

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektromagnetického pole



Vypracoval: Bc. Pavel Šedivý

Vedoucí práce: Ing. Matěj Komanec Ph.D.

Praha, 2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Šedivý** Jméno: **Pavel** Osobní číslo: **434778**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra elektromagnetického pole**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Studijní obor: **Rádiová a optická technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Zesilování optického signálu v oblasti 2000 nm

Název diplomové práce anglicky:

Optical Signal Amplification in the Vicinity of 2000 nm

Pokyny pro vypracování:

Proveďte teoretickou rešerši a rozbor možností zesilování optického signálu v oblasti 2000 nm. Zaměřte se na thuliem dopovaná optická vlákna. Diskutujte rovněž možnosti využití těchto dopovaných vláken v rámci vláknových laserů – kontinuálních a pulzních. Proveďte simulace základních konfigurací zesilovače na bázi thuliem dopovaného optického vlákna (dopředné, protisměrné a obousměrné zesilování). V simulacích zohledněte výkonovou úroveň vstupního signálu, jeho vlnovou délku a šum zesilovače. Optimalizujte v simulačním prostředí zesilovač pro příkladné provedení, které následně experimentálně ověřte. V závěru porovnejte naměřené charakteristiky se simulačními výstupy a korigujte simulační model.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Michel J. F. Digonnet, Rare-Earth-Doped Fiber Lasers and Amplifiers, 2nd edition (2001), Marcel Dekker, Inc.
- [2] A. M. Heidt, Z. Li and D. J. Richardson, 'High Power Diode-Seeded Fiber Amplifiers at 2 μm —From Architectures to Applications,' in IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 20, no. 5, pp. 525-536, Sept.-Oct. 2014, Art no. 3100612.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Matěj Komanec, Ph.D., katedra elektromagnetického pole FEL

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

Datum zadání diplomové práce: **18.02.2019** Termín odevzdání diplomové práce: **24.05.2019**

Platnost zadání diplomové práce: **19.02.2021**

Ing. Matěj Komanec, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Řípka, CSc.
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

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 23.5.2019

Pavel Šedivý

Poděkování

Děkuji panu Ing. Matějovi Komancovi Ph.D., vedoucímu mé diplomové práce, za hodnotné rady, důležité připomínky, vstřícný přístup a pomoc při řešení problémů, konzultacích a měření. Dále bych rád poděkoval všem, kteří mě podporovali při celém průběhu mého studiu.

ABSTRACT

Tato práce se zabývá optickými vláknovými zesilovači a vláknovými lasery pracujícími v oblasti 2000 nm. Úkolem této práce je provést rešerši jednotlivých typů optických zesilovačů a zaměřit se především na thulium dopované vláknové zesilovače. Následná simulace je provedena pro základní konfigurace thulium dopovaného vláknového zesilovače. Praktická část se zabývá měřením thuliového vláknového zesilovače. Cílem práce je vyhodnocení výsledků simulace a měření a jejich vzájemné porovnání.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vláknový zesilovač, vláknový laser, thulium, optický signál

ABSTRACT

This thesis discusses optical fiber amplifiers and fiber lasers working in the area of 2000 nm. The aim of this thesis is to carry out an investigation of the different types of optical amplifiers, focused mainly on thulium doped fiber amplifier. Subsequent simulation is performed for basic configurations of thulium-doped fiber amplifier. The practical part focuses on the measurement of thulium fiber amplifier. This thesis offers a comparison between the simulation and experimental results.

KEY WORDS

Optical fiber amplifier, fiber laser, thulium, optical signal

OBSAH

ÚVOD	1
TEORETICKÁ ČÁST	2
1. Optické zesilovače	2
1.1. Regenerace optického signálu	2
1.2 Základní parametry optického zesilovače	4
1.3 Umístění optického zesilovače na trase	5
2. Rozdělení optických zesilovačů	6
3. Vláknové lasery	9
4. Thuliem dopovaný vláknový zesilovač	11
5. Využití TDFA a thuliových vláknových laserů	13
5.1 LIDAR	13
5.2 Laserová litotrypse	14
5.3 Laserové svařování polymerů	15
5.4 Optické komunikace	16
PRAKTICKÁ ČÁST	18
6. Praktická realizace	18
7. Výsledky simulace	20
8. Praktické měření	24
8.1 Měření TDFA bez vstupního signálu	24
8.2 Měření TDFA se vstupním signálem 2000 nm	31
ZÁVĚR	38
SEZNAM LITERATURY	39

ÚVOD

Vynález laseru v roce 1960 podnítl velké úsilí ohledně dalšího studia optického přenosu. Tento rok byl navržen i první vláknový laser, kde bylo použito skleněné vlákno s jádrem dopovaným neodymem. První optické zesilovače dopované erbiem byly vynalezeny až během 80. let a od té doby se vývoj optických vláknových zesilovačů neustále zdokonaluje. Aby mohl být optický signál přenášen na vzdálenosti řádově stovek kilometrů, musí být zesilován. Stejně tak i u vláknových laserů dochází k zesilování vstupního výkonu.

Optická přenosová technika je neustále se rozvíjejícím oborem, který pokrývá široké spektrum využití. Následkem rozvoje optické techniky došlo k rozšíření možností pro využití optických vláken a optických komponent. S optickými vlákny a vláknovými zesilovači se často setkáváme v telekomunikacích, medicíně, průmyslu nebo v armádním využití.

Thuliem dopované optické zesilovače a vláknové lasery jsou vhodné pro práci na vlnových délkách v okolí 2000 nm. Tyto vlnové délky jsou již nad klasickými přenosovými okny optických vláken a uvažuje se tedy o nich jako o potenciální možnosti pro využití v optických komunikacích. Lasery pracující v okolí vlnové délky 2000 nm našly uplatnění jako laserové radary, v průmyslu se využívají ke svařování polymerů a v medicíně slouží například k laserové litotrypsi.

V této práci se budeme zabývat principy a využitím dopovaných vláknově-optických zesilovačů, především thuliem dopovaného optického vláknového zesilovače a thuliového vláknového laseru. Kapitola 1 je věnována základním parametrům optických zesilovačů a regeneraci optického signálu. Další kapitola se zabývá druhy optických zesilovačů a principy jejich funkce. Kapitola 3 popisuje princip kontinuálních a pulzních vláknových laserů. Následující kapitola popisuje thuliem dopované vláknové zesilovače. Kapitola 5 je věnována využití thuliového dopovaného vláknového zesilovače a thuliových laserů. V kapitole 6 je popsána praktická realizace, zahrnující schéma zapojení a parametry měřeného vlákna. Kapitola 7 shrnuje výsledky provedených simulací. Kapitola 8 obsahuje výsledky měření thuliového vlákna jako vláknového zesilovače.

TEORETICKÁ ČÁST

1. Optické zesilovače

Optický zesilovač je zařízení, které dokáže zesilovat optický signál v optické doméně, na rozdíl od OEO zesilovačů (Opticko-elektro-optický), kde se optický signál převádí na elektrický a následně se zesílený elektrický signál převádí zpět na optický. Takovýto způsob přeměny vyžaduje složitou elektroniku a není efektivní především z důvodu pomalé odezvy [1].

Princip optických zesilovačů je založen na existenci stimulované emise záření v materiálu, tedy stejný mechanismus, který využívají lasery, a vyžaduje optické čerpání energie. Optický zesilovač si můžeme představit jako laser bez zpětné vazby. [1, 2].

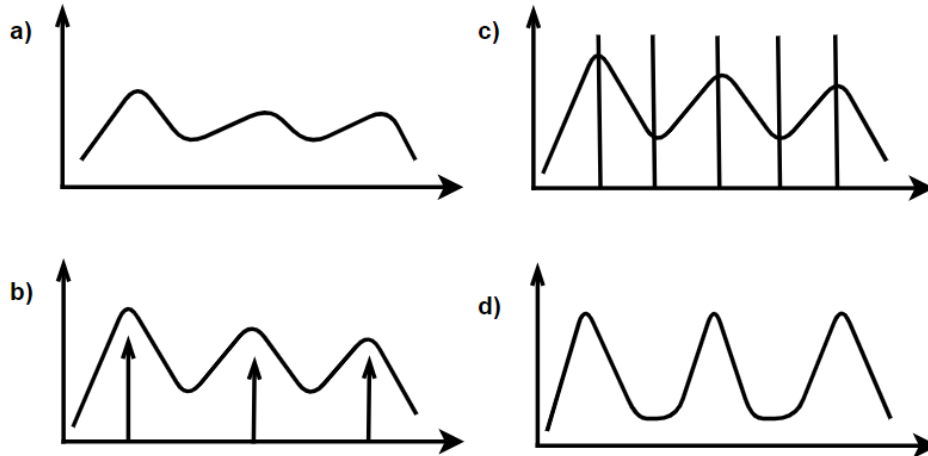
1.1. Regenerace optického signálu

Při přenosu optického signálu ve vysokorychlostních optických sítích je přijímaný signál často zkreslen z důvodu disperzí, nelinearit nebo šumu. Všechny tyto jevy mají negativní vliv na přenosovou vzdálenost [3].

Regeneraci optického signálu rozdělujeme do tří kategorií. Při regeneraci typu 1R dochází k zesílení signálu a tím obnově amplitudy, u regenerace typu 2R je společně se zesílením zajištěna obnova tvaru pulzů, posledním typem je regenerace 3R, při které dochází k zesílení signálu, obnovení tvaru a umístění náběžných hran pulzů.

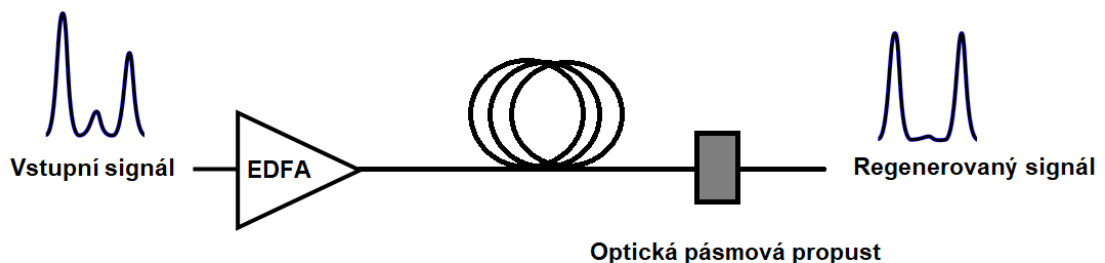
Při použití regenerace typu 3R (retiming, reshaping a reamplification) dosáhneme dálkového přenosu vysokorychlostního signálu až 1000 km [4].

Jednotlivé kroky při obnově signálu pomocí regenerace typu 3R popisuje obrázek 1. Nejprve přijmeme degenerovaný optický signál (a), následně dochází k obnovení amplitudy signálu (b), dalším krokem je zajištění umístění náběžné hrany signálu (c) a v posledním kroku nastává obnovení tvaru pulzů (d).



Obrázek 1: Regenerace 3R

Typické optické 2R regenerátory jsou realizovány prostřednictvím nelineárních jevů, jako je automodulace fáze (SPM- Self-phase modulation), nebo čtyřvlnné směšování (FWM- Four-wave mixing). Automodulaci fáze využívá Mamyshev 2R regenerátor. Tento regenerátor potlačuje šum v binárních nulách a kolísání amplitudy v binárních jedničkách. Schéma zapojení je zobrazeno na obrázku 2. Výkonný vláknový zesilovač dopovaný erbiem zesiluje vstupní signál na požadovanou úroveň. Automodulace fáze rozšiřuje spektrum v poměru k intenzitě počátečního optického impulsu, tento proces nastává v nelineárním optickém vlákně. Šum, nebo impulzy s nízkou úrovní výkonu se výrazně nerozšíří a jsou redukovány na nulovou hodnotu. Datové impulzy s hodnotou "jedna" mají vyšší úroveň výkonu. Při rozšíření spektra vlivem SPM se jeho značná část nachází v propustném pásmu optické pásmové propusti, což vede ke generování výstupního impulsu s hodnotou binární jedničky [5].



Obrázek 2: Mamyshev 2R regenerátor

1.2 Základní parametry optického zesilovače

- **Zisk (G)** je jedním z hlavních parametrů optických zesilovačů. Definujeme ho jako poměr výstupního a vstupního výkonu. Zisku ve vláknových zesilovačích docílíme pomocí optického zdroje čerpáním pro zvýšení inverze populace.
- **Vložný útlum (IL)** definujeme jako množství ztrát optického výkonu zapříčiněné vložením prvku do optické trasy.
- **Útlum zesilovače odpojeného od zdroje energie.** V ideálním případě by měl být zesilovač transparentní pro procházející signál po odpojení zdroje čerpání.
- **Vstupní saturační výkon** je schopnost zesilovače přijmout velký vstupní výkon.
- **Saturace zisku** může být rozdělena na saturaci zesílení čerpacím výkonem a saturaci zesílení vstupním signálem. Při saturaci zesílení čerpacím výkonem dochází k tomu, že s rostoucím výkonem čerpání je stále více dopantových iontů excitováno na vyšší energetickou hladinu. Pokud se dostaneme do stavu, kdy nemůže inverzní populace více růst, tak déle neroste ani zisk a dochází k saturaci. Saturace zesílení vstupním signálem je dána jeho vysokou úrovní, což vede ke snížení inverzní populace a k následné saturaci zesílení.
- **Šumové číslo (NF)** udává kolikrát je poměr výkonu signálu k výkonu šumu na vstupu přijímače větší než na jeho výstupu. Ve vláknovém optickém zesilovači je část spontánní emise navázána do základního vidu vlákna LP_{01} , šíří se spolu se signálem, je s ním zesilována a zhoršuje tak šumové vlastnosti.
- **Teplotní stabilita centrální vlnové délky.**
- **Křivka zisku zesilovače** by měla mít v ideálním případě plochou charakteristiku zesílení.
- **Šířka pásma zesilovače (BW)** udává rozsah vlnových délek, pro které je možné vstupní signál zesílit.

