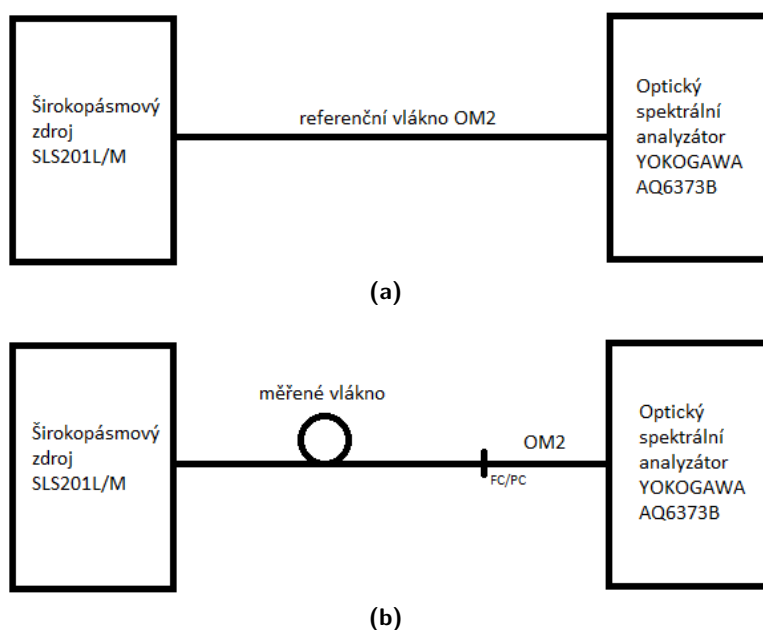
Širokopásmový zdroj SLS201L/M

Stabilizovaný zdroj optického záření SLS201L/M od společnosti Thorlabs, Inc.

byl využit při měření spektrálních charakteristik vláken FONTEX pomocí spektrálního analyzátoru YOKOGAWA AQ6373B a YOKOGAWA AQ6370C. Jedná se o wolfram-halogenový stabilizovaný širokopásmový zdroj vyzařující na vlnové délce od 360 nm do 2600 nm. Výkon na výstupu zdroje navázaný do mnohavidového vlákna s průměrem jádra 400 μm je 10 mW. Při měření spektrálních charakteristik byl výstup přístroje osazen konektorem FC/PC, který lze vyměnit za konektor SMA [15].

Zapojení pro měření spektrálních charakteristik

Schéma zapojení pro měření spektrálních charakteristik optických vláken FONTEX, FG050LGA a FG105LCA je zobrazeno na obrázku 3.4. Nejprve bylo změřeno spektrum referenčního vlákna zapojeného podle obrázku 3.4 a), které bylo uloženo v měřicím přístroji YOKOGAWA AQ6373B a následně bylo za referenční vlákno zapojeno měřené vlákno viz obrázek 3.4 b).



Obrázek 3.4 Schéma zapojení pro měření spektrálních charakteristik a) referenčního vlákna, b) měřeného vlákna.

YOKOGAWA AQ6370C

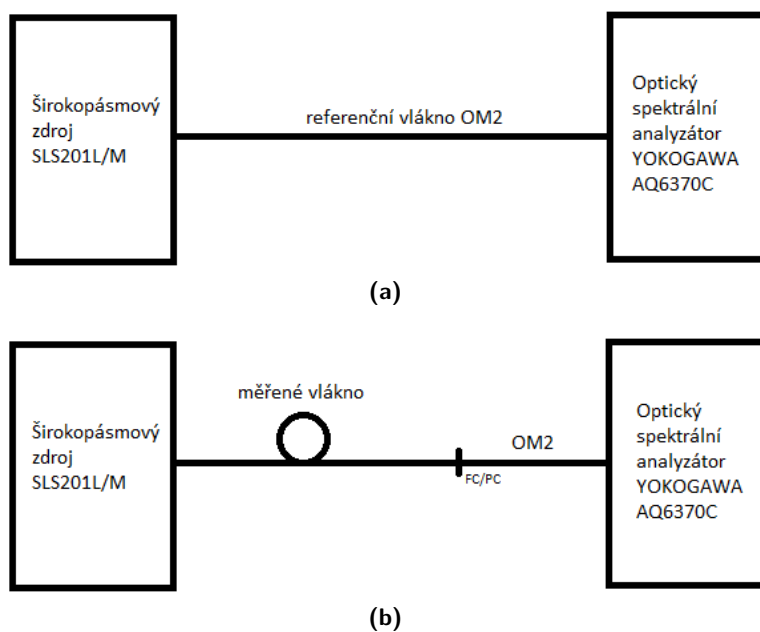
Optický spektrální analyzátor YOKOGAWA AQ6370C od společnosti Yokogawa Electric Corporation byl použit pro měření spektrálních charakteristik polymerních vláken FONTEX a optických vláken z čistého křemene

3. Použité měřicí přístroje

FG050LGA a FG105LCA. Spektrální analyzátor měří v rozsahu vlnových délek 600 nm - 1700 nm s přesností $\pm 0,01$ nm a rozlišením 0,02 nm - 10 nm. Maximální vstupní výkon je +20 dBm, citlivost -80 dBm a dynamický rozsah ≥ 60 dB. Při měření spektrálních charakteristik byl využit zdroj optického záření SLS201L/M, který byl ke spektrálnímu analyzátoru připojen optickým vláknem OM2. Spektrální analyzátor obsahuje konektory typu FC/PC [14].

Zapojení pro měření spektrálních charakteristik

Schéma zapojení pro měření spektrálních charakteristik optických vláken, FG050LGA a FG105LCA je zobrazeno na obrázku 3.4. Nejprve bylo změřeno spektrum referenčního vlákna zapojeného podle obrázku 3.4 a), které bylo uloženo v měřicím přístroji YOKOGAWA AQ6373B a následně bylo za referenční vlákno zapojeno měřené vlákno viz obrázek 3.4 b).



Obrázek 3.5 Schéma zapojení pro měření spektrálních charakteristik a) referenčního vlákna, b) měřeného vlákna.

USB2000

Optický spektrální analyzátor USB2000 od společnosti Ocean Insight, Inc. byl využit pro měření spektrálních charakteristik vláken GI-POF. Spektrální analyzátor měří v rozsahu vlnových délek 200 nm - 850 nm s rozlišením 0,1 nm. Přístroj je vybaven konektorem typu SMA. Pomocí USB kabelu je připojen do počítače s nainstalovaným softwarem OceanView pro sledování měřeného spektra a jeho uložení. K měření spektrálních charakteristik byl využit zdroj záření HL-2000-HP-FHSA [17].

Širokopásmový zdroj HL-2000-HP-FHSA

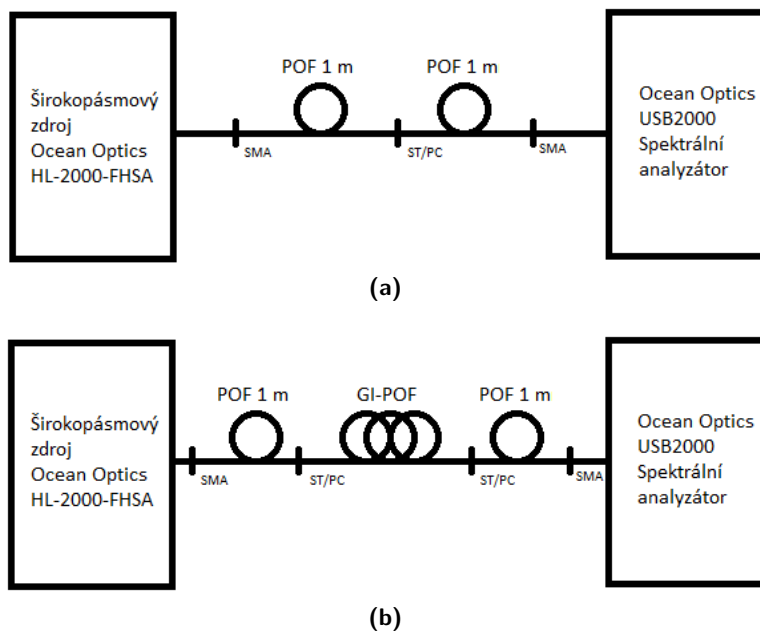
Širokopásmový zdroj optického záření HL-2000-HP-FHSA od společnosti Ocean Insight, Inc. (dříve Ocean Optics) byl využit při měření spektrálních charakteristik vláken GI-POF pomocí spektrálního analyzátoru USB2000. Jedná se o wolfram-halogenový zdroj vyzařující na vlnové délce od 360 nm do 2400 nm. Typický výkon na výstupu zdroje je 8,4 mW. Při měření spektrálních charakteristik byl výstup přístroje osazen konektorem SMA [16].

Zapojení pro měření spektrálních charakteristik

Schéma zapojení pro měření spektrálních charakteristik optických vláken GI-POF je zobrazeno na obrázku 3.6. Nejprve bylo změřeno spektrum referenčního vlákna zapojeného podle obrázku 3.6 a), které bylo uloženo v počítači za pomoci softwaru OceanView k spektrálnímu analyzátoru USB2000 a následně bylo za referenční vlákno zapojeno měřené vlákno viz obrázek 3.6 b).

Pro propojení širokopásmového zdroje a spektrálního analyzátoru byla využita optická vlákna POF 1 m s konektorem typu SMA a ST/PC. Měřená vlákna GI-POF mají konektory typu ST/PC.

3. Použité měřicí přístroje



Obrázek 3.6 Schéma zapojení pro měření spektrálních charakteristik a) referenčního vlákna, b) měřeného vlákna.

Kapitola 4

Popis experimentů

4.1 Gama ozařování vláken

Ozařování optických vláken bylo provedeno na pracovišti ÚJV Řež, a.s. V této práci byly použity ozařovací komory s označením ROZA, PRAZDROJ a PANOZA. Ozařovací komory PRAZDROJ a ROZA mají vysoký dávkový příkon a jsou určeny na krátkodobé ozařování, ozařovací komora PANOZA má nižší dávkový příkon a je určena na dlouhodobé ozařování.

Ozařovna ROZA a PRAZDROJ

Jako zdroj gama záření v ozařovací komoře ROZA je použit jeden kobaltový zářič ^{60}Co o délce 25 cm, který se skládá ze 4 peletek o délce kolem 7 cm. Aktivita zářiče je přibližně 500 TBq v den přebití (v době sestavení). Kobaltový zářič je uchováván ve stínícím kontejneru o tvaru kvádrů s rozměry přibližně 120 cm x 120 cm x 50 cm. Ozařovací zdroj a realizované měřicí pracoviště s přístrojem OFT-4212MM je zobrazeno na obrázku 4.1 a). Na obrázku 4.1 b) je zobrazena kovová cívka s vlákny vyvedenými průchodkami pro měření útlumu optických vláken během ozařování. V ozařovací komoře PRAZDROJ jsou použity dva kobaltové zářiče o délce 25 cm s přibližnou aktivitou 600 TBq v den přebití. Pro účely ozařování je se zářičem manipulováno pomocí elektromotoru. Ozařování probíhá v komoře studnového typu o průměru 100 cm a hloubce 300 cm [9].