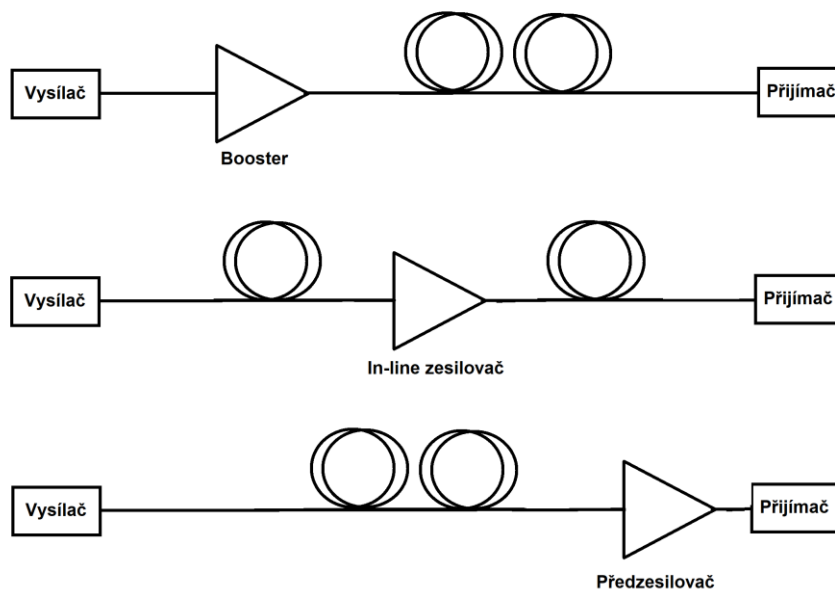
1.3 Umístění optického zesilovače na trase

Při návrhu optické trasy musí být uvažováno správné rozmístění zesilovačů. Zesilovače umístíme na trasu podle požadovaných kritérií.

Zesilovač, který je připojen za vysílačem signálu na počátku optické trasy nazýváme Booster. Jedná se o výkonový zesilovač, který slouží k zesílení signálu na požadovanou úroveň, která může být do vlákna navázána. Ten typ zesilovače, musí být schopen, přijmout velký vstupní výkon. Typickými parametry boostru je zisk v rozmezí 5-15 dB a vysoký výstupní výkon okolo 20 dBm.

Pokud je uvažována trasa delší než 100 km, musí být počítáno s použitím linkového zesilovače (In-line zesilovač). Typicky se zesilovač vkládá každých 100 km, aby bylo dosaženo dostatečné kvality přenášeného signálu. Takovýto typ zesilovače zesiluje signál o nízké úrovni výkonu, na signál s co nejvyšší úrovní výkonu s co nejmenším množstvím šumu, pro dosažení delší přenosové vzdálenosti. In-line zesilovače mají obvykle zisk v rozsahu 15-25 dB a šumové číslo v rozmezí 5-7 dB.

Zesilovač, umístěný na konci optické trasy, nazýváme předzesilovač (Preamplifier). Předzesilovač slouží k zesílení velice nízkých úrovní signálu na úroveň dostatečnou pro správné vyhodnocení přijímaných optických signálů. Předzesilovač by měl poskytovat vysoký zisk až 30 dB, a měl by mít nízkou hodnotu šumového čísla v rozmezí 4-5 dB.

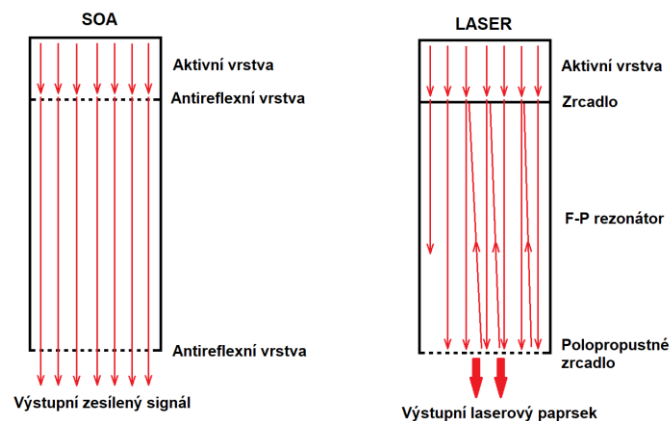


Obrázek 3: Zapojení zesilovačů na optické trase

2. Rozdělení optických zesilovačů

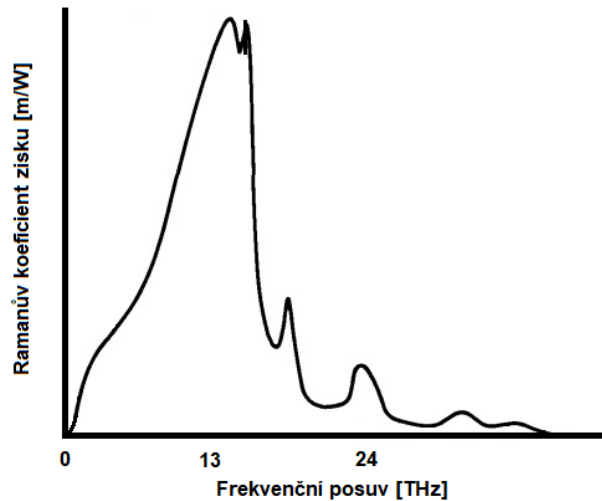
Aby zesilovač fungoval jako zesilující prvek, musí mu být dodána energii. Podle způsobu dodání energie dělíme optické zesilovače do tří skupin.

První skupinou jsou polovodičové optické zesilovače SOA (Semiconductor Optical Amplifier). V tomto typu zesilovače je energie dodána pomocí elektrického pole. SOA pracuje na podobném principu jako polovodičový laser (Obr. 4) a využívá se zde stimulované emise fotonů. Proces stimulované emise zahrnuje několik kroků: stimulovaná absorpce, excitace media, dosažení inverze populace, stimulace dalších fotonů, vznik zisku v mediu polovodiče a opuštění hrany čipu. Rozsah pracovních vlnových délek je dán materiálem, z kterého je SOA zesilovač vyroben. Vhodné materiály pro výrobu jsou GaAs, AlGaAs, InGaAs, InGaAsP, InAlGaAs, InP. Polovodičové zesilovače pokrývají všechny pracovní rozsahy vlnových délek využívané pro optické komunikace (0,8-1,7 μm) a generují maximální zisk až 30 dB [1,6].



Obrázek 4: Rozdíl mezi laserem a SOA

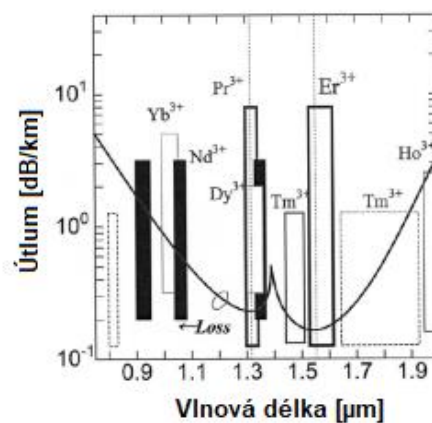
Ve druhé skupině jsou vláknové zesilovače založené na Ramanově rozptylu. Tyto zesilovače označujeme jako RA (Raman Amplifier). K zesílení signálu využívá zesilovač stimulovaný Ramanův rozptyl SRS (Stimulated Raman Scattering) na částicích materiálu optického vlákna. Interakcí mezi fotony a fonony materiálu, dochází k přičtení energie molekul látky k energii fotonů. Následně dochází ke vzniku vidu, který je u SiO_2 vláken posunut o 100 nm pro pásmo 1550 nm (Obr. 5) směrem k delším vlnovým délkám (nižším frekvencím). Výhodou Ramanova zesilovače je jeho rozsah pracovních vlnových délek. Tento zesilovač může pracovat ve všech telekomunikačních pásmech, pro které je daný materiál transparentní. Zisk zesilovače závisí na vlnové délce optického čerpání [1,6].



Obrázek 5: Křivka Ramanova zisku

Třetí skupinou jsou vláknové zesilovače s dopací (DFA- Doped Fiber Amplifiers) Energie je dodávána ve formě signálu z čerpání (pumpy) o konkrétní vlnové délce. Vláknové zesilovače s dopací rozdělujeme podle druhu vzácných zemin, kterými jsou vlákna dopována. Jako vzácné zeminy se používají: erbium (Er), praseodymium (Pr), ytterbium (Yt), neodymium (Nd) a thulium (Tm). Dopované vlákno bývá obvykle dlouhé několik metrů a množství koncentrace příměsí se pohybuje v rozmezí od jednotek do stovek atomů dopantu na 1 milion molekul základního materiálu. U vláknových zesilovačů se společně do dopovaného vlákna přivádí vstupní signál a signál z čerpání [1,6].

Výhodou těchto zesilovačů je jejich jednoduché zapojení a zisk kolem 30 dB. Nevýhodou těchto zesilovačů je chybějící selektivita, toho co chceme zesilovat, protože je zesilován jak užitečný signál, tak i vstupující šum. Jednotlivé typy zesilovačů jsou porovnány v tabulce 1.

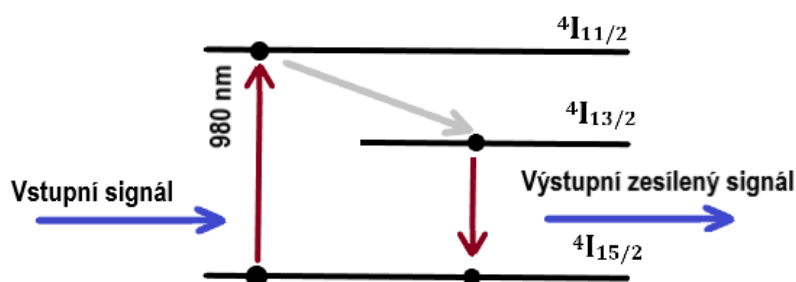


Obrázek 6: Emisní pásma pro ionty vzácných zemin [18].

Tabulka 1: Porovnání jednotlivých typů zesilovačů

	DFA	SOA	Raman
Maximální zisk [dB]	30-50	30	36
Vložné ztráty [dB]	2	5-7	0,2-0,8
Druh čerpání	Optické	Elektrické	Optické
Šumové číslo [dB]	3-5	7-12	3-5

Princip vláknového zesilovače EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifiers) je popsán na obrázku 7. K excitaci atomů dopovaného prvku dochází po přivedení signálu z laserového čerpání do erbiem dopovaného vlákna. Přechod na vyšší energetickou hladinu ${}^4I_{11/2}$ je dán pohlcením energie čerpání. V tomto stavu vydrží ionty pouze velmi krátkou dobu a následně se nezářivým přechodem dostávají na hladinu ${}^4I_{13/2}$ ve vodivostním pásu. Situaci, kdy se většina iontů nachází v excitovaném stavu, nazýváme inverzní populace. Po dosažení tohoto stavu dochází k uvolnění energie z důvodu výskytu přenášeného vstupního signálu. V dalším kroku se vracejí excitované ionty zpět na základní hladinu ${}^4I_{15/2}$. Jedná se o zářivý přechod doprovázený stimulovanou emisí záření o shodné vlnové délce a ve fázi s přenášeným signálem.



Obrázek 7: Princip EDFA

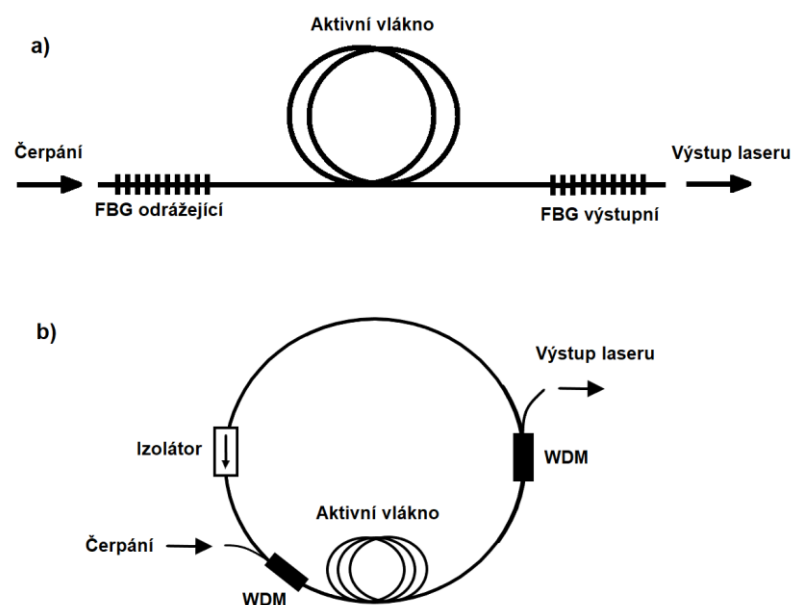
3. Vlákňové lasery

Vlákňové lasery můžeme rozdělit do dvou základních skupin na kontinuální lasery a lasery pulzní. Lasery bereme obecně jako optické oscilátory, tedy zesilovače se zpětnou vazbou, díky které se dostává sfázovaný výstupní signál znovu na vstup. Laser je zařízení, které se skládá ze tří hlavních částí: aktivního prostředí, zdroje energie a rezonátoru.

Princip kontinuálního vlákňového laseru je dán generováním signálu vlivem stimulované emise. Tento signál je následně zesílen a z výstupu přiveden zpět na vstup a poté znovu zesílen. Tento proces se opakuje a je omezen až saturací zisku zesilovače.

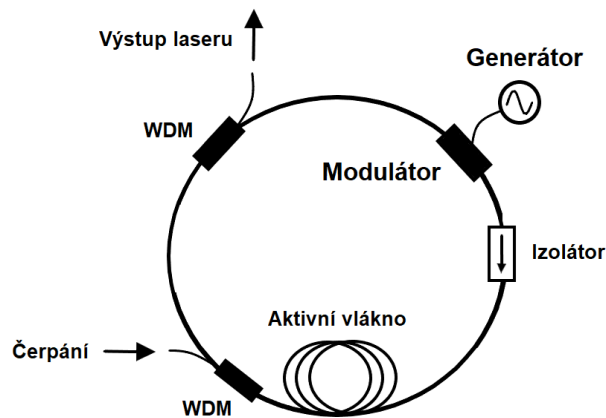
Jedno z možných zapojení kontinuálního vlákňového laseru je zapojení se zrcadly tvořící Fabry–Perotův rezonátor (Obr. 8 (a)). Rezonátor se skládá ze dvou zrcadel, první je odrážející a druhé je polopropustné pro určitou vlnovou délku. Jako zrcadla se často využívá vlákňových braggovských mřížek (FBG – Fibre Bragg Grating). Princip FBG spočívá v tom, že světlo o dané vlnové délce, která je v rezonanci s mřížkovou periodou, bude odraženo a ostatní vlnové délky budou propouštěny.