4. Popis experimentů



Obrázek 4.1 Přehledová fotografie ozařovací komory ROZA zachycuje a) ozařovací zdroj ROZA a realizované měřicí pracoviště s přístrojem OFT-4212MM, b) ozařovací komoru studnového typu s připojenými vzorky.

Optická vlákna byla při ozařování připevněna na kovovou cívku, velikost dávkového příkonu gama záření je závislá na vzdálenosti od zdroje záření, v tomto případě tedy dávku gama záření určuje průměr cívky, na kterou jsou ozařované vzorky upevněny. Na obrázku 4.2 a) Je zobrazeno realizované měřicí pracoviště s přístrojem OFT-4212MM pro měření optického útlumu vláken FG050LGA a FG105LCA během ozařování v ozařovně PRAZDROJ. Na obrázku 4.2 b) je zobrazen pohled do ozařovací komory s upevněnými vzorky.

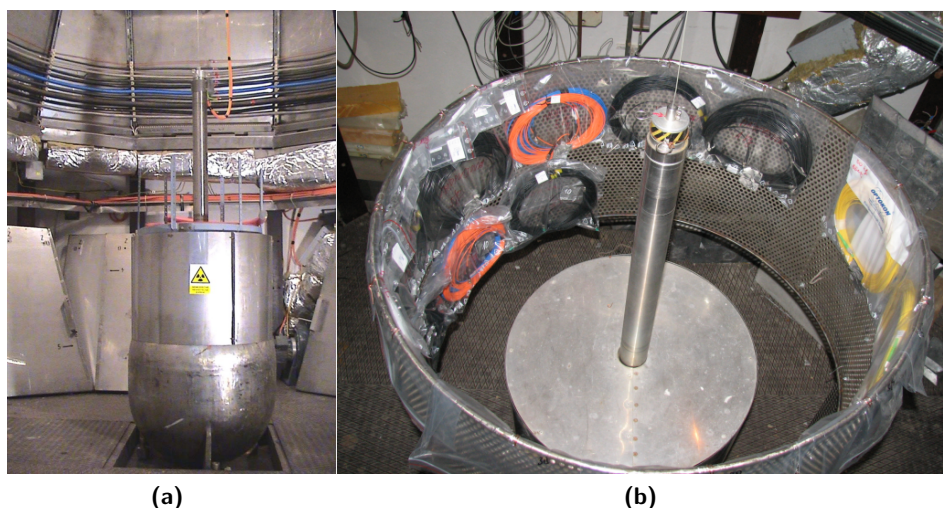


Obrázek 4.2 Přehledová fotografie ozařovací komory PRAZDROJ zachycuje a) ozařovací zdroj PRAZDROJ, b) ozařovací komoru studnového typu s připojenými vzorky.

Ozařovna PANOZA

Jedná se o panoramatickou ozařovnu určenou pro dlouhodobé ozařování. Jako zdroj gama záření v ozařovací komoře PANOZA je použit jeden kobaltový

zářič ^{60}Co o délce 25 cm, který se skládá ze 4 peletek o délce kolem 7 cm. Aktivita zářiče je přibližně 100 TBq v den přebití. Na obrázku 4.3 a) je uvedena uzavřená ozařovací komora PANOZA. Na obrázku 4.3 b) je zobrazen pohled na upevněné vzorky v ozařovně PANOZA. Samotná ozařovací komora má půdorys o velikosti 3 m x 3 m. Zdroj záření je uložen v kontejneru z nerezové oceli o průměru 98 cm, výšce 123 cm a hmotnosti 2,6 t. Se zdrojem záření se manipuluje manuálně pomocí tažného lanka. Po zasunutí zářiče do kontejneru je možné vstoupit do ozařovací komory a manipulovat se vzorky [9].



Obrázek 4.3 Přehledová fotografie panoramatické ozařovací komory PANOZA a) uzavřená ozařovací komora, b) upevněné vzorky v ozařovně PANOZA [9].

4.2 Použitá optická vlákna

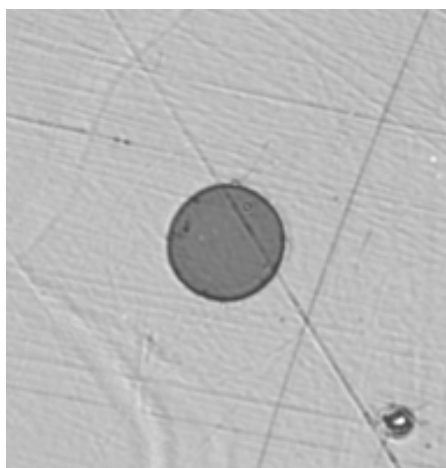
Polymerní vlákna FONTEX

Seznam měřených vláken FONTEX společně s obdrženou dávkou gama záření je uveden v tabulce 4.1. Fotografie čela optického vlákna FONTEX je uvedena na obrázku 4.4. Pro účely experimentu byly vlákna F1, F2 a F3 propojeny s 10metrovými vlákny FONTEX, kvůli možnosti měření optického útlumu během ozařování v ozařovně ROZA. Dále byla měřena 2 vlákna o délce 5 m, 3 vlákna o délce 10 m a 2 vlákna o délce 20 m.

Optická vlákna FONTEX jsou vyrobena z perfluorovaného polymeru CYTOP® [3]. Vlákna mají spojitě proměnný index lomu (GI), dvojitý plášť,

4. Popis experimentů

průměr jádra $55 \mu\text{m}$, průměr pláště $125 \mu\text{m}$, průměr primární ochrany $250 \mu\text{m}$ a průměr vlákna je $490 \mu\text{m}$. Měrný optický útlum na vlnové délce 850 nm je $\leq 70 \text{ dB/km}$, numerická apertura je $0,245$, útlum při ohybu o 180° s poloměrem 5 mm je $\leq 0,5 \text{ dB}$. Optická vlákna FONTEX jsou osazena konektory typu FC/PC [3].



Obrázek 4.4 Fotografie čela optického vlákna FONTEX (vyfoceno s použitím inspekčního videomikroskopu FIP-410B od společnosti Exfo Inc).

Tabulka 4.1 Seznam měřených vláken FONTEX s konektory typu FC/PC.

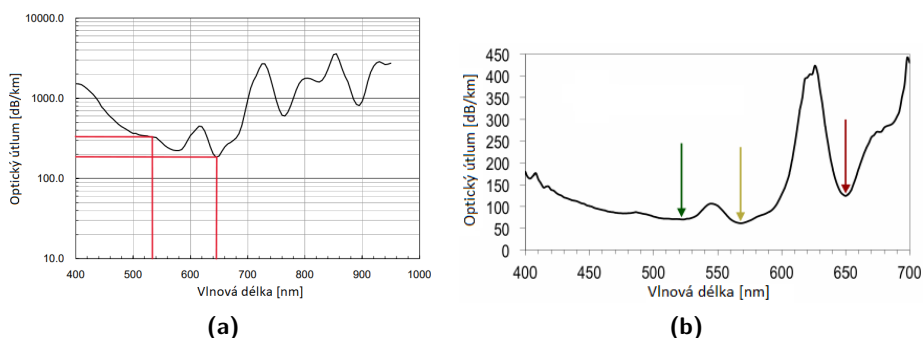
| Označení vlákna | Délka [m] | Dávka ozáření [kGy] | Dávkový příkon [Gy/h] | Poznámky |
|-----------------|-----------|---------------------|-----------------------|-----------|
| F1 | 20 | - | - | reference |
| F2 | 20 | 19,2 | 830 | ROZA |
| F3 | 5 | - | - | reference |
| F4 | 10 | 19,2 | 830 | ROZA |
| F5 | 5 | - | - | reference |
| F6 | 5 | 31,6 | 51 | PANOZA |
| F7 | 10 | - | - | reference |
| F8 | 10 | 31,6 | 51 | PANOZA |
| F9 | 20 | - | - | reference |
| F10 | 20 | 31,6 | 51 | PANOZA |

Polymerní vlákna GI-POF

Seznam měřených vláken GI-POF společně s obdrženou dávkou gama záření je uveden v tabulce 4.2. Pro účely experimentu byly vlákna P1, P2, P3 a P4 propojeny s 10metrovými vlákny GI-POF, kvůli možnosti měření optického útlumu během ozařování v ozařovně ROZA. Dále byla měřena 2 vlákna o délce 10 m a 2 vlákna o délce 20 m.

Optická vlákna GI-POF jsou určena pro vysokorychlostní přenos dat na krátkou vzdálenost. Jsou vyrobená z PMMA (polymethylmethakrylátu). Mají spojitě proměnný index lomu, průměr jádra $980 \mu\text{m}$, průměr pláště 1 mm a průměr primární ochrany 2,2 mm. Primární ochrana je vyrobena z polyethylenu. Na vlnové délce 650 nm má optické vlákno GI-POF měrný útlum $< 200 \text{ dB/km}$. Minimální poloměr při ohybu vlákna je 25 mm, numerická apertura vlákna je 0,23. Optická vlákna GI-POF jsou osazena konektory typu ST/PC [4].

Na obrázku 4.5 a) je zobrazena spektrální charakteristika vlákna GI-POF, obrázek převzat z [4]. Na obrázku 4.5 b) je zobrazena spektrální charakteristika vlákna POF se skokovou změnou indexu lomu, obrázek převzat z [18]. Spektrální charakteristika vykazuje nejnižší útlum na vlnové délce kolem 650 nm. U vláken POF se skokovou změnou indexu lomu je optický útlum nižší na vlnové délce 590 nm.



Obrázek 4.5 Spektrální charakteristika optických vláken POF a) se spojitě proměnnou změnou indexu lomu [4], b) se skokovou změnou indexu lomu [18].

Tabulka 4.2 Seznam měřených vláken GI-POF s konektory typu ST/PC.

| Označení vlákna | Délka [m] | Dávka ozáření [kGy] | Dávkový příkon [Gy/h] | Poznámky |
|-----------------|-----------|---------------------|-----------------------|-----------|
| P1 | 10 | - | - | reference |
| P2 | 10 | 19,2 | 830 | ROZA |
| P3 | 20 | - | - | reference |
| P4 | 20 | - | - | reference |
| P5 | 10 | - | - | reference |
| P6 | 10 | 31,6 | 51 | PANOZA |
| P7 | 20 | - | - | reference |
| P8 | 20 | 31,6 | 51 | PANOZA |

Optická vlákna FG050LGA a FG105LCA

Optické vlákno FG050LGA o délce 100 m bylo propojeno vlákny FG050LGA o délce 15 m a optické vlákna FG105LCA o délce 100 m a 20 m byla propojena vlákny FG105LCA o délce 15 m pro možnost měření optického útlumu během ozařování.