Druhou možností pro vytvoření vlákňového zesilovače je zapojení, kdy vznikne kruhový rezonátor ((Obr. 8 (b)). K tomu, aby došlo ke sdružení vstupního signálu, se signálem z čerpání, musí být použito vlnově selektivního vazebního členu (WDM – Wavelength Division Multiplexer). Aby bylo dosaženo dobré stability výstupního signálu, je do rezonátoru vložen optický izolátor z důvodu, aby se generovaný signál šířil pouze v jednom směru. Laserový signál je vyvážen pomocí výstupního vazebního členu [19].



Obrázek 8: Kontinuální vlákňový laser a) Fabry-Perotův rezonátor, b) kruhový rezonátor

Pulzní vláknové lasery pracují na principu synchronizace módů. Ve spektrálním pásmu zesílení je určitý počet podélných módů, které nezávisle na sobě oscilují. Pokud dosáhneme vzájemného svázání a sfázování módů, tak bereme jednotlivé módy, jako složky Fourierova rozvoje periodické funkce. Tato funkce představuje sled optických pulzů. Použitím optické uzávěrky docílíme režimu synchronizace módů. Pulzní lasery se rozdělují podle způsobu synchronizace na aktivní a pasivní. Pokud je optická uzávěrka řízena externím frekvenčním generátorem, mluvíme potom o aktivní módové synchronizaci (Obr. 9). Jako optická závěrka může být použit Machův-Zehnderův modulátor. U pasivní módové synchronizace je uzávěrka tvořena saturovaným absorbujícím prostředím [19].



Obrázek 9: Pulzní vláknový laser s aktivní synchronizací

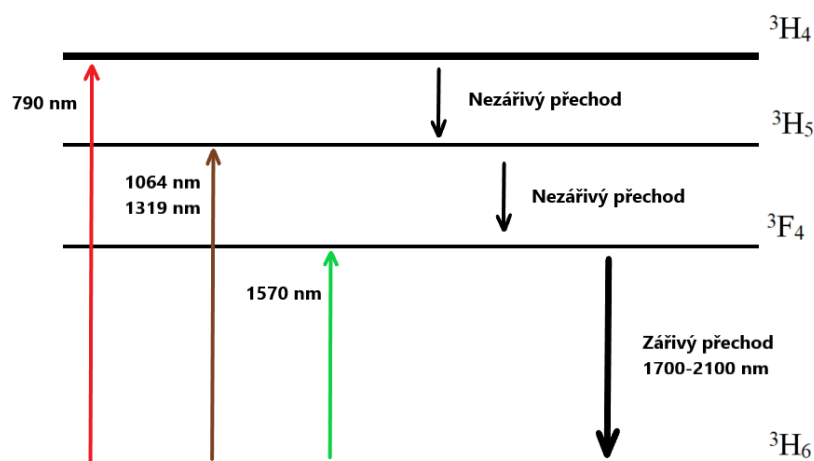
4. Thuliem dopovaný vláknový zesilovač

Zvoleným dopantem pro TDFA (Thulium Doped Fiber Amplifiers) zesilovače je thulium (Tm). Thulium je měkký stříbrně bílý, přechodný kovový prvek, 13. člen skupiny lanthanoidů. Tento prvek byl objeven Perem Theodorem Clevem v roce 1879 jako nečistota ve vzorku erbia. V dnešní době se thulium získává pomocí redukce fluoridu thulitého kovovým vápníkem. Thulium našlo využití v laserové technice, využívá se jako ochranný prvek na bankovkách a thulium ^{170}Tm slouží jako zdroj rentgenového záření pro léčbu rakoviny [7].

V posledních letech bylo často zkoumáno využití vláknových laserových zdrojů v okolí vlnových délek 2000 nm z důvodu jejich potenciálu pro detekci plynů, u laserových operací, pro měření atmosféry, řezání nebo využití jako laserového radaru.

V porovnání s ostatními optickými zesilovači mají TDFA vysoký zisk až 35 dB a nízké šumové číslo (5 dB) na 2000 nm a jsou tedy vhodné pro optickou komunikaci v této oblasti. Šířka pásma TDFA je přibližně 30 THz (~ 1700 až 2100 nm), což je v porovnání s EDFA, které má přibližně 15 THz (~ 1480 až ~ 1610 nm) dvakrát více [8].

Čerpání pro TDFA a lasery na 2000 nm můžeme rozdělit do dvou skupin. První skupinou je čerpání v pásmu, kde se využívá čerpání na vlnové délce v oblasti 1560 nm. Diferenciální účinnost pro fluoridový laser 1900 nm, byla změřena na 70% při čerpání 1580 nm. Tento typ čerpání, excituje Tm ionty na úroveň $^3\text{F}_4$, která je přímo na přechodu 1900 nm [9].

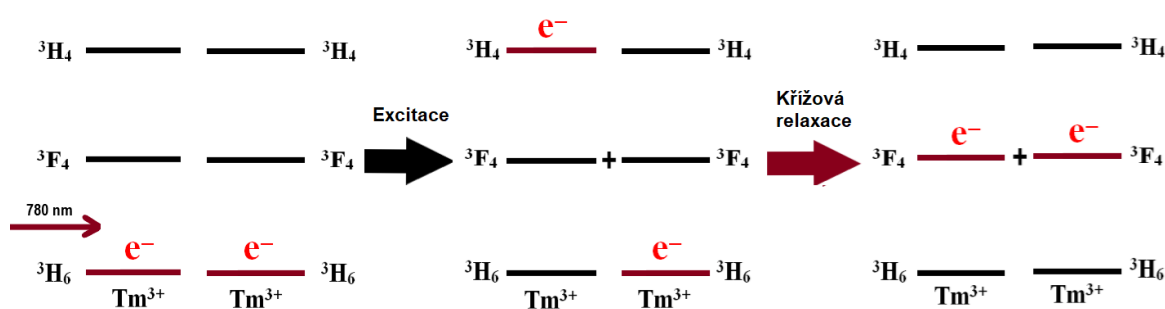


Obrázek 10: Čerpání pro TDFA

Obrázek 10 zobrazuje schéma energetické úrovně Tm iontů. Pokud budeme čerpat pumpou o vlnové délce 800 nm nebo 1060 nm, tedy na hladinu 3H_4 , nebo 3H_5 , bude docházet k následnému rychlému klesnutí na hladinu 3F_4 , která je horní úrovní pro přechod 1900 nm [9].

Druhou možností je nepřímé čerpání na 795 nm, kde se jako zdroj čerpání využívají diody a to především z důvodu jejich snadné dostupnosti a ceny. Zvýšení účinnosti můžeme dosáhnout pomocí tzv. křížového relaxačního procesu [9].

Křížový relaxační proces (Cross-relaxation) je znázorněn na obrázku 11. Jedná se o proces, kde se získávají dva excitované ionty Tm^{3+} pro jeden foton přicházející z čerpání. Tento jev nastává mezi dvěma identickými molekulami, kdy první molekula je vybudena do vyššího stavu a druhá molekula je ve stavu nižším. Následně dochází k výměně energie mezi molekulami, tedy že pokles energie první molekuly se rovná nárůstu energie druhé molekuly. Křížová relaxace tedy zvyšuje účinnost teoreticky o dvojnásobek [10].



Obrázek 11: Proces křížové relaxace

5. Využití TDFFA a thuliových vláknových laserů

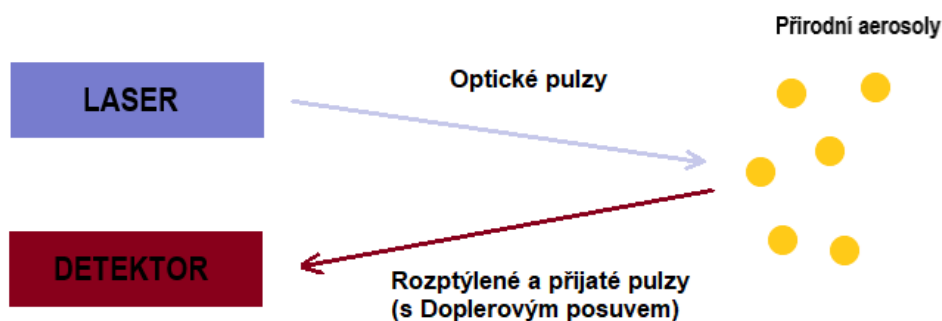
V uplynulých letech se thuliem dopované vláknové zesilovače a lasery pracující v okolí vlnové délky 2000 nm začaly využívat pro velké množství aplikací. Mezi tyto aplikace můžeme zařadit detekci plynů, atmosférická měření, laserový LIDAR, nebo v průmyslu pro svařování plastů. Díky silné absorpci záření našly thuliové vláknové lasery uplatnění v lékařských aplikacích, využívají se pro laserové operace, laserovou litotrypsi, nebo například pro laserovou angioplastiku. S dalším využitím thuliových vláknových zesilovačů se uvažuje i pro optickou komunikaci.

5.1 LIDAR

LIDAR (Light Detection And Ranging) je metoda dálkového měření vzdálenosti na základě výpočtu doby šíření optického pulsu odraženého od snímaného objektu. Pevnolátkový laser, nebo vláknový laser pracující na vlnové délce 2000 nm je klíčovým subsystémem pro koherentní Dopplerův LIDAR, který dokáže s vysokou přesností a rozlišením měřit horizontální i vertikální rychlost větru. Pro koherentní Dopplerův LIDAR je výhodná vlnová délka 2000 nm z několika důvodů. Za prvé, pracuje na vlnové délce, která je bezpečnější pro lidské oko, na rozdíl od LIDARu pracujícímu na vlnové délce 1000 nm. Za druhé, vlnová délka 2000 nm je silně zpětně rozptylována aerosoly v atmosféře, ze kterých pomocí Dopplerova posunu indikujeme rychlost větru.

Mírně upravený systém se dá využít jako DIAL (Differential Absorption Lidar), který slouží pro měření profilů koncentrace CO_2 v atmosféře [11].

Princip Dopplerova LIDARu spočívá ve vysílání laserových paprsků směrem k atmosféře, následnou detekcí, vzorkováním a načítáním frekvencí zpětně rozptýleného signálu.

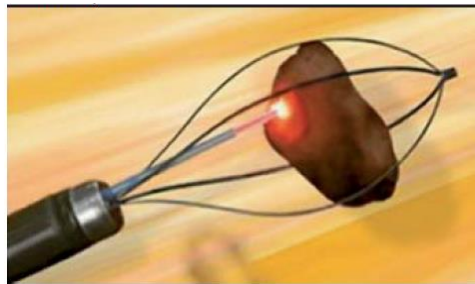


Obrázek 12: Princip Dopplerova LIDARu

5.2 Laserová litotrypse

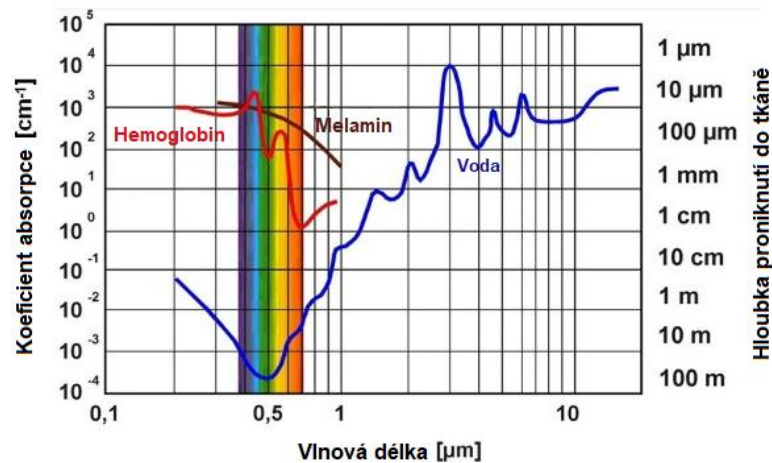
Litotrypse je metoda, při které dochází k drcení žlučnickových nebo močových kamenů. Klasické způsoby litotrypse, jako je balistická, ultrazvuková a elektrohydraulická, stále častěji nahrazují metody laserové. Výhodou flexibilních optických vlnovodů je možnost zavedení endoskopicky antegrádním (přístupem přes kůži na boku) i retrográdním (zavedení skrze močovou trubici a močový měchýř přímo do horních cest močových) přístupem do močových cest [12].

Pevnolátkový laser Tm: YAG generuje záření o vlnové délce 2020 nm. Pro vedení paprsku slouží křemenné chirurgické vlákno s nízkým obsahem OH iontů o průměru 200 μm . Jednou z nejnovějších technologií je využití thuliového vláknového laseru, který generuje záření na vlnové délce 1940 nm. Výhodou tohoto typu laseru je dodání vysokého výkonu vystupujícího přímo z jádra vlákna. Ve srovnání s konvenční balistickou nebo ultrasonografickou litotrypsí prakticky nehrozí poškození nebo protržení okolních struktur s ohledem na vysokou anihilaci laserového paprsku v okolní irigační tekutině. Irigační tekutina je směs k naplnění dutého orgánu, např. močového měchýře, díky které se můžeme na orgán lépe podívat. K porušení orgánů může dojít jen v případě, pokud by došlo k přímému kontaktu s optickým vláknem. Laser je pokládán za nejbezpečnější způsob intrakorporální litotrypse [12,13].



Obrázek 13: Laserová litotrypse, fixace konkrementu Dormiovým košíčkem [12]

Nejdůležitějším faktorem určujícím interakci s tkání je tzv. absorpční koeficient (μ_a). Absorpční koeficient vody je 120 cm^{-1} pro thuliový vláknový laser, 62 cm^{-1} pro Tm: YAG laser a 24 cm^{-1} pro Holmium:YAG laser. Jak je vidět na obrázku 14, voda má silnou absorpci okolo 2 a 3 μm . Díky silné absorpci ve vodě, hlavní složce biologické tkáně, je dosaženo výrazného zahřívání pouze malých ploch. To umožňuje velmi přesné řezání tkáně. Kromě toho je krvácení při řezání laserem potlačeno koagulací, což činí 2 μm lasery ideální pro mnoho chirurgických zákroků [12,13].