Jedná se o mnohavidová optická vlákna se skokovou změnou indexu lomu a numerickou aperturou 0,22. Optická vlákna FG050LGA a FG105LCA od společnosti Thorlabs, Inc. jsou vyrobená z čistého oxidu křemičitého (jádro) a plášť je vyroben z oxidu křemičitého dopovaného fluorem. Vlákna mají nízkou koncentraci hydroxylových iontů (OH) a jsou určena pro rozsah vlnových délek 400 nm - 2400 nm. Operační teplota vláken je v rozsahu od -40 °C do 85 °C, maximální útlum pro vlnovou délku 808 nm je 8 dB/km. Minimální poloměr při ohybu vlákna je 16 mm. Optická vlákna FG050LGA mají průměr jádra 50 μm , průměr pláště 125 μm a průměr primární ochrany 250 μm [19]. Optická vlákna FG105LCA mají průměr jádra 105 μm , průměr pláště 125 μm a průměr primární ochrany 250 μm [20].

Optická vlákna je možné použít pro technologii PoF (Power over Fiber), měření optického útlumu proběhlo na vlnové délce 850 nm, 980 nm a 1300 nm, avšak pro aplikaci PoF se dále nabízí vlnová délka 808 nm a 1490 nm.

Kapitola 5

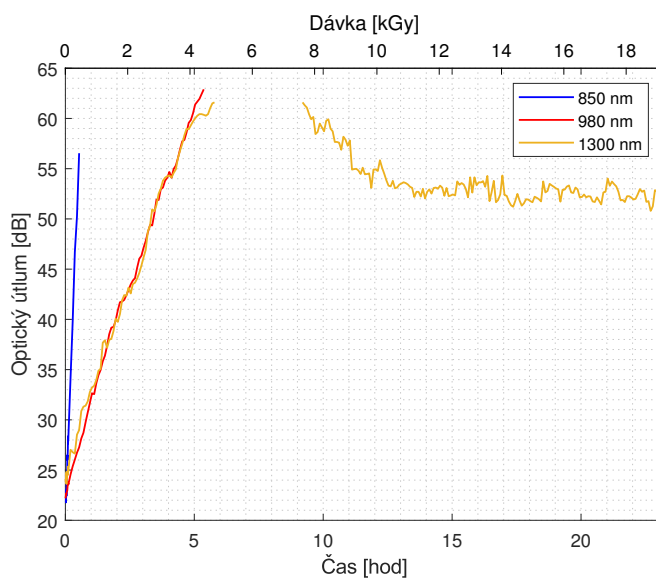
Výsledky měření

5.1 Měření vlastností optických vláken FONTEX

Měření optického útlumu

Ozařování optických vláken FONTEX o délce 20 m (F2) a 10 m (F4) v ozařovně ROZA začalo 28.11.2023 v 14 hodin a skončilo 29.11.2023 ve 13 hodin. Celková obdržená dávka gama záření byla 19,2 kGy s dávkovým příkonem 0,83 kGy/h.

Na obrázku 5.1 je zobrazena závislost optického útlumu na délce ozáření na vlnových délkách 850 nm, 980 nm a 1300 nm pro vlákno FONTEX o délce 20 m (F2).



Obrázek 5.1 Závislost optického útlumu na délce ozáření na vlnových délkách 850 nm, 980 nm a 1300 nm pro vlákno o délce 20 m (F2). Optické vlákno obdrželo celkovou dávku gama záření 19,2 kGy s dávkovým příkonem 0,83 kGy/h.

5. Výsledky měření

Optické vlákno o délce 20 m (F2) bylo ozářeno dávkou 19,2 kGy s dávkovým příkonem 0,83 kGy/h v ozařovně ROZA, průběh optického útlumu během ozařování je uveden na obrázku 5.1. Na vlnové délce 850 nm došlo ke zvýšení optického útlumu nad měřitelnou hodnotu již po 30 minutách ozařování, při odhadované dávce gama záření 415 Gy. Na vlnové délce 980 nm dosáhl optický útlum neměřitelných hodnot po 5 hodinách, při odhadované dávce gama záření 4,15 kGy. Na vlnové délce 1300 nm dosáhl optický útlum neměřitelných hodnot po 5 hodinách, při odhadované dávce gama záření 4,15 kGy, avšak po přibližně 9 hodinách, při dosažení odhadované dávky 7,47 kGy, se útlum vrátil do měřitelných hodnot během ozařování, kde jeho hodnota kolísala až do konce ozařování v rozsahu od 51 dB do 62 dB.

Naměřený optický útlum vláken FONTEX před a po ozařování v ozařovně ROZA je uveden v tabulce 5.1. Poslední měření bylo provedeno 99. den po ukončení ozařování.

Tabulka 5.1 Naměřený optický útlum vláken FONTEX před a po ozáření dávkou gama záření 19,2 kGy s dávkovým příkonem 0,83 kGy/h v ozařovně ROZA.

| Vlákno | Vlnová délka [nm] | Optický útlum [dB] | | | | | |
|-------------------------------------------------------------------|-------------------|--------------------|------------|-------------------|--------------------|--------------------|-----------------|
| | | před ozáření | po ozáření | 7. den po ozáření | 30. den po ozáření | 60. den po ozáření | poslední měření |
| 20 m (F2) | 850 | 21,50 | N | N | N | N | 57,01 |
| | 980 | 22,37 | N | N | 43,64 | 38,49 | 33,28 |
| | 1300 | 23,81 | 56,38 | 65,53 | 43,49 | 33,23 | 29,83 |
| 10 m (F4) | 850 | 11,68 | N | N | 58,77 | 38,95 | 29,74 |
| | 980 | 11,25 | 62,01 | 35,20 | 25,58 | 21,68 | 19,94 |
| | 1300 | 12,14 | 45,72 | 35,19 | 25,63 | 21,04 | 19,51 |
| N ... optický útlum je vyšší než nejnižší možná měřitelná hodnota | | | | | | | |

V tabulce 5.2 je uveden parametr RIA během relaxace optických vláken FONTEX o délce 10 m a 20 m, určeno podle vztahu (2.5). Poslední měření bylo provedeno 99. den po ukončení ozařování.

Tabulka 5.2 Parametr RIA stanovený během relaxačního procesu optických vláken FONTEX, po ozáření dávkou gama záření 19,2 kGy s dávkovým příkonem 0,83 kGy/h v ozařovně ROZA.

| Vlákno | Vlnová délka [nm] | RIA [dB/m] | | | | |
|------------------------------------------------------------------------|-------------------|------------|-------------------|--------------------|--------------------|-----------------|
| | | po ozáření | 7. den po ozáření | 30. den po ozáření | 60. den po ozáření | poslední měření |
| 20 m (F2) | 850 | N | N | N | N | 1,78 |
| | 980 | N | N | 1,06 | 0,81 | 0,55 |
| | 1300 | 1,63 | 2,09 | 0,98 | 0,47 | 0,30 |
| 10 m (F4) | 850 | N | N | 4,71 | 2,73 | 1,81 |
| | 980 | 5,08 | 2,40 | 1,43 | 1,04 | 0,87 |
| | 1300 | 3,36 | 2,31 | 1,35 | 0,89 | 0,74 |
| N ... parametr RIA nelze stanovit, optický útlum je neměřitelně vysoký | | | | | | |

Nejvyšší hodnota parametru RIA je na vlnové délce 850 nm, kde byl vlivem gama ozařování způsoben nejvyšší nárůst optického útlumu. Na vlnové délce 1300 nm byla nejnižší hodnota parametru RIA po ukončení ozařování, na vlnové délce 980 nm se během relaxačního procesu hodnota RIA přiblížila hodnotám na vlnové délce 1300 nm.

Ozařování optických vláken o délkách 5 m (F6), 10 m (F8) a 20 m (F10) v ozařovně PANOZA začalo 25.10.2023 v 15 hodin a skončilo 20.11.2023 ve 13 hodin. Celková obdržaná dávka ozáření byla 31,6 kGy s dávkovým příkonem 51 Gy/h. Naměřený optický útlum vláken FONTEX před a po ozařování v ozařovně PANOZA je uveden v tabulce 5.3. Optický útlum vláken FONTEX byl měřen pomocí přístroje OFT-4212MM, který měří optický útlum na vlnových délkách 850 nm, 980 nm a 1300 nm. Měření proběhlo před ozářením v ozařovně PANOZA a následně po ukončení ozáření byla měřena relaxace optických vláken po dobu 108 dnů. Během ozařování v ozařovací komoře PANOZA neprobíhalo měření optického útlumu. Poslední měření bylo provedeno 108. den po ukončení ozařování.

5. Výsledky měření

Tabulka 5.3 Naměřený optický útlum vláken FONTEX před a po ozáření dávkou gama záření 31,6 kGy s dávkovým příkonem 51 Gy/h v ozařovně PANOZA.

| Vlákno | Vlnová délka [nm] | Optický útlum [dB] | | | | | |
|------------|-------------------|--------------------|------------|-------------------|--------------------|--------------------|-----------------|
| | | před ozářením | po ozáření | 7. den po ozáření | 30. den po ozáření | 60. den po ozáření | poslední měření |
| 5 m (F6) | 850 | 2,18 | N | N | 31,79 | 22,12 | 15,43 |
| | 980 | 3,08 | 27,28 | 17,15 | 11,92 | 10,75 | 7,25 |
| | 1300 | 2,62 | 26,42 | 20,76 | 15,11 | 12,41 | 11,57 |
| 10 m (F8) | 850 | 1,24 | N | N | 39,23 | 26,10 | 17,54 |
| | 980 | 1,86 | 37,90 | 21,70 | 13,98 | 11,42 | 7,66 |
| | 1300 | 1,22 | 35,77 | 24,82 | 15,78 | 11,83 | 10,48 |
| 20 m (F10) | 850 | 5,03 | N | N | N | N | 38,47 |
| | 980 | 5,17 | N | 47,72 | 35,91 | 29,29 | 20,60 |
| | 1300 | 7,97 | N | N | 40,53 | 29,79 | 26,43 |

N ... optický útlum je vyšší než nejnižší možná měřitelná hodnota

U optických vláken FONTEX byl před ozářením naměřen nejnižší útlum na vlnové délce 850 nm (2,18 dB pro vlákno o délce 5 m). Po ozáření byl optický útlum nejvyšší na vlnové délce 850 nm, kde dosahoval neměřitelných hodnot. Nejnižší hodnota optického útlumu po ozáření byla zaznamenána na vlnové délce 1300 nm (26,42 dB pro vlákno o délce 5 m), během relaxace se nejvíce snižoval útlum na vlnové délce 980 nm.

V tabulce 5.4 jsou uvedeny výsledky pro RIA během relaxace optických vláken FONTEX o délce 5 m, 10 m a 20 m, určených podle vztahu (2.5). Poslední měření bylo provedeno 108. den po ukončení ozařování.