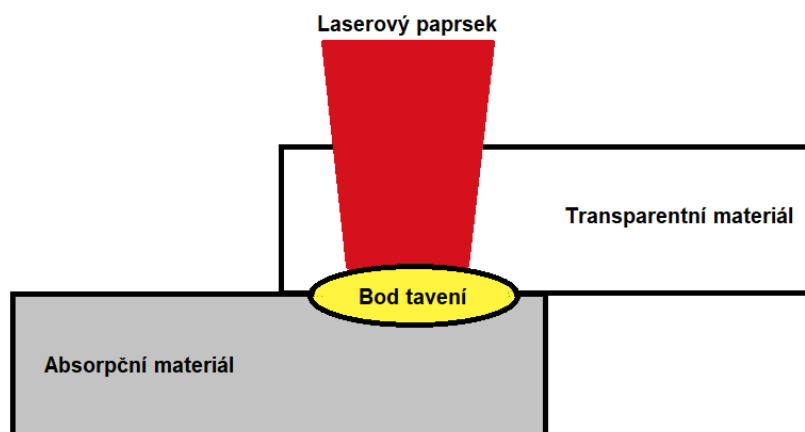


Obrázek 14: Křivka absorpce pro různé vlnové délky [14].

5.3 Laserové svařování polymerů

První pokusy laserového svařování polymerů sahají do počátku 70. let. Laserové svařování je dnes důležitou metodou pro spojování polymerů. V posledních letech byla vyvinuta nová řada laserových systémů s vysokým výkonem, které využívají thulium dopovaná vlákna čerpaná laserovými diodami o vlnové délce 793 nm. Výstupní laserový signál má vlnovou délku kolem 2000 nm. Thulium dopovaný vláknový laser nabízí vysoké výstupní výkony okolo 25 W s kontinuální vlnou a dobrou kvalitu svazku ($M^2 < 1.2$), které lze přímo absorbovat v materiálu. Vlnová délka 2000 nm se často nazývá „eye safe“ tedy bezpečná pro oči. Toto označení vychází z absorpce světla v oční rohovce, které je na této vlnové délce vysoká. Je tedy menší pravděpodobnost, že bude ohrožena vysoce citlivá sítnice [15].

Princip svařování je zobrazen na obrázku 15. Laserový paprsek prochází transparentním materiálem a dopadá na absorpční materiál. Na absorpčním materiálu dochází k přeměně optické energie na tepelnou energii. Jako absorbér se často používají saze, nebo jiná barviva a pigmenty. Následně dochází mezi materiály k roztavení povrchů a jejich svaření [16].

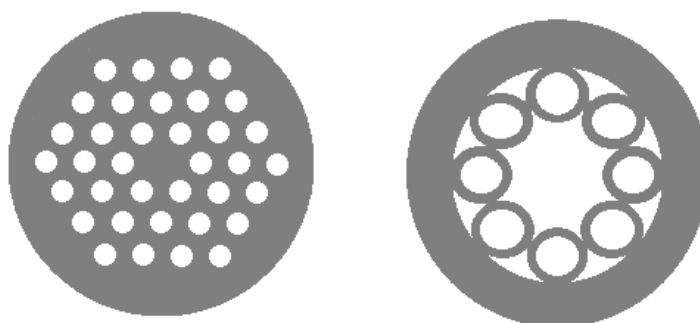


Obrázek 15: Princip laserového svařování

5.4 Optické komunikace

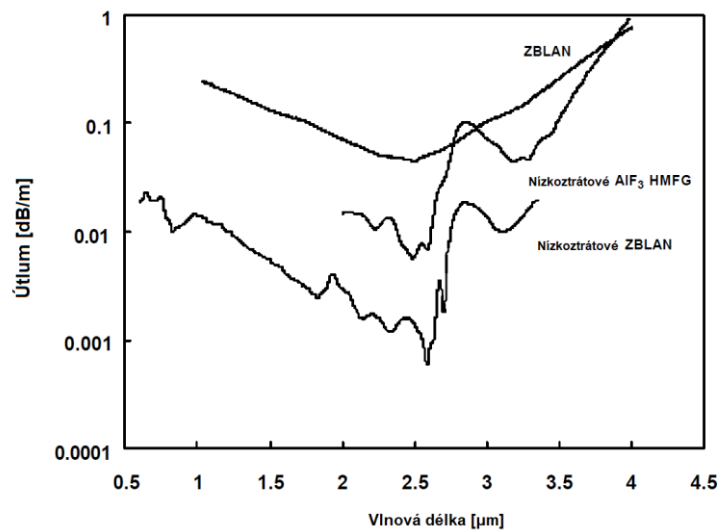
S rostoucí poptávkou po větší kapacitě komunikační sítě, se uvažuje o navržení nového přenosového okna v oblasti 2000 nm. Velkým přínosem by v takovéto síti byl zesilovač TDFA, který dosahuje vysokých zisků a nízkého zesílení šumu v této oblasti v porovnání s ostatním zesilovači. V nedávné době byla hranice TDFA posunuta k vlnové délce 1650 nm, vzhledem k této změně se otvírají zajímavé možnosti pro optické komunikace, mohlo by dojít k přemostění mezery mezi EDFA (L- pásmo) a TDFA [17].

Pro toto využití se počítá i s použitím tzv. hollow core vláken (Obr. 16), tedy vláken, kde je střed tvořen dutinami a energie se šíří vzduchem. Hollow core vlákna vykazují teoreticky zanedbatelný útlum a možnost přenosu na velké vzdálenosti bez nutnosti opakovačů nebo zesilovačů. Další z výhod hollow core vláken je možnost ladění spektrálních charakteristik a možnost použití širokého pásma vlnových délek.



Obrázek 16: Hollow core vlákna

Další možností pro přenos v okolí vlnové délky 2 μm jsou vlákna vyrobená z fluoridových skel. Tento typ vláken má nejmenší index lomu mezi vlákny pro IR oblast a díky tomu i nejnižší optickou nelinearitu. Pro fluorido-zirkonová skla může být teoreticky útlum $<0,01$ dB/km na 2-3 μm . Těto hodnoty nebylo prakticky nikdy dosaženo, v důsledku ztrát způsobených nečistotami a rozptylu ve skle. Nejnižší změřená hodnota byla 0,7 dB/km na 2,7 μm . Vzhledem k nízkým ztrátám se začalo uvažovat o nízkoztrátovém vlákně pro využití v telekomunikacích [20].

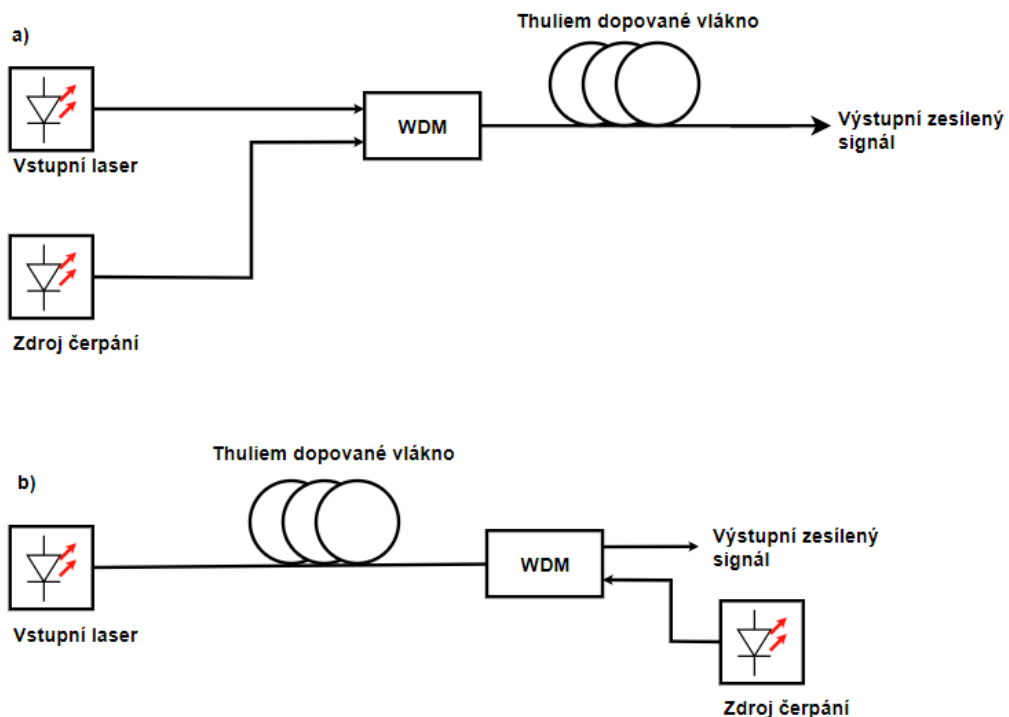


Obrázek 17: Závislost útlumu na vlnové délce pro jednotlivá fluoridová vlákna [21]

PRAKTICKÁ ČÁST

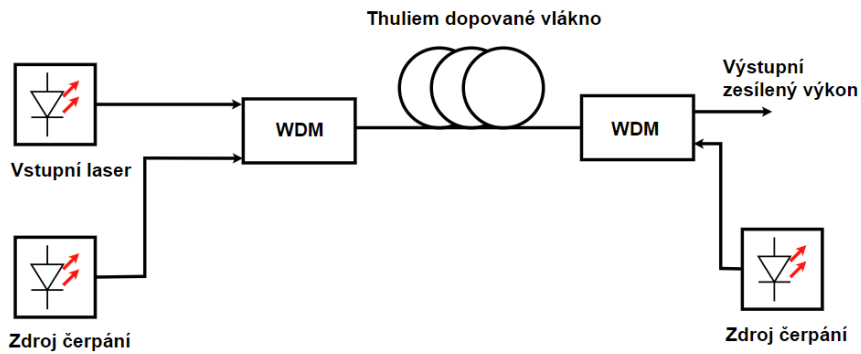
6. Praktická realizace

Jako základní zapojení pro TDFA bylo použito schéma s jedním zdrojem čerpání. Toto zjednodušené schéma zesilovače s dopředným čerpáním je znázorněno na obrázku 18 a). Vstupní signál z laseru je navázán přes optický výkonový slučovač (WDM) do dopovaného optického vlákna. Na druhý vstup slučovače je přiveden signál ze zdroje čerpání (pumpy). Signály jsou následně navázány do vlákna, kde dochází k zesílení. Inverzní populace se mění s polohou podél vlákna a dosahuje minima na jeho konci. Toto zapojení se používá pro případy kdy je vyžadováno dobrých šumových vlastností a nevádí nižší výstupní výkon. Na výstupu z vlákna je již zesílený vstupní signál. Obrázek 18 b) znázorňuje zapojení se zpětným čerpáním. Toto zapojení se používá především z důvodu, že pro čerpání může být využito vyšších hodnot výkonů a díky tomu může být docíleno i vyššího výstupního výkonu. Nevýhodou tohoto zapojení je, že vykazuje vyšší hodnotu šumu.



Obrázek 18: Základní zapojení TDFA zesilovače a) dopředné čerpání, b) zpětné čerpání

Na obrázku 19 je znázorněna modifikace základního zapojení. Toto zapojení nazýváme zapojení se dvěma zdroji čerpání. V tomto typu zapojení je k výstupu z dopovaného vlákna připojen druhý výkonový slučovač s druhým zdrojem čerpání. Výhodou tohoto zapojení je vyšší zisk a nízké šumové číslo.



Obrázek 19: Zapojení s dvěma zdroji čerpání

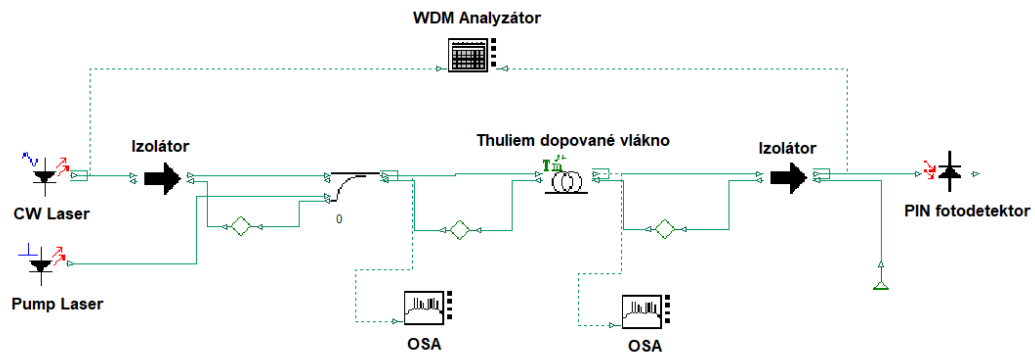
Tabulka 2 obsahuje základní hodnoty pro vlákno TmDF200, tyto hodnoty byly nastaveny jako parametry thuliového vlákna v simulačním programu OptiWave-OptiSystem, a následně bylo na tomto vlákne provedeno měření.

Tabulka 2: Hodnoty vlákna TmDF200 [8]

Vlákno	TmDF200
Jádro Ø (µm)	4
NA (-)	0,26
Dopanty	Al, La
Tm koncentrace (m⁻³)	8.4x10 ²⁵

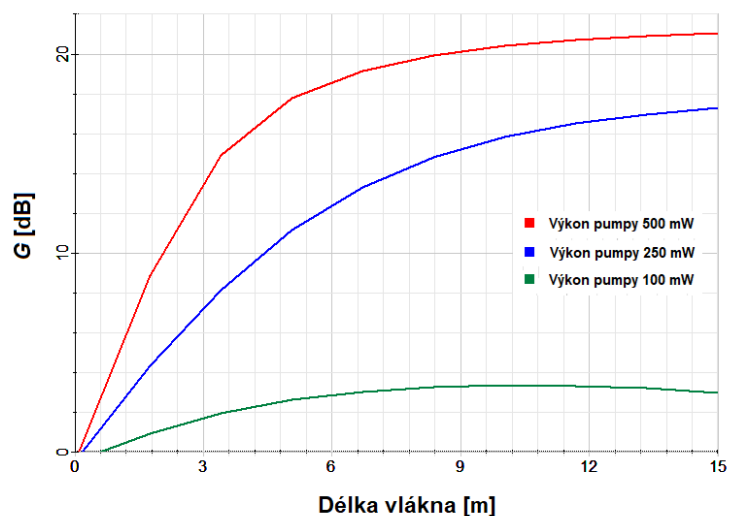
7. Výsledky simulace

Simulace byly prováděny z důvodu zkoumání vlastností TDFA a vláknového laseru. Všechny simulace byly realizovány v programu OptiWave-OptiSystem. Na obrázku 20 je schéma zapojení, které bylo reálně s různými modifikacemi používané v simulacích.