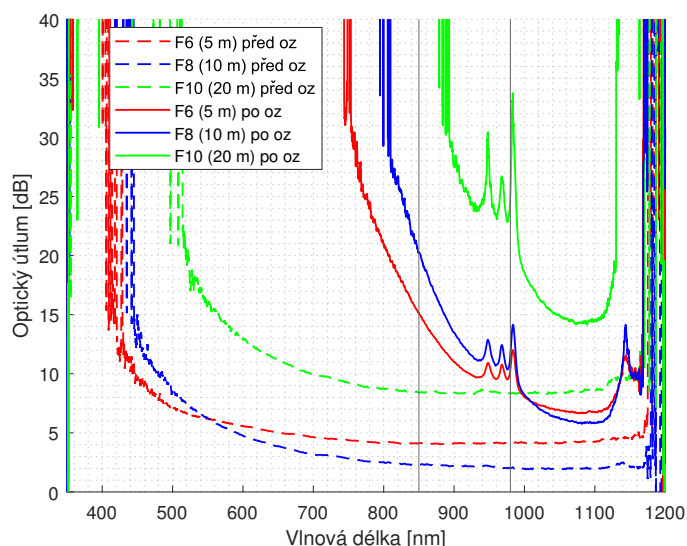
Tabulka 5.4 Parametr RIA během relaxačního procesu optických vláken FONTEX, po ozáření dávkou gama záření 31,6 kGy s dávkovým příkonem 51 Gy/h v ozařovně PANOZA.

| Vlákno | Vlnová délka [nm] | RIA [dB/m] | | | | |
|------------------------------------------------------------------------|-------------------|------------|-------------------|--------------------|--------------------|-----------------|
| | | po ozáření | 7. den po ozáření | 30. den po ozáření | 60. den po ozáření | poslední měření |
| 5 m (F6) | 850 | N | N | 5,92 | 3,99 | 2,65 |
| | 980 | 4,84 | 2,81 | 1,77 | 1,53 | 0,83 |
| | 1300 | 4,76 | 3,63 | 2,50 | 1,96 | 1,79 |
| 10 m (F8) | 850 | N | N | 7,60 | 4,97 | 1,63 |
| | 980 | 7,21 | 3,97 | 2,42 | 1,91 | 0,58 |
| | 1300 | 6,91 | 4,72 | 2,91 | 2,12 | 0,93 |
| 20 m (F10) | 850 | N | N | N | N | 1,67 |
| | 980 | N | 8,51 | 6,15 | 4,82 | 0,77 |
| | 1300 | N | N | 6,51 | 4,36 | 0,92 |
| N ... parametr RIA nelze stanovit, optický útlum je neměřitelně vysoký | | | | | | |

Na vlnové délce 850 nm je nejvyšší hodnota parametru RIA, kde byl gama ozařováním způsoben nejvyšší nárůst optického útlumu. Na vlnové délce 1300 nm byla nejnižší hodnota parametru RIA po ukončení ozařování, na vlnové délce 980 nm na konci relaxačního procesu (108. den) byla hodnota RIA nižší než na vlnové délce 1300 nm.

Měření spektrálních charakteristik

Na obrázku 5.2 jsou uvedeny spektrální charakteristiky pro optická vlákna FONTEX o délce 5 m (F6), 10 m (F8) a 20 m (F10) před ozářením a po ozáření dávkou gama záření 31,6 kGy s dávkovým příkonem 51 Gy/h. Spektrální charakteristiky byly měřeny 120. den (2880 hodin) po ozáření v ozařovací komoře PANOZA.



Obrázek 5.2 Spektrální charakteristiky vláken FONTEX o délkách 5 m (F6), 10 m (F8) a 20 m (F10) před ozářením a po ozáření dávkou 31,6 kGy s dávkovým příkonem 51 Gy/h v ozařovací komoře PANOZA.

Měřené vlnové délky 850 nm a 980 nm jsou vyznačeny svislou čarou. Spektrální charakteristiky pro optická vlákna FONTEX před ozářením jsou na obrázku 5.2 znázorněna čárkovanými čarami, po ozáření jsou znázorněna plnými čarami. Optická vlákna FONTEX jsou určena na přenos na vlnové délce 850 nm, kde mají nejnižší útlum, ze spektrální charakteristiky vyplývá, že vlivem gama záření se útlum nejvíce zvýšil právě na této vlnové délce. Útlum způsobený vlivem gama záření se postupně snižuje až do vlnové délky 1100 nm. Na vlnové délce 980 nm optický útlum značně vzrostl.

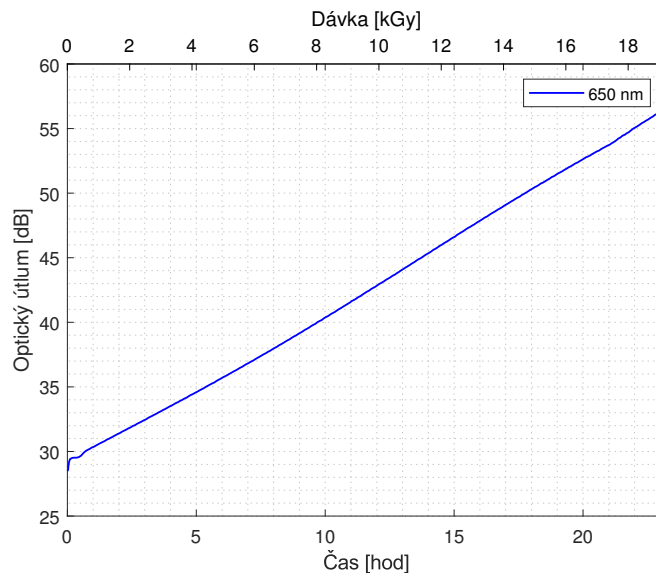
Naměřené výsledky jsem porovnal s výsledky publikovanými v [22], kde bylo měřeno mnohavidové optické vlákno z materiálu CYTOP® s gradientním indexem lomu, průměrem jádra 50 μm a průměrem pláště 490 μm z polykarbonátu. Uvedené optické vlákno bylo ozářeno dávkou gama záření 5 kGy. Byla měřena spektrální charakteristika v rozsahu 700 nm - 1700 nm po ozáření dávkou gama záření 1 kGy a 5 kGy. Při dosažení dávky gama záření 5 kGy byla nejvyšší hodnota optického útlumu na vlnové délce 850 nm, nižších vlnových délkách a v rozsahu vlnových délek 1350 nm - 1500 nm. Nejnižší hodnota optického útlumu byla na vlnové délce kolem 1050 nm. Na vlnové délce 1300 nm byl nižší útlum než na vlnové délce 980 nm a 850 nm [22].

5.2 Měření vlastností optických vláken GI-POF

Měření optického útlumu

Ozařování optického vlákna GI-POF P2 (10 m) v ozařovně ROZA začalo 28.11.2023 v 14 hodin a skončilo 29.11.2023 ve 13 hodin. Celková obdržená dávka gama záření byla 19,2 kGy s dávkovým příkonem 0,83 kGy/h.

Na obrázku 5.3 je zobrazena závislost optického útlumu na délce ozáření v ozařovně ROZA na vlnové délce 650 nm pro vlákno o délce 10 m (P2).



Obrázek 5.3 Závislost optického útlumu na dávce gama záření na vlnové délce 650 nm pro vlákno o délce 10 m (P2). Optické vlákno obdrželo celkovou dávku gama záření 19,2 kGy s dávkovým příkonem 0,83 kGy/h.

Po zahájení ozařování došlo k postupnému navyšování optického útlumu, průběh optického útlumu během ozařování v závislosti na obdržené dávce gama záření byl téměř lineární. Optický útlum se na vlnové délce 650 nm vlivem gama záření zvýšil celkem o 27,86 dB.

Naměřené hodnoty optického útlumu pro vlákna GI-POF před a po ozařování v ozařovně ROZA jsou uvedeny v tabulce 5.5. Optický útlum vláken GI-POF byl měřen na přístroji OFT-820-POF před ozářením na vlnových délkách 535 nm a 650 nm, po ozáření byl optický útlum na vlnové délce 535 nm neměřitelně vysoký, měření relaxace následně probíhalo na vlnové délce 650 nm po dobu 19 dnů, kdy byl následně změřen optický útlum na vlnové délce 535 nm.

Tabulka 5.5 Naměřený optický útlum vlákna GI-POF před a po ozáření dávkou gama záření 19,2 kGy s dávkovým příkonem 0,83 kGy/h v ozařovně ROZA.

| Vlákno | Vlnová délka [nm] | Optický útlum [dB] | | | |
|-------------------------------------------------------------------|-------------------|--------------------|-----------------|----------------------|--------------------|
| | | před ozá- řením | po ozá- ření | 7. den po ozáření | poslední měření |
| 10 m (P2) | 535 | 40,09 | N | N | 47,26 |
| | 650 | 28,51 | 56,37 | 55,17 | 28,73 |
| N ... optický útlum je vyšší než nejnižší možná měřitelná hodnota | | | | | |

Před ozářením byla hodnota optického útlumu vlákna GI-POF o délce 10 m (P2) výrazně nižší na vlnové délce 650 nm, kde primárně probíhalo měření, než na vlnové délce 535 nm. Vlivem gama záření se optický útlum na vlnové délce 650 nm navýšil z 28,51 dB na 56,37 dB. Po ukončení měření relaxace se hodnota optického útlumu na vlnové délce 650 nm téměř vrátila k původní hodnotě před ozářením, s rozdílem 0,22 dB. Na vlnové délce 535 nm byl rozdíl od původní hodnoty 7,17 dB.

Naměřené výsledky jsem porovnal s výsledky publikovanými v [9], kde bylo měřeno optické vlákno POF o délce 10 m se skokovou změnou indexu lomu a průměrem jádra 1 mm. Uvedené optické vlákno bylo ozářeno dávkou gama záření 51,3 kGy. Optický útlum byl měřen na vlnové délce 650 nm, při dosažení přibližné dávky gama záření 19 kGy byla hodnota optického útlumu kolem 23 dB, optický útlum před ozářením byl 12,66 dB, tedy vlivem gama záření došlo ke zvýšení optického útlumu přibližně o 10,34 dB [9]. Při měření optického vlákna GI-POF o délce 10 m, které bylo ozářeno dávkou gama záření 19,2 kGy, se optický útlum navýšil o 27,86 dB na vlnové délce 650 nm. Nárůst optického útlumu u měřených vláken GI-POF byl výrazně vyšší než u optických vláken POF se skokovou změnou indexu lomu.

V tabulce 5.6 je uveden parametr RIA během relaxace optického vlákna GI-POF o délce 10 m, určeného podle vztahu (2.5). Poslední měření bylo provedeno 19. den po ukončení ozařování.

Tabulka 5.6 Parametr RIA během relaxačního procesu optického vlákna GI-POF o délce 10 m, po ozáření dávkou gama záření 19,2 kGy s dávkovým příkonem 0,83 kGy/h v ozařovně ROZA.

| Vlákno | Vlnová délka [nm] | RIA [dB/m] | | |
|------------------------------------------------------------------------|-------------------|------------|-------------------|-----------------|
| | | po ozáření | 7. den po ozáření | poslední měření |
| 10 m (P2) | 535 | N | N | 0,72 |
| | 650 | 2,79 | 2,67 | 0,02 |
| N ... parametr RIA nelze stanovit, optický útlum je neměřitelně vysoký | | | | |

Na vlnové délce 650 nm byla po ozáření hodnota RIA 2,79 dB/m a po ukončení měření relaxačního procesu (19. den) byla hodnota RIA 0,02 dB/m. Na vlnové délce 535 nm po ukončení měření relaxace byla hodnota RIA 0,72 dB/m.

Ozařování optických vláken o délkách 10 m (P6) a 20 m (P8) v ozařovně PANOZA začalo 25.10.2023 v 15 hodin a skončilo 20.11.2023 ve 13 hodin. Celková obdržaná dávka ozáření byla 31,6 kGy s dávkovým příkonem 51 Gy/h. Naměřený optický útlum optických vláken GI-POF před a po ozařování v ozařovně PANOZA je uveden v tabulce 5.7. Poslední měření bylo provedeno 27. den po ukončení ozařování.

Tabulka 5.7 Naměřený optický útlum vláken GI-POF před a po ozáření dávkou gama záření 31,6 kGy s dávkovým příkonem 51 Gy/h v ozařovně PANOZA.

| Vlákno | Vlnová délka [nm] | Optický útlum [dB] | | | |
|----------------------------------------------------------------|-------------------|--------------------|------------|-------------------|-----------------|
| | | před ozářením | po ozáření | 7. den po ozáření | poslední měření |
| 10 m (P6) | 535 | 16,36 | N | N | 22,97 |
| | 650 | 8,65 | 42,26 | 27,60 | 9,72 |
| 20 m (P8) | 535 | 23,86 | N | N | 32,57 |
| | 650 | 13,22 | N | 42,96 | 13,88 |
| N ... optický útlum vyšší než nejnižší možná měřitelná hodnota | | | | | |

Měření probíhalo primárně na vlnové délce 650 nm z důvodu neměřitelně vysokého útlumu na vlnové délce 535 nm. U optického vlákna s délkou 10 m (P6) se útlum vlivem gama záření zvýšil o 33,61 dB na vlnové délce 650 nm, na vlnové délce 535 nm byla hodnota optického útlumu neměřitelně

vysoká. Po ukončení měření relaxace v 27. den po ozáření byl optický útlum na vlnové délce 650 nm pouze o 1,07 dB vyšší, než byla hodnota optického útlumu před ozářením, na vlnové délce 535 nm byl o 6,61 dB vyšší, než byla hodnota optického útlumu před ozářením. U optického vlákna s délkou 20 m (P8) došlo vlivem gama záření k nárůstu optického útlumu na neměřitelně vysokou hodnotu. Po ukončení měření relaxace v 27. den byl optický útlum na vlnové délce 650 nm pouze o 0,66 dB vyšší, než byla hodnota optického útlumu před ozářením, na vlnové délce 535 nm byl o 8,71 dB vyšší, než byla hodnota optického útlumu před ozářením.

V tabulce 5.8 jsou uvedeny hodnoty pro parametr RIA během relaxace optických vláken GI-POF o délce 10 m a 20 m, určené podle vztahu (2.5). Poslední měření bylo provedeno 27. den po ukončení ozařování.

Tabulka 5.8 Hodnoty pro parametr RIA během relaxačního procesu optických vláken GI-POF o délce 10 m a 20 m, po ozáření dávkou gama záření 19,2 kGy s dávkovým příkonem 0,83 kGy/h v ozařovně ROZA.

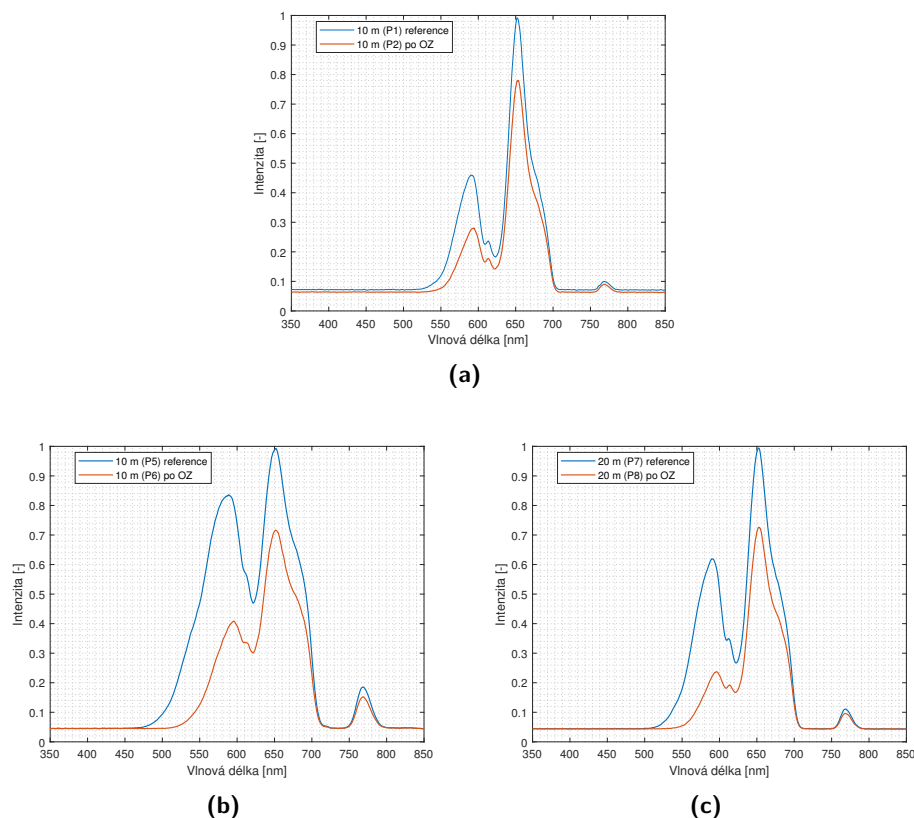
| Vlákno | Vlnová délka [nm] | RIA [dB/m] | | |
|------------------------------------------------------------------------|-------------------|------------|-------------------|-----------------|
| | | po ozáření | 7. den po ozáření | poslední měření |
| 10 m (P6) | 535 | N | N | 0,66 |
| | 650 | 3,36 | 1,90 | 0,11 |
| 20 m (P8) | 535 | N | N | 0,44 |
| | 650 | N | 1,49 | 0,03 |
| N ... parametr RIA nelze stanovit, optický útlum je neměřitelně vysoký | | | | |

Na vlnové délce 650 nm byla po ozáření hodnota RIA 3,36 dB/m pro vlákno o délce 10 m (P6), pro vlákno o délce 20 m (P8) byl optický útlum neměřitelně vysoký. Po ukončení měření relaxačního procesu (19. den) byla hodnota parametru RIA na vlnové délce 650 nm 0,11 dB/m pro vlákno o délce 10 m (P6) a 0,03 dB/m pro vlákno o délce 20 m (P8), na vlnové délce 535 nm byla hodnota RIA 0,66 dB/m pro vlákno o délce 10 m (P6) a 0,44 dB/m pro vlákno o délce 20 m (P8).

Měření spektrálních charakteristik

Na obrázku 5.4 jsou uvedeny spektrální charakteristiky optických vláken GI-POF o délce a) 10 m (P1, P2) b) 10 m (P5, P6) c) 20 m (P7, P8). Z obrázku 5.4 vyplývá, že optický útlum se vlivem účinků gama záření zvýšil

a došlo k posunutí absorpční hrany. Nejnižší změna je pozorována na vlnových délkách kolem 600 nm a 660 nm.



Obrázek 5.4 Spektrální charakteristika optických vláken GI-POF o délce a) 10 m (P1, P2), b) 10 m (P5, P6), c) 20 m (P7, P8). Optické vlákno P2 o délce 10 m po ozáření v ozařovací komoře ROZA a optická vlákna P6 a P8 o délce 10 m a 20 m po ozáření v ozařovací komoře PANOZA.

5.3 Měření vlastností optických vláken FG050LGA

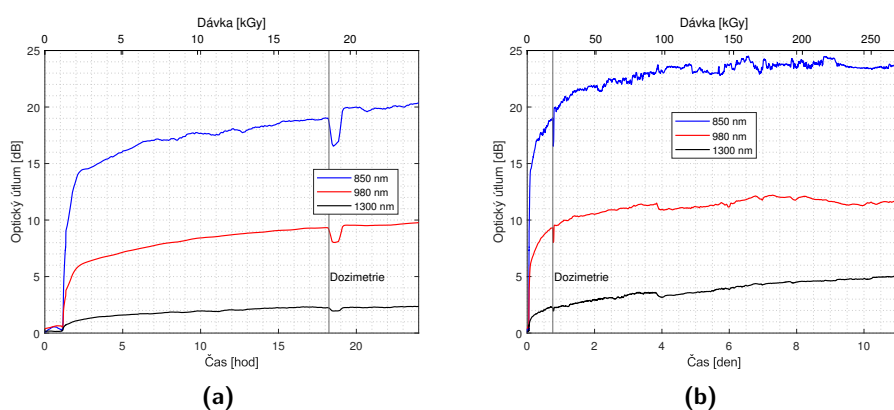
Měření optického útlumu

Ozařování optického vlákna FG050LGA o délce 100 m v ozařovací komoře PRAZDROJ začalo 4.4.2024 ve 14:44 hodin a skončilo 15.4.2024 v 11:48 hodin. Celková obdržaná dávka gama záření byla 266 kGy s dávkovým příkonem 1,02 kGy/h.

Na obrázku 5.5 a) je zobrazena závislost optického útlumu na délce ozařování během prvního dne v ozařovně PRAZDROJ pro vlákno FG050LGA o délce

5. Výsledky měření

100 m. Na obrázku 5.5 b) je zobrazena závislost optického útlumu po celou délku ozařování.



Obrázek 5.5 Závislost optického útlumu na dávce gama záření pro vlákna FG050LGA o délce 100 m během ozařování v ozařovně PRAZDROJ a) průběh optického útlumu během 1. dne ozařování, b) celkový průběh optického útlumu. Optické vlákno obdrželo dávku gama záření 266 kGy s dávkovým příkonem 1,02 kGy/h.

Z obrázku 5.5 vyplývá, že nejvyšší nárůst optického útlumu nastal ihned na začátku ozařování. Během ozařování nárůst optického útlumu postupně klesal.