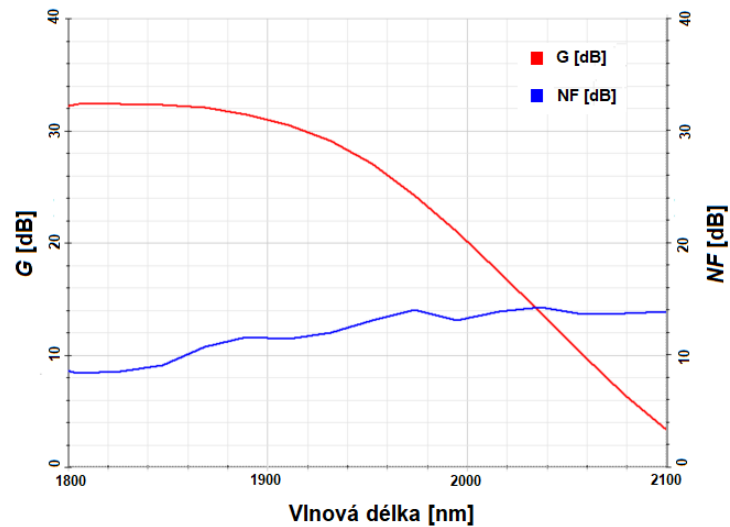
Obrázek 20: Zapojení TDFA zesilovače pro simulace

Na grafu 1, můžeme pozorovat křivky závislosti zisku G na délce dopovaného optického vlákna. Vlnová délka zdroje čerpání byla nastavena na 1565 nm. Simulace byly prováděny pro tři různé výkony čerpání 100, 250 a 500 mW. Vlnová délka vstupního signálu byla zvolena na 2000 nm a výkon byl nastaven na -10 dBm. Délka vlákna byla nastavována v rozsahu od 0,1 do 15 metrů. Z grafu je patrné, že G je maximalizován pro délku 10 metrů, nebo pro delší aktivní vlákno. Na 12 metrech délky aktivního vlákna při čerpání 500 mW a vstupním výkonu signálu -10 dBm je hodnota G rovna 20,7 dB. Z grafu 1 je dále patrné, že pro nízkou hodnotu výkonu čerpání dochází k rychlé saturaci zisku.



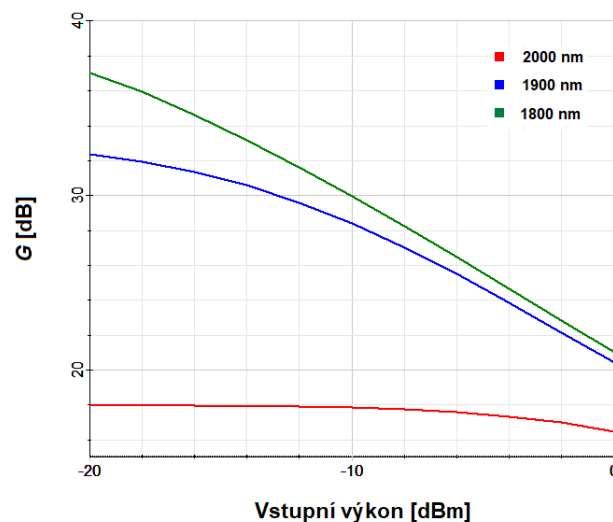
Graf 1: Závislost zisku na délce dopovaného vlákna

Graf 2 zobrazuje závislost G a NF na vlnové délce v rozmezí od 1800-2100 nm. Pro simulaci byl výkon vstupního signálu nastaven na -10 dBm, výkon čerpání byl nastaven na 27 dBm a thuliové aktivní vlákno bylo dlouhé 12 metrů. Nejvyšší hodnota G činila 32,5 dB pro vlnovou délku 1826 nm, nejnižší hodnota NF pro vlnovou délku 1805 nm byla 8,4 dB. Pro vlnovou délku 2000 nm byla hodnota G rovna 20,1 dB a hodnota NF 13,3 dB.



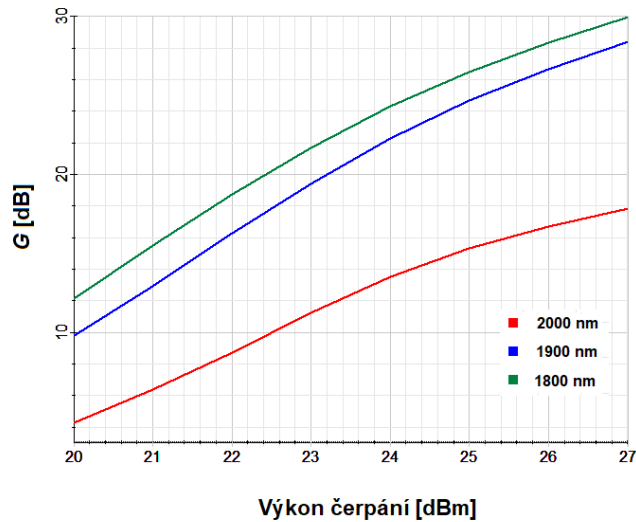
Graf 2: Závislost zisku a šumového čísla na vlnové délce

Třetí simulace byla prováděna z důvodu zjištění závislosti G na vstupním výkonu signálu. Závislost zisku na vstupním výkonu je zobrazena v grafu 3. Vstupní výkon byl nastaven v rozmezí od -20 do 0 dBm a výkon čerpání byl nastaven na hodnotu 27 dBm. Simulace byly prováděny pro tři vlnové délky 1800, 1900 a 2000 nm. Délka thuliového aktivního vlákna byla nastavena na 12 metrů.



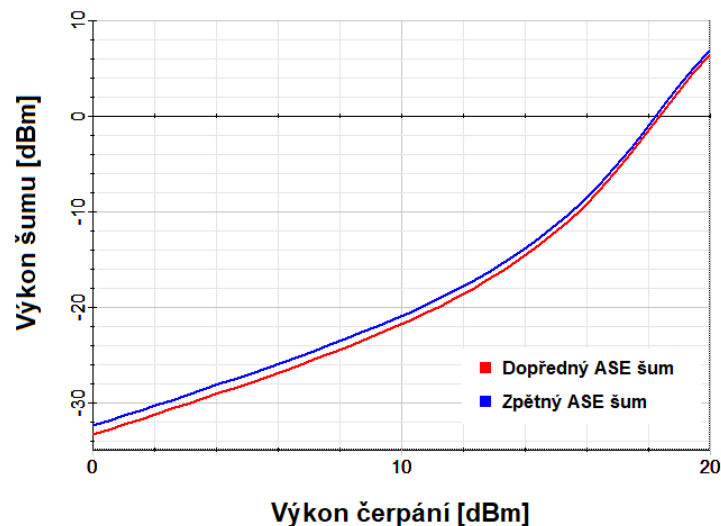
Graf 3: Závislost zisku na vstupním výkonu

Graf 4 zobrazuje závislost G na výkonu čerpání pro vlnové délky 1800, 1900 a 2000 nm. Výkon vstupního signálu byl nastaven na -10 dBm, výkon čerpání byl zvolen v rozmezí od 0 do 27 dB, délka thuliového vlákna byla 12 metrů. Maximální hodnota G na 2000 nm je 17,8 dB.



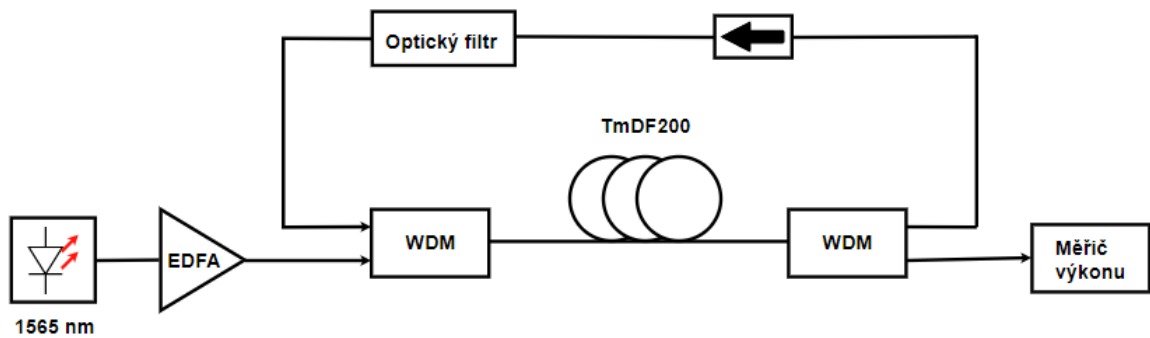
Graf 4: Závislost zisku na výkonu čerpání

Graf 5 zobrazuje závislost ASE (Amplified spontaneous emission) na výkonu čerpání. Vstupní výkon byl nastaven na -10 dBm a rozsah výkonu čerpání byl nastaven od 0 do 20 dBm. Délka thuliového vlákna byla 12 metrů. Simulace byla prováděna jak pro dopředný, tak pro zpětný ASE šum.



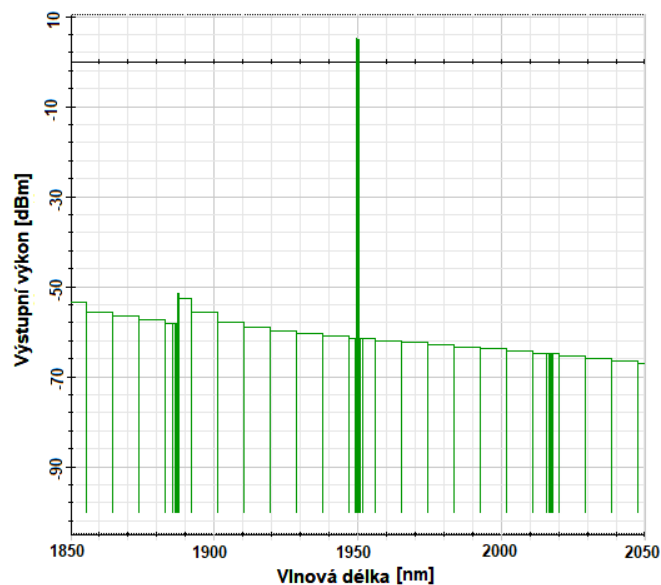
Graf 5: Závislost výkonu ASE šumu na výkonu čerpání

V druhém bloku simulací byl navržen a simulován thuliový vláknový laser. Na obrázku 21 je schéma zapojení kontinuálního vláknového laseru. Toto zapojení se skládá ze zdroje čerpání, jehož výstup je navázán přes WDM do thuliového vlákna. Signál na výstupu thuliového vlákna vstupuje do optické odbočnice, kde část výkonu vystupuje a zbytek je veden zpět na vstup thuliového vlákna.



Obrázek 21: Zapojení kontinuálního vláknového laseru

Výkon čerpání byl nastaven na 27 dBm o vlnové délce 1565 nm a délka thuliového vlákna byla nastavena na 5 metrů. Simulace byly provedeny pro 30 cyklů průběhu signálu. Výstupní výkon laseru byl 5,08 dBm na 1950 nm (Graf 6).

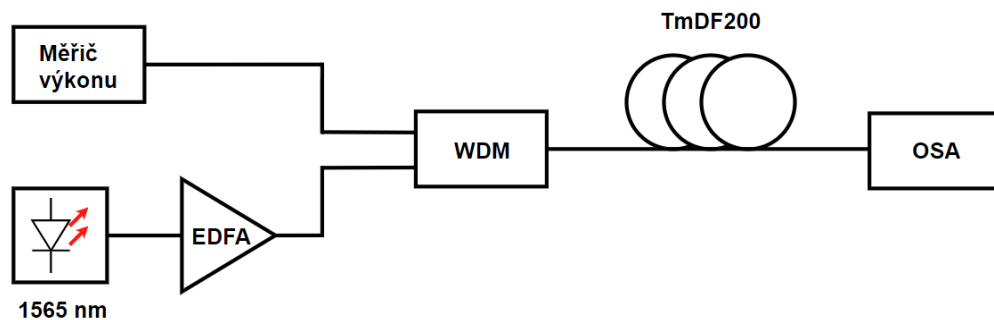


Graf 6: Výstupní výkon laseru

8. Praktické měření

8.1 Měření TDFFA bez vstupního signálu

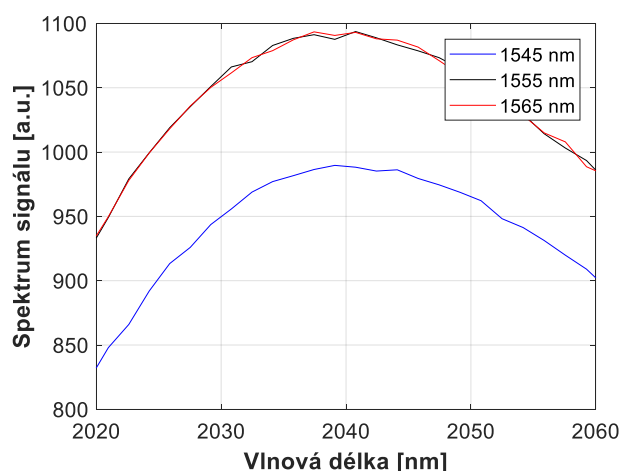
Obrázek 22 zobrazuje schéma zapojení pro měření průchozího signálu. Pro měření výstupního signálu bylo využito vstupního signálu čerpání o vlnové délce 1565 nm z laditelného laseru CoBrite DX400. Tento signál byl přiveden do EDFA, kde došlo k jeho zesílení. Měření byla prováděna pro rozsahy čerpání od 10 do 27 dBm. Abychom mohli pracovat v tomto rozsahu, bylo využito dvou EDFA zesilovačů. Pro rozsah od 10,0 do 20,5 dBm byl použit EDFA-KEOPSYS model: CEFA-C-HG-SM, pro rozsah od 20 do 27 dBm bylo využito zesilovače EDFA-KEOPSYS model: CEFA-C-PB-HP. Měření bylo prováděno nejdříve pro první rozsah a poté pro rozsah druhý. Signál z EDFA byl přiveden na vstup WDM a následně navázán do thuliového vlákna TmDF200. Na druhém konci thuliového vlákna bylo měřeno spektrum průchozího signálu pomocí spektrálního optického analyzátoru (OSA) ARCspectro ANIR. Na druhém vstupu WDM byl měřen výkon zpětně odraženého signálu pomocí digitálního měřiče optického výkonu ThorLabs PM100D s detektorem S148C pro rozsah 1200-2500 nm.