Po ukončení ozařování došlo k přesunu měřených vzorků do laboratoře PLANIO, kde byla měřena relaxace optických vláken po ozáření. Naměřené hodnoty optického útlumu vlákna FG050LGA o délce 100 m jsou uvedeny v tabulce 5.9. Poslední měření bylo provedeno 20. den po ozařování, kdy hodnota optického útlumu v porovnání s hodnotou optického útlumu před ukončením ozařování klesla z 23,68 dB na 3,68 dB na vlnové délce 850 nm, z 11,62 dB na 0,77 dB na vlnové délce 980 nm a z 5,02 dB na 2,14 dB na vlnové délce 1300 nm.

Tabulka 5.9 Naměřený optický útlum vlákna FG050LGA o délce 100 m před a po ozáření dávkou gama záření 266 kGy s dávkovým příkonem 1,02 kGy/h v ozařovně PRAZDROJ.

| Vlnová délka [nm] | Optický útlum [dB] | | | | | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| | před ozářením | před ukončením ozařování | po ozáření (ÚJV) | po ozáření (ČVUT) | 1. den po ozáření | 7. den po ozáření | poslední měření |
| 850 | 0,36 | 23,68 | 7,62 | 5,78 | 5,02 | 4,28 | 3,68 |
| 980 | 0,54 | 11,62 | 3,40 | 1,53 | 1,30 | 0,51 | 0,77 |
| 1300 | 0,18 | 5,02 | 3,48 | 3,64 | 3,24 | 2,98 | 2,14 |
| po ozáření (ÚJV) - po ukončení ozařování a před deinstalací a převozem na ČVUT po ozáření (ČVUT) - první měření po převozu a připojení vzorků na pracovišti ČVUT | | | | | | | |

V tabulce 5.10 jsou uvedeny hodnoty pro parametr RIA během relaxace optického vlákna FG050LGA o délce 100 m, určené podle vztahu (2.5). Poslední měření bylo provedeno 20. den po ozařování.

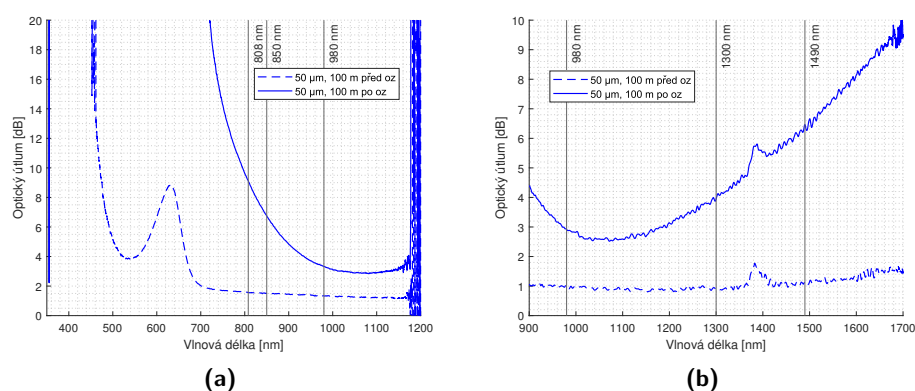
Tabulka 5.10 Hodnoty parametru RIA pro vlákno FG050LGA o délce 100 m před a po ozáření dávkou gama záření 266 kGy s dávkovým příkonem 1,02 kGy/h v ozařovně PRAZDROJ.

| Vlnová délka [nm] | RIA [dB/m] | | | | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| | před ukončením ozařování | po ozáření (ÚJV) | po ozáření (ČVUT) | 1. den po ozáření | 7. den po ozáření | poslední měření |
| 850 | 0,233 | 0,073 | 0,054 | 0,047 | 0,039 | 0,033 |
| 980 | 0,111 | 0,029 | 0,010 | 0,008 | 0,000 | 0,002 |
| 1300 | 0,048 | 0,033 | 0,035 | 0,031 | 0,028 | 0,020 |
| po ozáření (ÚJV) - po ukončení ozařování a před deinstalací a převozem na ČVUT po ozáření (ČVUT) - první měření po převozu a připojení vzorků na pracovišti ČVUT | | | | | | |

Před ukončením ozařování byla nejnižší hodnota parametru RIA 0,048 dB/m na vlnové délce 1300 nm pro vlákna FG050LGA o délce 100 m, po zahájení relaxačního procesu byla nižší hodnota RIA na vlnové délce 980 nm, kde 20. den hodnota RIA činila 0,002 dB/m, na vlnové délce 850 nm 0,033 dB/m a na vlnové délce 1300 nm 0,020 dB/m.

Měření spektrálních charakteristik

Na obrázku 5.6 jsou uvedeny spektrální charakteristiky pro optické vlákno FG050LGA o délce 100 m.



Obrázek 5.6 Spektrální charakteristiky pro optické vlákno FG050LGA o délce 100 m a) pro rozsah vlnových délek 350 nm - 1200 nm, b) pro rozsah vlnových délek 900 nm - 1700 nm. Měřeno před a po ozáření dávkou gama záření 266 kGy s dávkovým příkonem 1,02 kGy/h v ozařovně PRAZDROJ.

Z obrázku 5.6 vyplývá, že nejnižší optický útlum je kolem vlnové délky 1050 nm - 1100 nm. Na vlnové délce 850 nm a nižších vlnových délkách je vysoký nárůst optického útlumu. Na vlnové délce 980 nm je nižší optický útlum než na vlnové délce 1300 nm po ukončení ozařování, během ozařování byla naměřena nižší hodnota optického útlumu na vlnové délce 1300 nm.

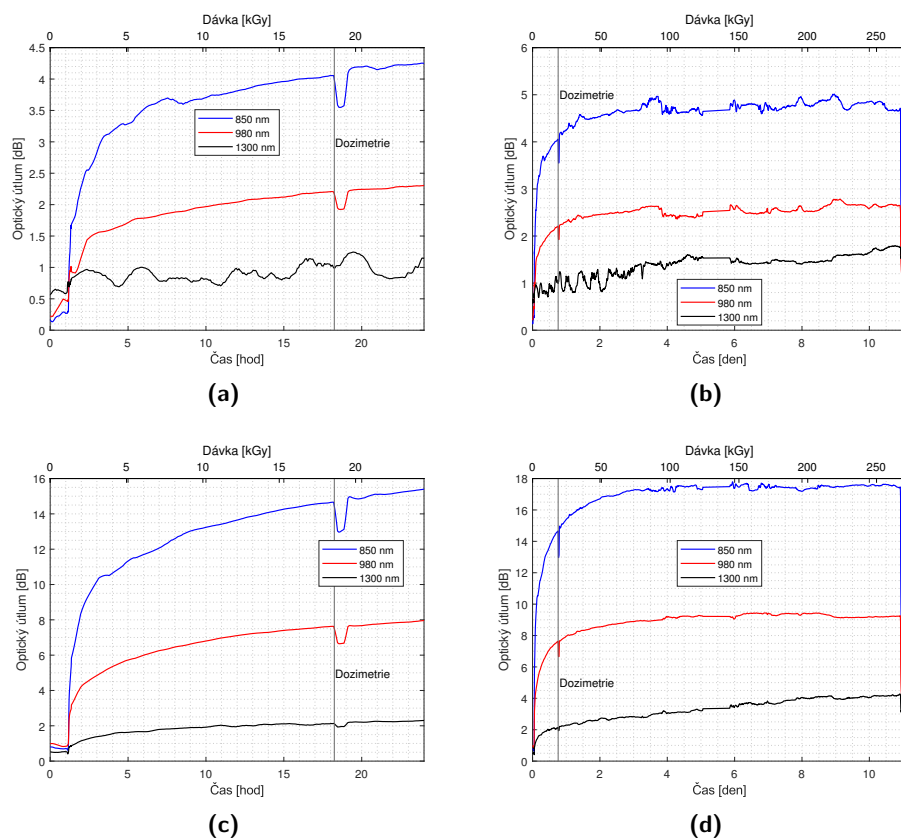
5.4 Měření vlastností optických vláken FG105LCA

Měření optického útlumu

Ozařování optických vláken FG105LCA o délce 20 m a 100 m v ozařovací komoře PRAZDROJ začalo 4.4.2024 ve 14:44 hodin a skončilo 15.4.2024 v 11:48 hodin. Celková obdržaná dávka gama záření byla 266 kGy s dávkovým příkonem 1,02 kGy/h.

Na obrázku 5.7 je zobrazena závislost optického útlumu na délce ozařování v ozařovně PRAZDROJ pro optické vlákna FG105LCA o délce 20 m a 100 m.

5.4. Měření vlastností optických vláken FG105LCA



Obrázek 5.7 Závislost optického útlumu na dávce gama záření pro optické vlákna FG105LCA o délce a) 20 m během prvního dne ozařování, b) 20 m po celou dobu ozařování, c) 100 m během prvního dne ozařování, d) 100 m po celou dobu ozařování. Optické vlákno během ozařování v ozařovně PRAZDROJ obdrželo dávku gama záření 266 kGy s dávkovým příkonem 1,02 kGy/h.

Z obrázku 5.7 vyplývá, že nejvyšší nárůst optického útlumu nastal ihned na začátku ozařování. Během ozařování nárůst optického útlumu postupně klesal. Na obrázku lze také pozorovat, že relaxační proces nastal ihned po ukončení ozařování. U vlákna o délce 100 m byl nejnižší nárůst optického útlumu vlivem gama záření na vlnové délce 1300 nm, kde se útlum zvýšil z 0,42 dB na 4,22 dB. Na vlnové délce 980 nm došlo k nárůstu optického útlumu z 1,05 dB na 9,24 dB a na vlnové délce 850 nm se optický útlum zvýšil z 0,73 dB na 17,44 dB.

5. Výsledky měření

Po ukončení ozařování došlo k přesunu měřených vzorků do laboratoře PLANIO, kde byla měřena relaxace optických vláken po ozáření. Naměřené hodnoty optického útlumu vláken FG105LCA jsou uvedeny v tabulce 5.11. Poslední měření bylo provedeno 20. den po ozařování.

Tabulka 5.11 Naměřený optický útlum vláken FG105LCA před a po ozáření dávkou gama záření 266 kGy s dávkovým příkonem 1,02 kGy/h v ozařovně PRAZDROJ.

| Délka [m] | Vlnová délka [nm] | Optický útlum [dB] | | | | | | |
|-----------|-------------------|--------------------|--------------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| | | před ozářením | před ukončením ozařování | po ozáření (ÚJV) | po ozáření (ČVUT) | 1. den po ozáření | 7. den po ozáření | poslední měření |
| 20 | 850 | 0,02 | 4,68 | 1,78 | 1,46 | 1,33 | 1,25 | 1,23 |
| | 980 | 0,36 | 2,64 | 0,97 | 0,74 | 0,80 | 0,68 | 0,64 |
| | 1300 | 0,14 | 1,77 | 1,39 | 1,32 | 1,27 | 1,29 | 1,30 |
| 100 | 850 | 0,73 | 17,44 | 6,78 | 5,46 | 5,11 | 4,42 | 4,22 |
| | 980 | 1,05 | 9,24 | 3,53 | 2,83 | 2,56 | 2,34 | 2,09 |
| | 1300 | 0,42 | 4,22 | 3,12 | 3,31 | 3,18 | 2,84 | 2,57 |

po ozáření (ÚJV) - po ukončení ozařování a před deinstalací a převozem na ČVUT
 po ozáření (ČVUT) - první měření po převozu a připojení vzorků na pracovišti ČVUT

Z naměřených hodnot uvedených v tabulce 5.11 vyplývá, že před ozářením byla nejnižší hodnota optického útlumu na vlnové délce 850 nm a 1300 nm. Nejvyšší nárůst útlumu po během gama ozařování byl pozorován na vlnové délce 850 nm. Relaxační proces se nejvíce projevil na vlnové délce 980 nm, kde 20. den po ozáření v případě optického vlákna dlouhého 100 m útlum klesl o 7,15 dB na hodnotu 2,09 dB.

Naměřené výsledky jsem porovnal s výsledky publikovanými v [21], kde vlákno s průměrem jádra 105 μm o délce 20 m bylo ozářeno dávkou 181 kGy s dávkovým příkonem 1,9 kGy/h a optický útlum byl 8,42 dB na vlnové délce 850 nm, 5,91 dB na vlnové délce 980 nm a 3,44 dB na vlnové délce 1300 nm [21]. Zde dosažené hodnoty optického útlumu jsou vyšší než po ozáření dávkou gama záření 266 kGy, kde byl nižší dávkový příkon 1,02 kGy/h.

V tabulce 5.12 jsou uvedeny hodnoty pro parametr RIA během relaxace optických vláken FG105LCA o délce 20 m a 100 m, určené podle vztahu (2.5). Poslední měření bylo provedeno 20. den po ozařování.

Tabulka 5.12 Hodnoty parametru RIA pro vlákna FG105LCA o délce 20 m a 100 m před a po ozáření dávkou gama záření 266 kGy s dávkovým příkonem 1,02 kGy/h v ozařovně PRAZDROJ.

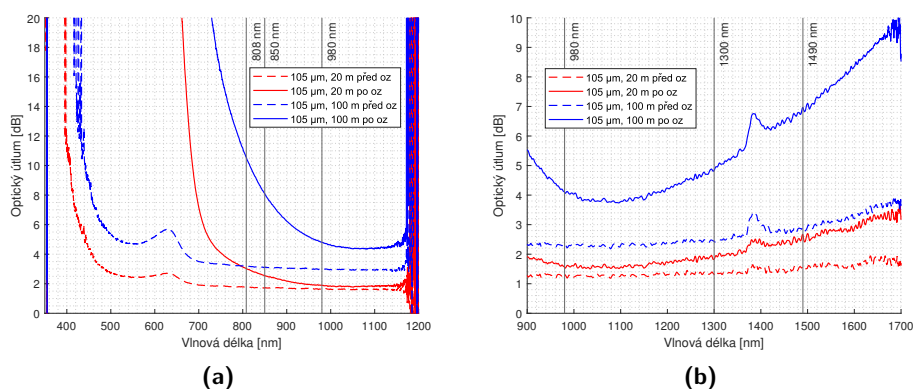
| Délka [m] | Vlnová délka [nm] | RIA [dB/m] | | | | | |
|-----------|-------------------|--------------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| | | před ukončením ozařování | po ozáření (ÚJV) | po ozáření (ČVUT) | 1. den po ozáření | 7. den po ozáření | poslední měření |
| 20 m | 850 | 0,233 | 0,088 | 0,072 | 0,066 | 0,062 | 0,061 |
| | 980 | 0,114 | 0,031 | 0,019 | 0,022 | 0,016 | 0,014 |
| | 1300 | 0,082 | 0,063 | 0,059 | 0,057 | 0,058 | 0,058 |
| 100 m | 850 | 0,167 | 0,061 | 0,047 | 0,044 | 0,037 | 0,035 |
| | 980 | 0,082 | 0,025 | 0,018 | 0,015 | 0,013 | 0,010 |
| | 1300 | 0,038 | 0,027 | 0,029 | 0,028 | 0,024 | 0,022 |

po ozáření (ÚJV) - po ukončení ozařování a před deinstalací a převozem na ČVUT
 po ozáření (ČVUT) - první měření po převozu a připojení vzorků na pracovišti ČVUT

Před ukončením ozařování byla nejnižší hodnota parametru RIA 0,038 dB/m na vlnové délce 1300 nm pro vlákno FG105LCA o délce 100 m, po zahájení relaxačního procesu byla nižší hodnota RIA na vlnové délce 980 nm, kde 20. den činila 0,010 dB/m, na vlnové délce 850 nm 0,035 dB/m a na vlnové délce 1300 nm 0,022 dB/m pro vlákno o délce 100 m. Pro vlákno o délce 20 m byla 20. den hodnota parametru RIA 0,061 dB/m na vlnové délce 850 nm, 0,014 dB/m na vlnové délce 980 nm a 0,058 dB/m na vlnové délce 1300 nm.

Měření spektrálních charakteristik

Na obrázku 5.8 jsou uvedeny spektrální charakteristiky optického vlákna FG105LCA o délce 100 m.



Obrázek 5.8 Spektrální charakteristika optických vláken FG105LCA o délce 20 m a 100 m a) pro rozsah vlnových délek 350 nm - 1200 nm, b) pro rozsah vlnových délek 900 nm - 1700 nm. Měřeno před a po ozáření dávkou gama záření 266 kGy s dávkovým příkonem 1,02 kGy/h v ozařovně PRAZDROJ.

Z obrázku 5.8 vyplývá, že nejnižší optický útlum je kolem vlnové délky 1000 nm - 1100 nm. Na vlnové délce 850 nm je srovnatelný optický útlum s útlumem na vlnové délce 1490 nm pro aplikaci PoF. Na vlnové délce 808 nm je optický útlum přibližně o 2,5 dB vyšší než na vlnové délce 850 nm pro optické vlákno o délce 100 m.

Kapitola 6

Závěr

Bakalářská práce se zabývá měřením vlastností optických vláken a změnou optického útlumu vlivem gama záření. Při řešení bakalářské práce proběhly celkem 3 experimenty v ozařovacích komorách ROZA, PRAZDROJ a PANOZA na pracovišti ÚJV Řež, a.s. Po ukončení ozařování bylo provedeno měření relaxace optických vláken v laboratoři PLANIO na Katedře mikroelektroniky, Fakulta elektrotechnická ČVUT v Praze.

Měření jsem prováděl pro mnohavidové optické vlákno PMMA GI-POF o délce 10 m s průměrem jádra $980 \mu\text{m}$, které bylo ozářeno dávkou $19,2 \text{ kGy}$ s dávkovým příkonem $0,83 \text{ kGy/h}$ v ozařovně ROZA. Měření optického útlumu jsem prováděl na dvou vlnových délkách 535 nm a 650 nm . Optický útlum vláken byl měřen metodou vložených ztrát.

Optický útlum vlákna GI-POF o délce 10 m (P2) byl před ozářením $28,51 \text{ dB}$ na vlnové délce 650 nm a $40,09 \text{ dB}$ na vlnové délce 535 nm . Během ozařování vlivem gama záření optický útlum vláken GI-POF v čase rostl přibližně lineární závislostí. Po ozáření dávkou $19,2 \text{ kGy}$ byl naměřen útlum $56,37 \text{ dB}$ na vlnové délce 650 nm , na vlnové délce 535 nm útlum přesahoval nejvyšší měřitelnou hodnotu. Vlivem ozáření se optický útlum zvýšil o $27,86 \text{ dB}$. Měření relaxačního procesu bylo ukončeno 19. den po ozáření, kdy se optický útlum přestal měnit. Na vlnové délce 650 nm byl optický útlum $28,73 \text{ dB}$ a na vlnové délce 535 nm byl optický útlum $47,26 \text{ dB}$.

Dále jsem měřil mnohavidová optická vlákna PMMA GI-POF o délce 10 m (P6) a 20 m (P8), kde bylo provedeno ozařování dávkou gama záření $31,6 \text{ kGy}$ s dávkovým příkonem 51 Gy/h v ozařovně PANOZA.

U Optického vlákna GI-POF o délce 10 m (P6) byl před ozařováním naměřen optický útlum $16,36 \text{ dB}$ na vlnové délce 535 nm a $8,65 \text{ dB}$ na vlnové délce 650 nm , vlivem gama záření se optický útlum zvýšil na $42,26 \text{ dB}$ na vlnové délce 650 nm , na vlnové délce 535 nm byla jeho hodnota po ozáření neměřitelně vysoká. Optický útlum u vlákna GI-POF o délce 20 m (P8) byl před ozařováním $23,86 \text{ dB}$ na vlnové délce 535 nm a $13,22$ na vlnové délce 650 nm . Po ustálení optického útlumu 27. den po ozařování bylo ukončeno měření relaxačního procesu. Optický útlum vlákna o délce 10 m byl $22,97 \text{ dB}$

(16,36 dB před ozáření) na vlnové délce 535 nm a 9,72 dB (8,65 dB před ozáření) na vlnové délce 650 nm. U 20 m vlákna byl optický útlum 32,57 dB (23,86 dB před ozáření) na vlnové délce 535 nm a 13,88 dB (13,22 dB před ozáření) na vlnové délce 650 nm.

Z výsledků vyplývá, že vlákna PMMA GI-POF jsou vhodná pouze do prostředí, kde jsou vystavena jen nižším dávkám gama záření, případně lze optická vlákna použít pro dozimetrii. Přenos u těchto vláken je nutné realizovat na vlnové délce 650 nm, z výsledků měření se vlnová délka 535 nm jeví jako nevhodná z důvodu neměřitelně vysokého optického útlumu.

Dále proběhlo ozařování optických vláken FONTEX o délce 10 m (F4) a 20 m (F2) v ozařovně ROZA, kde byla vlákna vystavena dávce gama záření 19,2 kGy s dávkovým příkonem 0,83 kGy/h. Optický útlum byl po ozáření nejvyšší na vlnové délce 850 nm, kde jeho hodnoty byly neměřitelně vysoké a nejnižší na vlnové délce 1300 nm, kde byla hodnota optického útlumu 45,72 dB pro vlákno o délce 10 m (F4) a 56,38 dB pro vlákno o délce 20 m (F2). Vlivem relaxačního procesu se hodnota optického útlumu postupně snižovala, až došlo k ustálení hodnot a 99. den po ozáření bylo ukončeno měření. Pro vlákno o délce 10 m (F4) byla hodnota optického útlumu 29,74 dB (11,68 dB před ozáření) na vlnové délce 850 nm, 19,94 dB (11,25 dB před ozáření) na vlnové délce 980 nm a 19,51 dB (12,14 dB před ozáření) na vlnové délce 1300 nm.