Obrázek 22: Schéma zapojení pro měření spektra průchozího signálu

První měření bylo provedeno z důvodu optimalizace nastavení vstupních parametrů. V tomto měření byla zkoumána závislost profilu spektra výstupního signálu na vlnové délce signálu čerpání. Měření bylo prováděno pro tři rozdílné vlnové délky signálu čerpání: 1545 nm, 1555 nm a 1565 nm. Vstupní výkon čerpání byl nastaven na hodnotu 20 dBm. Rozsah měření pro vlnové délky od 1545 do 1565 nm byl zvolen z důvodu dostupnosti zdroje signálu na těchto vlnových délkách.

Graf 7 zobrazuje detail závislosti profilu spektra výstupního signálu na vlnové délce vstupního signálu čerpání. Hodnota výkonu pro vlnovou délku 1545 nm je o 1,67 dBm nižší, než je hodnota výkonu pro vlnové délky 1555 nm nebo 1565 nm. Výkon pro vlnovou délku 1555 nm dosahoval téměř totožných hodnot jako výkon pro vlnovou délku 1565 nm. Výsledkem tohoto měření je zjištění, že aby mohl být provozován zesilovač co nejefektivněji a dosahoval co nejvyšších výstupních výkonů, musí být využito pro vstupní signál čerpání vlnové délky od 1555 nm do 1565 nm. Z tohoto poznatku vycházíme i v dalších měřeních, kdy je vlnová délka vstupního signálu čerpání nastavena na 1565 nm.

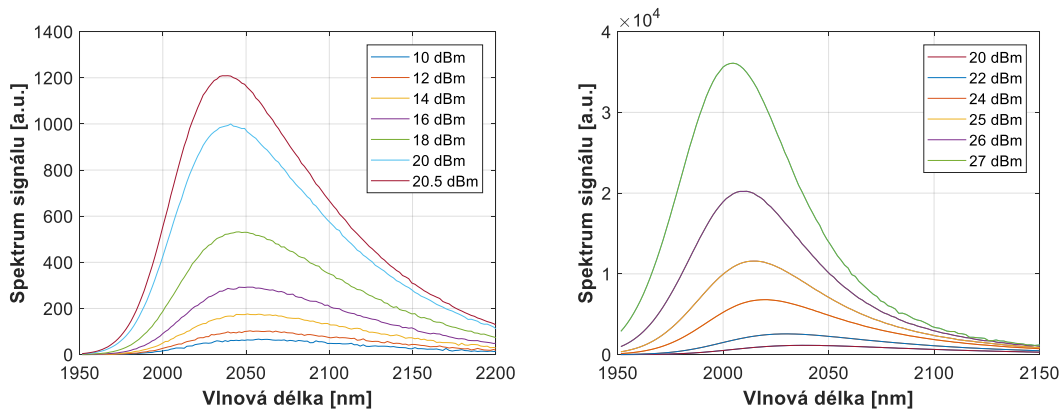


Graf 7: Závislost profilu spektra na vlnové délce signálu čerpání

Druhou sadou měření byla zkoumána závislost změny profilu spektra průchozího signálu vláknem na výkonu čerpání. Hodnoty výkonu čerpání, byly nastavovány v rozmezí od 10 dBm do 27 dBm. Měření bylo prováděno pro dvě různě dlouhá thuliová vlákna, první bylo dlouhé 12 metrů a druhé bylo dlouhé 4 metry.

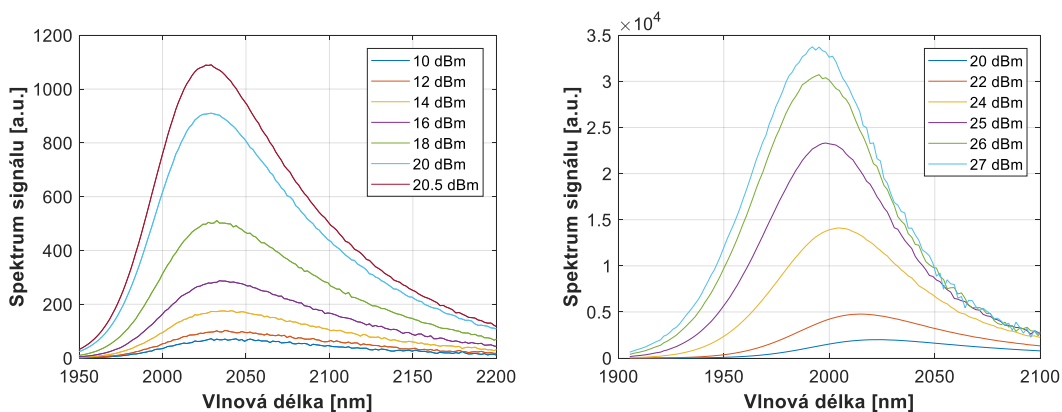
Grafy 8 zobrazují závislost spektra průchozího signálu na výkonu čerpání měřené na 12 metrovém thuliovém vlákně. Levý graf znázorňuje průběhy spekter pro hodnoty výkonu čerpání od 10,0 do 20,5 dBm. Pravý graf znázorňuje závislosti spekter pro hodnoty výkonu čerpání od 20 do 27 dBm. Při výkonu čerpání 27 dBm dochází k maximální hodnotě profilu spektra v okolí hodnoty vlnové délky 2000 nm.

Pro hodnotu výkonu čerpání 20 dBm dosahuje profil spektra maximální hodnoty okolo 1000 a.u. a pro hodnotu 27 dBm dosahuje maximální hodnot profilu spektra 36 000 a.u.. Pro signál čerpání o výkonu 27 dBm je hodnota výstupního výkonu rovna 12,6 dBm a výstupní signál pro hodnotu čerpání 20 dBm je roven výkonu -28,12 dBm.



Graf 8: Závislost profilu spektra výstupního signálu na výkonu čerpání pro vlákno délky 12 metrů

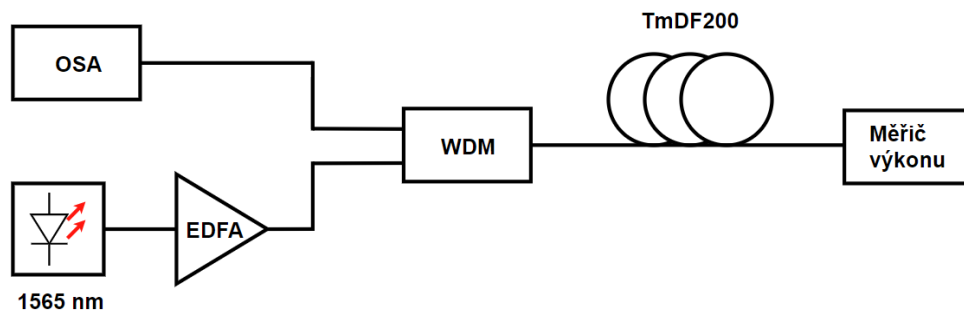
Stejná měření byla provedena pro thuliové vlákno o délce 4 metry. Grafy 9 obsahují hodnoty z měření spekter pro 4 metrové vlákno. Pro výkon čerpání od 10,0 do 20,5 dBm je maximální hodnota profilu spektra 1100 a.u. a pro hodnoty čerpání od 20 do 27 dBm dosahuje maximální hodnota spektra 33 700 a.u.



Graf 9: Závislost profilu spektra výstupního signálu na výkonu čerpání pro vlákno délky 4 metry

Pokud porovnáme maximální hodnoty profilů spektra mezi 12 a 4 metrovým thuliovým vláknem zjistíme, že na výkonu čerpání 27 dBm je spektrum 12 metrového vlákna o 6,4% vyšší, než u kratšího 4 metrového thuliového vlákna. Při hodnotě výkonu čerpání 25 dBm je hodnota spektra pro 4 metrové thuliové vlákno 23 300 a.u. a pro 12 metrové thuliové vlákno 11 600 a.u. tedy o 50,3% nižší hodnota. Pro dostatečné načerpání krátkých úseků (4 metry) thuliového vlákna nám stačí nižší hodnoty výkonu čerpání. Delší úseky (12 metrů) thuliového vlákna vyžadují vyšší hodnotu výkonu čerpání k tomu, aby bylo vlákno dostatečně načerpáno, a díky tomu může být následně dosaženo vyšších hodnot výstupních výkonů na 2000 nm.

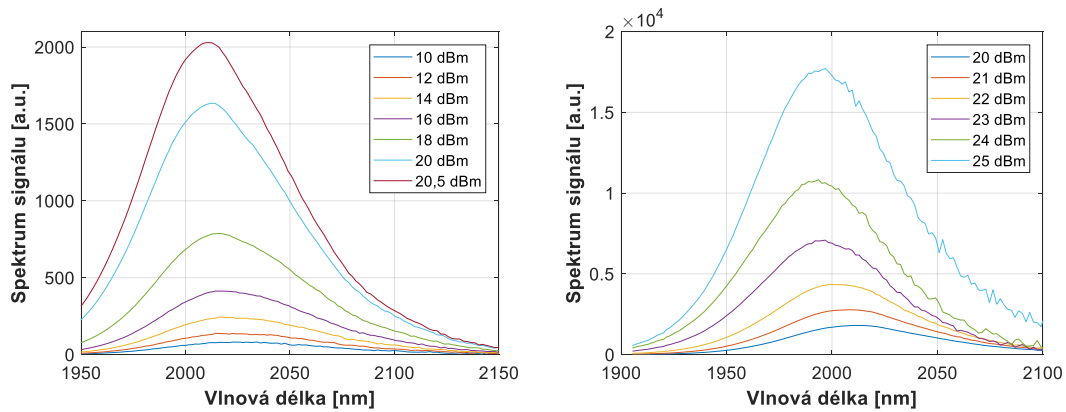
V dalším měření byla zjišťována hodnota spektra zpětně odraženého signálu. Pro toto měření je schéma zapojení zobrazené na obrázku 23. Signál o vlnové délce 1565 nm ze zesilovače EDFA byl přiveden na vstup WDM a následně navázán do thuliového vlákna. Rozdíl v zapojení je v umístění OSA a digitálního měřiče optického výkonu, kde došlo k umístění přístrojů v opačném pořadí, než u měření průchozího signálu. Následně byl na digitálním měřiči optického výkonu měřen výkon průchozího signálu a na OSA byl měřen profil spektra odraženého signálu.



Obrázek 23: Schéma zapojení pro měření spektra zpětně odraženého signálu

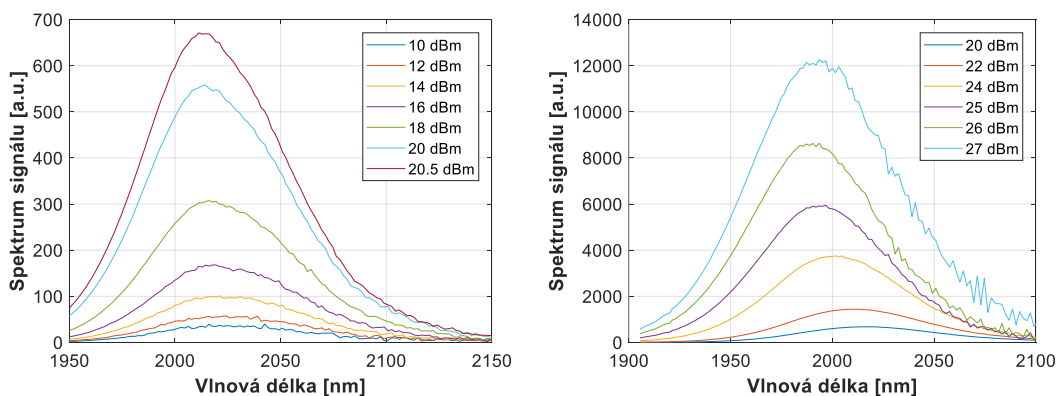
Grafy 10 zobrazují závislost spektra zpětně odraženého signálu na výkonu čerpání. V levém grafu jsou vyneseny hodnoty výkonu čerpání od 10 do 25 dBm. Maximální hodnota spektra pro rozsah čerpání od 10,0 do 20,5 dBm byla dosažena na výkonu 20,5 dBm, kdy spektrum dosáhlo hodnoty 2100 a.u. a pro rozsah od 20 do 25 dBm byla maximální hodnota spektra 17700 a.u. pro výkon čerpání 25 dBm.

Pokud porovnáme hodnoty spekter pro výkon čerpání 25 dBm u 12 metrového thuliového vlákna, tak pro průchozí signál dosahuje maximální hodnota spektra 11 600 a.u. a pro zpětně odražený signál dosahuje maximální hodnota spektra 17 700 a.u. Na hodnotě čerpání 25 dBm je hodnota spektra průchozího signálu menší o 34,6%, v porovnání s maximální hodnotou spektra zpětně odraženého signálu.



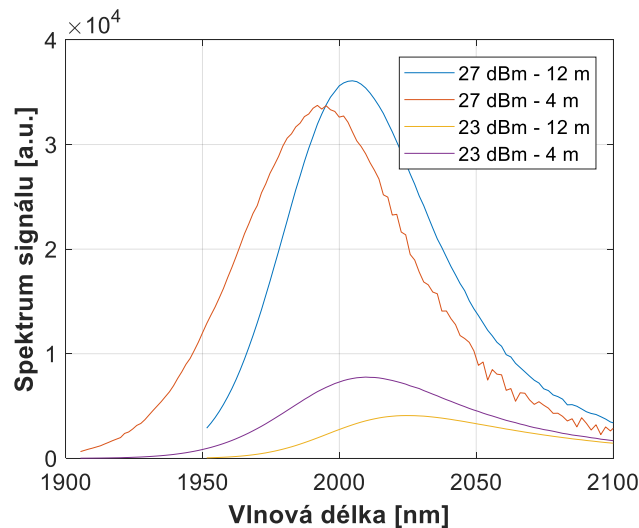
Graf 10: Závislost profilu spektra zpětně odraženého signálu na výkonu čerpání pro vlákno délky 12 metrů

Grafy 11 zobrazují závislosti profilu spektra zpětně odraženého signálu na výkonu čerpání pro thuliové vlákno délky 4 metry. Měření bylo prováděno na rozsahu výkonu čerpání od 10 do 27 dBm. V levém grafu jsou zobrazeny spektra pro výkon signálu čerpání od 10,0 do 20,5 dBm. Pravý graf zachycuje závislosti spekter pro hodnoty výkonu čerpání od 20 do 27 dBm. Maximální hodnota spektra odraženého signálu je 12300 a.u. pro hodnotu výkonu čerpání 27 dBm. Na výkonu čerpání 25 dBm je spektrum zpětně odraženého signálu rovno 6000 a.u., a hodnota spektra průchozího signálu byla změřena na 17700 a.u. Maximální hodnota spektra zpětně odraženého signálu je o 66,4% nižší, v porovnání s hodnotou spektra průchozího signálu. Tento rozdíl je dán rychlejším načerpáním kratšího kusu thuliového vlákna.



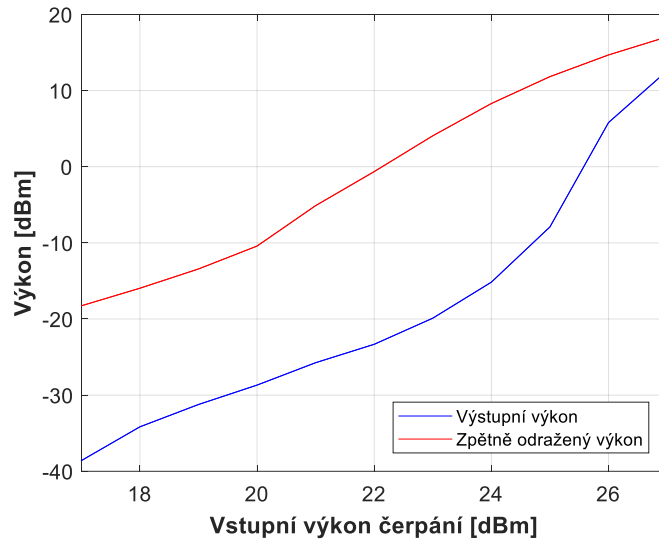
Graf 11: Závislost profilu spektra zpětně odraženého signálu na výkonu čerpání pro vlákno délky 4 metry

V grafu 12 jsou porovnány spektra pro délky thuliového vlákna 12 a 4 metry na dvou různých výkonech čerpání. Maximální hodnota spektra 4 metrového thuliového vlákna je o 6,5% nižší než maximální hodnota spektra 12 metrového vlákna při výkonu signálu čerpání 27 dBm. Pro výkon signálu čerpání 23 dBm je hodnota spektra 12 metrového thuliového vlákna o 47% nižší, než pro 4 metrové vlákno.



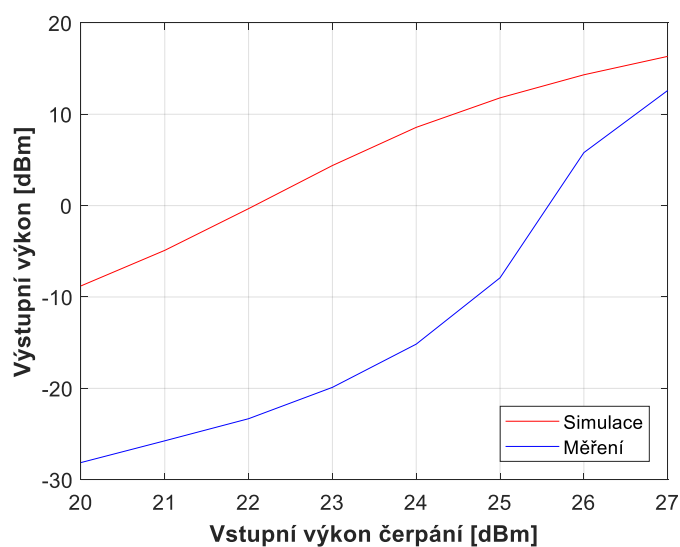
Graf 12 Porovnání spekter pro rozdílné délky vlákna.

Společně s měřením spekter byla také měřena úroveň výkonu výstupního signálu, nebo úroveň zpětně odraženého výkonu. Graf 13 zobrazuje naměřené hodnoty výstupního výkonu v oblasti 2000 nm v závislosti na vstupním výkonu čerpání pro 12 metrové thuliové vlákno. Vstupní výkon čerpání byl nastavován od 17 do 27 dBm. Se zvyšujícím se výkonem čerpání dochází ke snižování rozdílu výkonů mezi zpětně odraženým výkonem a výstupním výkonem. Maximální hodnota zpětně odraženého výkonu byla 17,06 dBm a hodnota výstupního výkonu 12,60 dBm.



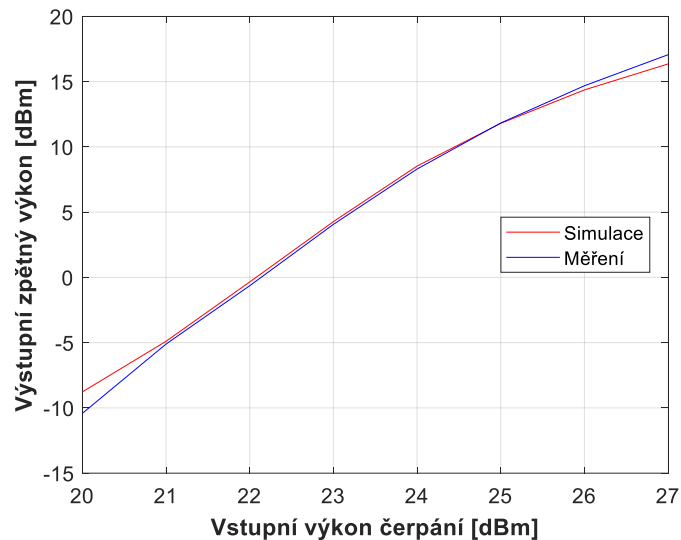
Graf 13: Závislost úrovně výstupního výkonu na vstupním výkonu čerpání

Hodnoty výstupního výkonu a zpětně odraženého výkonu, byly simulovány v programu OptiWave-OptiSystem. Graf 14 zobrazuje porovnání závislostí výstupního výkonu na vstupním výkonu signálu čerpání pro naměřené a simulované hodnoty thuliového vlákna. Pro čerpání 27 dBm byla změřena hodnota výstupního výkonu 12,6 dBm, pro simulaci vyšla hodnota 16,3 dBm. Simulační software neuvažuje dostatečně vliv absorpce thuliového vlákna a tím pádem při nižších hodnotách čerpání vykazuje vyšší výstupní výkon. Pokud bychom chtěli získat v simulaci přesnějších hodnot a přiblížit se tak naměřeným hodnotám, museli bychom absorpci vlákna modelovat jako útlum vlákna v závislosti na čerpání.



Graf 14: Porovnání výsledků výstupního signálu simulace a měření

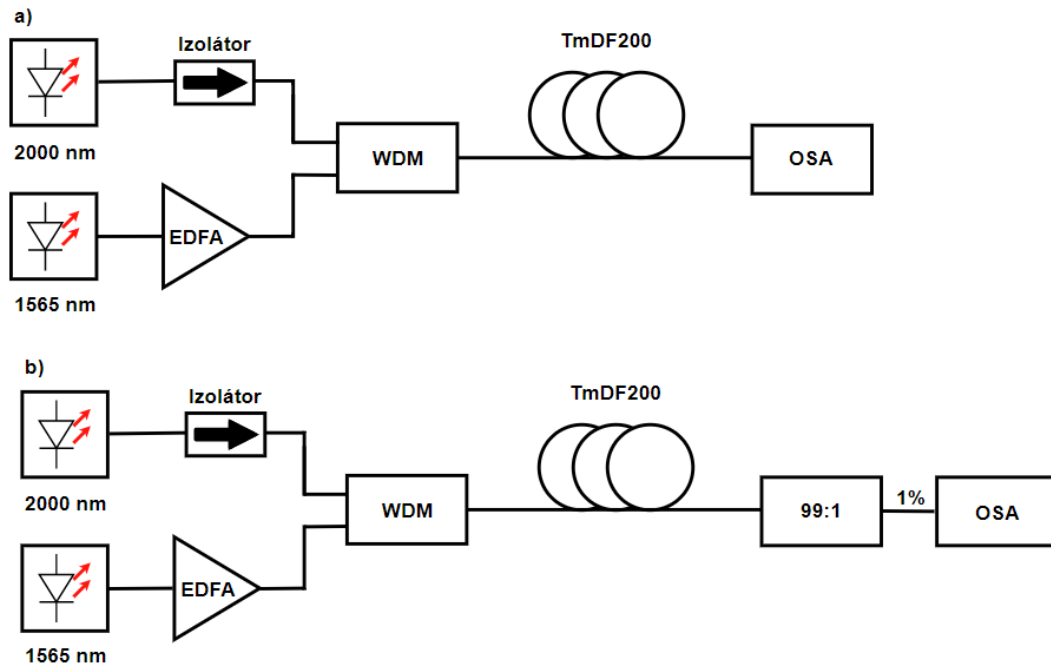
V grafu 15 jsou porovnávány hodnoty výstupního zpětně odraženého výkonu na vstupním výkonu čerpání pro hodnoty získané ze simulačního programu s naměřenými hodnotami. Maximální hodnota odraženého výkonu byla v simulaci 16,35 dBm.



Graf 15: Porovnání výsledků simulace a měření zpětně odraženého signálu

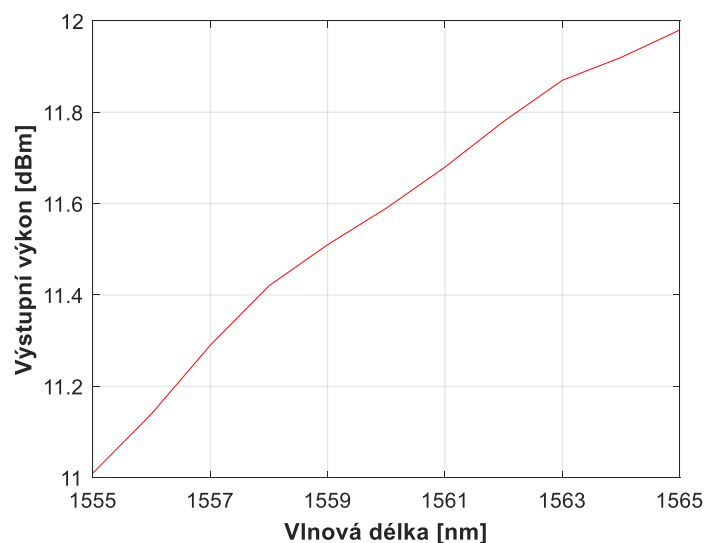
8.2 Měření TDFFA se vstupním signálem 2000 nm

Obrázek 24(a) zobrazuje schéma pro měření TDFFA s využitím vstupního Fabry-Perot Single-mode laseru Eblana pracujícím na vlnové délce 2000 nm. Teplota laseru byla kontrolována pomocí Newport Modular Controller Model 8000. Jako zdroj čerpání bylo využito KEOPSYS EDFA zesilovačů. Za laser byl umístěn optický izolátor pro 2000 nm z důvodu ochrany vstupního laseru. Signál z laseru o vlnové délce 2000 nm a ze zdroje čerpání o vlnové délce 1565 nm byl pomocí WDM navázán do vlákna TmDF200. Pro výkony od 20 do 27 dBm, byl výstupní signál z vlákna veden přes odbočnici s poměrem dělení výkonu 99:1 z důvodu ochrany OSA (Obrázek 24(b)). Aby bylo dosaženo minimálních ztrát výkonu, musel být při měření brán zřetel na návrh optické trasy z důvodu minimalizace ostrých ohybů na vláknech. Při špatně zvolených poloměrech ohybů, může docházet k vysokým ztrátám. Klasická SiO₂ optická vlákna jsou optimalizována pro přenos 1300-1550 nm. Při delších vlnových délkách dochází při ohybech k vyvázání většího výkonu signálu z důvodu velikosti průchozí vlny.



Obrázek 24: Schéma zapojení pro měření TDFA se vstupním signálem na 2000 nm

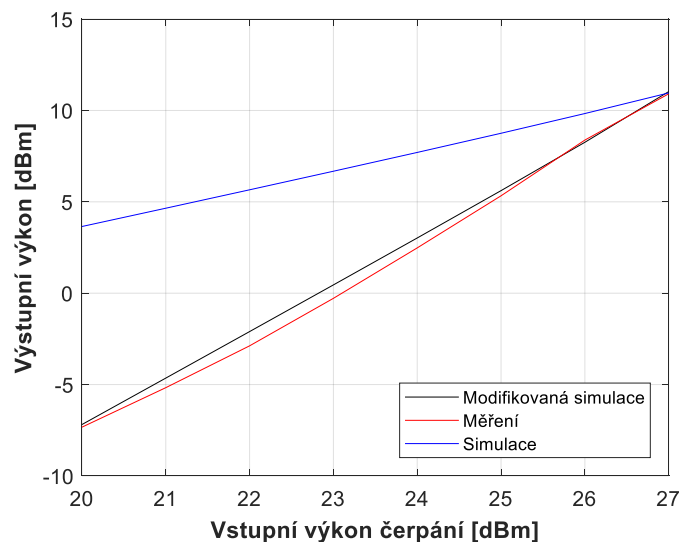
Spektra z grafu 7 ukázala, že pro měření TDFA je efektivní využívat vlnové délky čerpání od 1555 do 1565 nm. Abychom zpřesnili předchozí měření, provedli jsme měření výstupního výkonu v závislosti na změně vlnové délky čerpání, jehož charakter je zobrazen v grafu 16. Měření bylo prováděno na 12 metrovém thuliovém vlákne, při hodnotě výkonu čerpání 27 dBm a vstupního signálu o výkonu 0 dBm. Nejvyšší hodnota 11,98 dBm výstupního výkonu byla na vlnové délce 1565 nm. Měření bylo provedeno pro tento rozsah z důvodu dostupnosti zdroje záření pro tyto vlnové délky.



Graf 16: Závislost výstupního výkonu signálu na vlnové délce čerpání

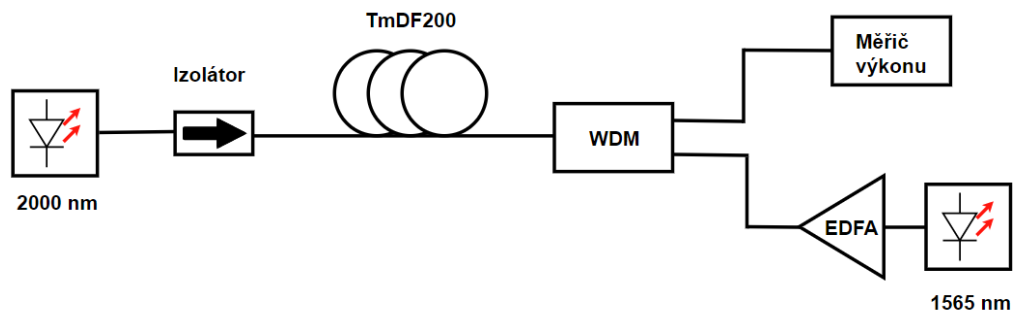
V grafu 17 jsou porovnaná naměřená data závislosti výstupního výkonu na výkonu čerpání, společně s daty získanými v simulačním programu. Měření bylo prováděno pro vstupní signál laseru o výkonu 0 dBm na vlnové délce 2000 nm, bylo využito 12 metrového thuliového vlákna. Výkon čerpání byl nastavován v rozmezí od 20 do 27 dBm. Na hodnotě 27 dBm je zisk TDFA roven 10,9 dB.