Po ukončení ozařování optických vláken FONTEX o délce 5 m (F6), 10 m (F8) a 20 m (F10) v ozařovně PANOZA a celkové obdržené dávce gama záření 31,6 kGy s dávkovým příkonem 51 Gy/h proběhlo měření relaxačního procesu, kde došlo k ustálení hodnot optického útlumu a ukončení měření 108. den po ozáření. Nejnižší hodnota optického útlumu po ukončení relaxace byla na vlnové délce 980 nm, pro vlákno o délce 5 m (F6) 7,25 dB (3,08 dB před ozáření), pro vlákno o délce 10 m (F8) 7,66 dB (1,86 dB před ozáření) a pro vlákno o délce 20 m (F10) 20,60 dB (5,17 dB před ozáření).

Poslední experimenty, které jsem prováděl byly zaměřeny na studium vlivu gama záření u mnohavidových optických vláken se skokovou změnou indexu lomu. Měřená optická vlákna mají jádro z čistého křemenného skla a plášť dotovaný fluorem. Jednalo se o optická vlákna s průměrem jádra 50 μm (FG050LGA) a 105 μm (FG105LCA), která byla ozařována v ozařovně PRAZDROJ, kde byla optická vlákna vystavena celkové dávce gama záření 266 kGy s dávkovým příkonem 1,02 kGy/h. U měřených vláken došlo na začátku ozařování k rychlé změně optického útlumu, avšak během ozařování se tento nárůst postupně snižoval. Po ukončení ozařování došlo k rychlému poklesu optického útlumu.

Optické vlákno FG050LGA o délce 100 m mělo v okamžiku ukončení

ozařování optický útlum 23,68 dB na vlnové délce 850 nm, 11,62 dB na vlnové délce 980 nm a 5,02 dB na vlnové délce 1300 nm. Po ukončení ozařování a převozu do laboratoře PLANIO došlo k poklesu optického útlumu na 5,78 dB na vlnové délce 850 nm, 1,53 dB na vlnové délce 980 nm a 3,64 dB na vlnové délce 1300 nm. Po uplynutí 20 dní od ukončení ozařování klesl optický útlum na 3,68 dB na vlnové délce 850 nm, 0,77 dB na vlnové délce 980 nm a 2,14 dB na vlnové délce 1300 nm. Nejnižší hodnota optického útlumu během ozařování byla na vlnové délce 1300 nm (5,02 dB), po ukončení ozařování byla nejnižší hodnota optického útlumu na vlnové délce 980 nm (3,40 dB).

Optické vlákna FG105LCA o délce 20 m a 100 m měla během gama ozařování optický útlum 4,68 dB (20 m) a 17,44 dB (100 m) na vlnové délce 850 nm, 2,64 dB (20 m) a 9,24 dB (100 m) na vlnové délce 980 nm, 1,77 dB (20 m) a 4,22 dB (100 m) na vlnové délce 1300 nm. Po ukončení ozařování a převozu do laboratoře PLANIO došlo k poklesu optického útlumu na 1,46 dB (20 m) a 5,46 dB (100 m) na vlnové délce 850 nm, 0,74 dB (20 m) a 2,83 dB (100 m) na vlnové délce 980 nm, 1,32 dB (20 m) a 3,31 dB (100 m) na vlnové délce 1300 nm. Po uplynutí 20 dní od ukončení ozařování klesl optický útlum na 1,23 dB (20 m) a 4,22 dB (100 m) na vlnové délce 850 nm, 0,64 dB (20 m) a 2,09 dB (100 m) na vlnové délce 980 nm, 1,30 dB (20 m) a 2,57 dB (100 m) na vlnové délce 1300 nm. Nejnižší hodnota optického útlumu během ozařování byla na vlnové délce 1300 nm, po ukončení ozařování byla nejnižší hodnota optického útlumu na vlnové délce 980 nm. Měření relaxačního procesu nebylo ukončeno ani po 20 dnech po ukončení ozařování a měření tohoto procesu probíhá i po odevzdání písemné části bakalářské práce.

Optická vlákna s velkým průměrem jádra se používají mimo jiné pro aplikace PoF (Power over Fiber). Tyto systémy využívají zdroj optického záření s vysokým optickým výkonem. Optické záření je přeneseno optickým vláknem a na jeho konci je následně přeměněno z optického výkonu na výkon elektrický a slouží k napájení elektrických součástí. Systémy PoF v současnosti využívají vysoko výkonové zdroje pracující na vlnových délkách 808 nm, 980 nm nebo 1490 nm. Z naměřených výsledků prezentovaných v této bakalářské práci vyplývá, že v případě aplikace, kde by mohlo u optických vláken dojít k vystavení gama záření je vhodnější pracovní vlnová délka 980 nm než 808 nm z důvodu nižšího vlivu gama záření na optický útlum na vlnové délce 980 nm. V případě použití vlnové délky 1490 nm musí být ještě provedeny dodatečné experimenty. Měření prokázalo, že gama záření více ovlivňuje optický útlum na vlnové délce 980 nm než na vlnové délce 1300 nm a podle naměřených spektrálních charakteristik je po ozáření na vlnové délce 1490 nm vyšší hodnota optického útlumu než na vlnové délce 1300 nm.



Literatura

- [1] BOHÁČ, Leoš a Michal LUCKI. *Optické komunikační systémy*. Vyd. 1. V Praze: České vysoké učení technické, 2010. ISBN 978-80-01-04484-1.
- [2] SENIOR, John M. *Optical fiber communications: principles and practice*. 3rd ed. Harlow: Prentice Hall, 2009. ISBN 978-0-13-032681-2.
- [3] AGC. *FONTEx fiber*. AGC Inc. ©2010.
- [4] FIBERFIN. *OM-Giga® 1000 μm x 2.2mm Simplex Cable Graded Index*. FiberFin Inc. [online]. [cit. 8.1.2024]. Dostupné z: <https://fiberfin.com/product/gi-pof-1000-micron-pmma-pof-cable-2-2mmpe-jacket/>
- [5] PASCHOTTA, R. *Power Over Fiber*. In: RP Photonics Encyclopedia [online]. RP Photonics, 2008 [cit. 19.5.2024]. Dostupné z: <https://doi.org/10.61835/ibt>
- [6] NOVOTNÝ, Karel. *Optická komunikační technika*. Vyd. 3. Praha: ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03920-5.
- [7] KOIKE, Yasuhiro a Kotaro KOIKE. *Progress in low-loss and high-bandwidth plastic optical fibers*. Wiley Online Library [online]. 2010 [cit. 21.4.2024]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1002/polb.22170](https://doi.org/10.1002/polb.22170)
- [8] RADIOBIOLOGIE. *Základní fyzikální poznatky o ionizujícím a neionizujícím záření, jeho detekce a dozimetrie* [online]. [cit. 8.1.2024]. Dostupné z: <https://fbmi.sirdik.org/>
- [9] MASOPUSTOVÁ, Kateřina. *Měření vlastností optických vláken a kabelů pro případné použití v extrémních podmínkách*. Praha, 2022. Diplomová práce. Fakulta elektrotechnická ČVUT. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/99077>
- [10] WANG, Ke, Yamin WANG, Mengmeng TAO, Huilin CAO, Hongwei CHEN, Jingfeng YE, Yanlong SHEN a Dahui WANG. *Measurement*

of radiation induced attenuation in irradiated active fibers using optical frequency domain reflectometry. Optics Communications [online]. 2024, 560 [cit. 7.5.2024]. ISSN 00304018. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2024.130472>

- [11] OPTOKON. *OFT-4212 Fiber optic 4-channels optical testing system.* OPTOKON, a.s. [online]. 2020 [cit. 18.11.2023]. Dostupné z: <https://www.optokon.com/product/220-oft-4212-fiber-optic-4-channels-optical-testing-system>
- [12] OPTOKON. *OFT-820 POF Loss Test Set.* OPTOKON, a.s. [online]. 2009 [cit. 18.11.2023]. Dostupné z: <https://www.optokon.com/product/45-oft-820-pof-series-plastic-optical-fiber-loss-test-set>
- [13] YOKOGAWA. *AQ6373B Visible Wavelength Optical Spectrum Analyzer.* Yokogawa Electric Corporation [online]. [cit. 28.12.2023]. Dostupné z: <https://tmi.yokogawa.com/eu/solutions/discontinued/aq6373b-optical-spectrum-analyzer/>
- [14] YOKOGAWA. *AQ6370C Optical Spectrum Analyzer.* Yokogawa Electric Corporation [online]. [cit. 22.4.2024]. Dostupné z: <https://tmi.yokogawa.com/solutions/discontinued/aq6370c-optical-spectrum-analyzer/>
- [15] THORLABS. *SLS201L/M - Stabilized Fiber-Coupled Light Source.* THORLABS, Inc. [online]. 2021 [cit. 20.11.2023]. Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=SLS201L/M>
- [16] OCEAN INSIGHT. *HL-2000-HP-FHSA Light Source.* Ocean Insight, Inc. [online]. [cit. 20.11.2023]. Dostupné z: <https://www.oceaninsight.com/products/light-sources/vis-and-nir-light-sources/hl-2000-hp-fhsa>
- [17] OCEAN INSIGHT. *USB2000 Fiber Optic Spectrometer.* Ocean Insight, Inc. [online]. ©2001-2005 [cit. 20.11.2023]. Dostupné z: <https://photos.labwrench.com/equipmentManuals/9443-3596.pdf>
- [18] RESEARCHGATE. *Standardization proposal for spectral grid for VIS WDM applications over SI-POF.* ResearchGate GmbH [online]. 2012 [cit. 23.4.2024]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Spectral-attenuation-curve-of-SI-POF-with-the-attenuation-minima_fig1_249998961

- [19] THORLABS. *FG050LGA-SpecSheet*. THORLABS, Inc. [online]. 2023 [cit. 24.4.2024]. Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/drawings/eb3c87ea19a641bc-9E6B91D9-05FC-1734-7770544F117D39DE/FG050LGA-SpecSheet.pdf>
- [20] THORLABS. *FG105LCA-SpecSheet*. THORLABS, Inc. [online]. 2023 [cit. 24.4.2024]. Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/drawings/eb3c87ea19a641bc-9E6B91D9-05FC-1734-7770544F117D39DE/FG105LCA-SpecSheet.pdf>
- [21] ZIKMUND, Marek. *Měření vlastností optických vláken a kabelů vystavených účinkům gama záření*. Praha, 2023. Diplomová práce. Fakulta elektrotechnická ČVUT. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/110008>
- [22] STAJANCA, Pavol, Laura MIHAI, Dan SPOREA, Daniel NEGUȚ, Heinz STURM, Marcus SCHUKAR a Katerina KREBBER. *Effects of gamma radiation on perfluorinated polymer optical fibers*. *Optical Materials* [online]. 2016, 58, 226-233 [cit. 15.5.2024]. ISSN 09253467. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2016.05.027>