Útlum thuliového vlákna byl v simulaci nastaven na hodnotu 0,95 dB/km. Thuliové vlákno v simulacích vykazovalo vyšší hodnoty výstupních výkonů na 2000 nm v porovnání s daty z měření. Na hodnotě čerpání 20 dBm byl rozdíl výkonů hodnot simulace a měření 10,2 dBm. Závislost výstupního výkonu na vstupním výkonu čerpání pro oblast 20-27 dBm je téměř lineární. Pokud bychom absorpci vlákna modelovali jako útlum vlákna v závislosti na čerpání, tak by při lineární změně útlumu vlákna od 1,85 do 0,95 dB/km pro čerpání od 20 do 27 dBm došlo k přiblížení výstupní charakteristiky simulace naměřeným hodnotám.



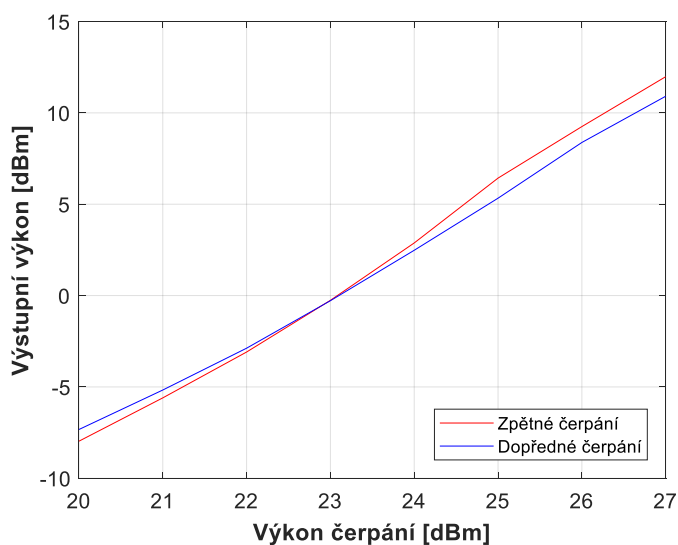
Graf 17: Porovnání výsledků simulace a měřených dat pro vstupní signál 0 dBm

TDFA byl měřen pro dvě základní zapojení zdroje čerpání. V prvním měření se jednalo o tzv. dopředné čerpání (Obrázek 24) a v druhém případě o tzv. zpětné čerpání (Obrázek 25). Měření bylo prováděno na 12 metrech thuliového vlákna, kde byl vstupní signál nastaven na hodnotu 0 dBm a výkon čerpání byl nastavován v rozsahu od 20 do 27 dBm



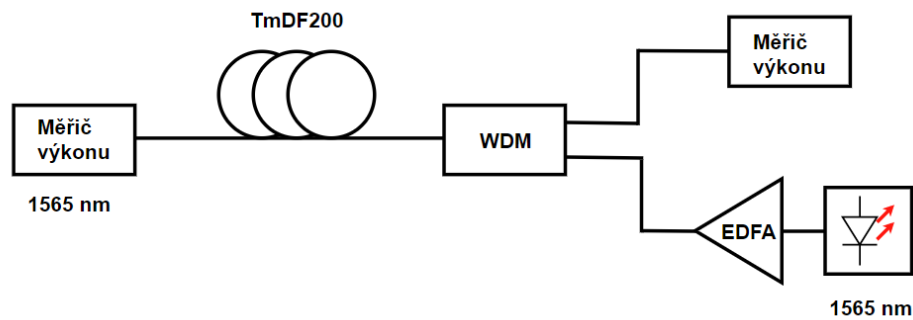
Obrázek 25: Schéma zapojení pro zpětné čerpání

Graf 18 zobrazuje závislosti výstupního výkonu (2000 nm) na výkonu čerpání (1565 nm). Do hodnoty 22,5 dBm výkonu čerpání by bylo efektivnější využívat dopředného čerpání. Od hodnoty 23 dBm je výhodnější používat zapojení se zpětným čerpáním. Na maximální hodnotě čerpání byla hodnota výstupního výkonu pro dopředné čerpání rovna 10,91 dBm a pro zpětné čerpání 11,92 dBm.



Graf 18: Porovnání dopředného a zpětného čerpání

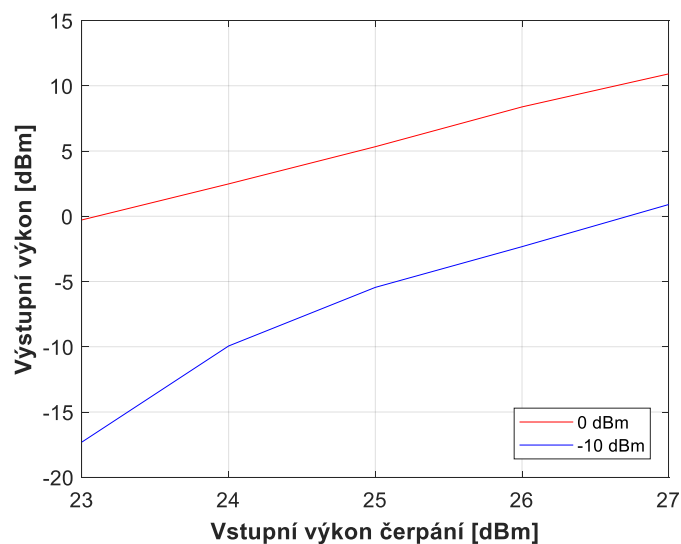
Abychom zjistili, jak je čerpání ve 12 metrovém vlákne absorbováno, byl při zpětném čerpání zapojen před optický izolátor digitální měřič optického výkonu ThorLabs PM20 pracující v oblasti 1550 nm. Schéma zapojení je zobrazeno na obrázku 26. Na měřiči výkonu byla měřena úroveň průchozího výkonu čerpání (1565 nm). V rozmezí od 20 do 27 dBm výkonu čerpání nebyl naměřen žádný výkon v oblasti 1565 nm, z tohoto měření vyplývá, že všechny výkon čerpání byl absorbován ve vlákne.



Obrázek 26: Schéma zapojení pro měření úrovně průchozího signálu na 1565 nm

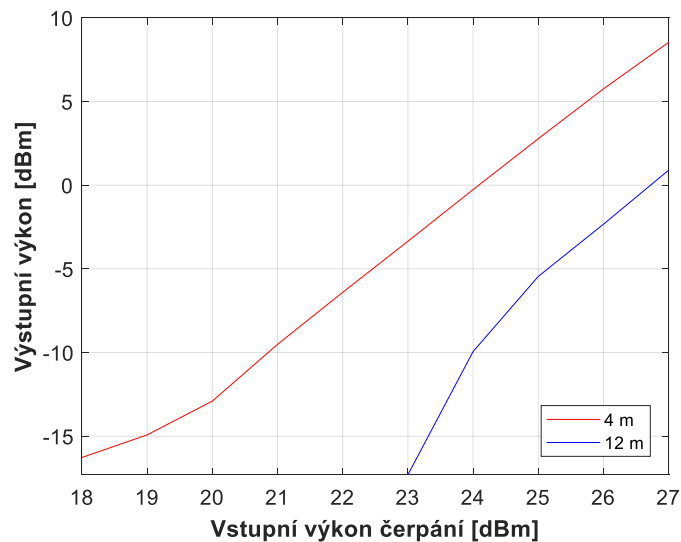
Aby bylo zjištěno, jestli je výstupní výkon závislý na hodnotě vstupního signálu, bylo provedeno měření pro dvě různé hodnoty vstupního signálu 0 dBm a -10 dBm. K tomuto měření bylo použito vlákno délky 12 metrů, které bylo čerpáno výkony od 20 do 27 dBm.

Z grafu 19 je patrné, že hodnota 0 dBm vstupního signálu vykazuje vyšší hodnoty výstupního výkonu, než pro vstupní signál -10 dBm. Pro vstupní signál 0 dBm při čerpání 27 dBm je hodnota výstupního výkonu rovna 10,9 dBm. Hodnota výstupního výkonu pro vstupní signál -10 dBm při čerpání 27 dBm je 0,9 dBm. V porovnání je tedy hodnota výstupního signálu pro signál 0 dBm o 10 dBm vyšší než pro vstupní signál -10 dBm.



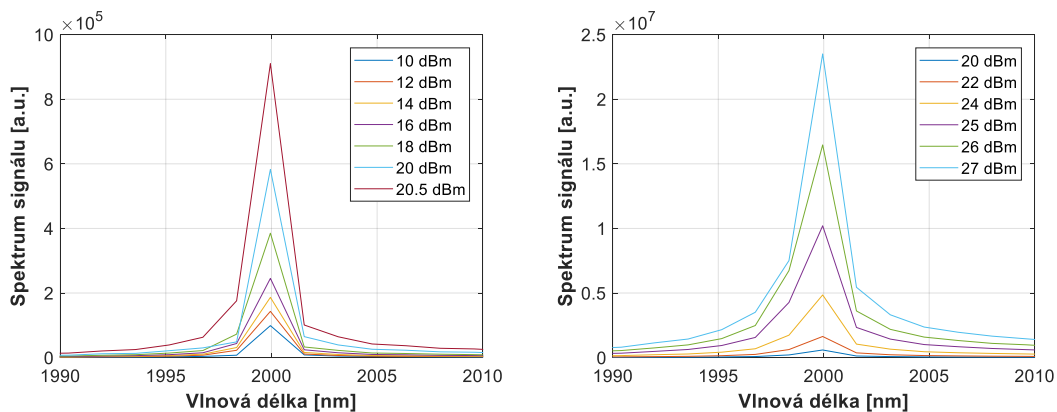
Graf 19: Porovnání hodnot výstupního výkonu na hodnotě vstupního signálu

Graf 20 porovnává naměřené hodnoty pro délky thuliového vlákna 4 a 12 metrů. Vstupní signál byl nastaven na -10 dBm a výkon čerpání byl nastavován od 18 do 27 dBm. Z grafu je patrné, že pro nižší úrovně vstupního signálu je výhodnější využívat kratších úseků thuliového vlákna. Na 4 metrovém thuliovém vláknu začíná být signál zesilován v okolí hodnot čerpání 19-20 dBm a výstupní signál dosahuje vyšší úrovně výkonu než pro 12 metrové thuliové vlákno. Pro porovnání 12 metrové vlákno začíná zesilovat až na hodnotě čerpání 24 dBm.



Graf 20: Závislost výstupního signálu na výkonu čerpání pro rozdílné délky vlákna

Pro vlákno délky 4 metry bylo změřeno spektrum výstupního signálu. Vstupní signál byl nastaven na výkon -10 dBm, měření bylo prováděno pro výkon čerpání od 10 do 27 dBm. Jestli je společně se vstupním signálem zesilován i šum, bylo motivací k měření spektra výstupního signálu. Pokud by bylo zjištěno, že je detekován společně s výstupním signálem na 2000 nm i zesílený šum, musela by být přidána do měření ještě Braggova mřížka pro 2000 nm, aby byl zajištěn kvalitní výstupní signál.



Graf 21: Závislost profilu spektra na výkonu čerpání od 10 do 27 dBm

Grafy 21 obsahují závislosti profilu spektra na výkonu čerpání. Výkon čerpání byl nastavován od 10,0 do 20,5 dBm. Maximální hodnota spektra pro výkon čerpání 20,5 dBm je přibližně 9×10^5 a.u. a odpovídá hodnotě výstupního výkonu -12,3 dBm. Pravý graf zobrazuje závislost profilu spektra pro výkon čerpání od 20 do 27 dBm. Maximální hodnota spektra pro výkon čerpání 27 dBm je $2,3 \times 10^7$ a.u. a odpovídá hodnotě výstupního výkonu 8,54 dBm. Hodnota výstupního výkonu pro čerpání 27 dBm je větší o 20,8 dBm v porovnání s hodnotou pro čerpání 20,5 dBm.

Z obou grafů je patrné, že je zesilován jen vstupní signál, tedy že všechen zisk jde na signál 2000 nm a spektrum neobsahuje zesílený šum. Díky tomuto zjištění, nemusela být do měření přidána Braggova mřížka na 2000 nm.

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo provedení analýzy možností zesílení optického signálu v oblasti 2000 nm. Byla provedena rešerše jednotlivých typů optických zesilovačů. Práce se zaměřuje především na thuliem dopovaný vláknový zesilovač, který je ideální pro zesilování signálu v oblasti 2000 nm z důvodu, že zářivý přechod mezi energetickými hladinami je při vhodném čerpání právě v této oblasti. Dále se práce zabývá využitím dopovaného optického vlákna jako vláknového laseru.

V praktické části práce byly prováděny simulace měření základních konfigurací thuliem dopovaného vláknového zesilovače. Simulace a měření byla prováděna pro vlákno TmDF200. Ze simulací bylo zjištěno, že pro efektivní zapojení je důležité zvolit vhodnou délku thuliového vlákna. Pro výkon čerpání 500 mW je pro maximalizaci zisku vhodné využívat délky vlákna 10 a více metrů. Nejvyšší hodnoty zisku 32,5 dB bylo dosaženo v simulaci na vlnové délce 1826 nm. Pro vlnovou délku 2000 nm, byla hodnota zisku rovna 20,1 dB. Praktické měření výstupního signálu a jeho spektra bylo prováděno pro délku thuliového vlákna 12 a 4 metry. Z měření bylo zjištěno, že výstupní výkon je závislý na vlnové délce čerpání. Aby bylo dosaženo co nejvyšších výstupních výkonů, byla zvolena vlnová délka čerpání 1565 nm. Ze změřených spekter výstupního signálu vyplývá, že dochází k zesilování pouze vstupního signálu 2000 nm a spektrum neobsahuje zesílený šum ani šum spontánní emise. Při měření byla porovnána zapojení se zpětným a dopředným čerpáním. Bylo zjištěno, že zpětné čerpání je efektivnější pro vyšší hodnoty výkonu čerpání. Při měření zpětného čerpání byla také zkoumána velikost průchozího signálu 1565 nm. Nebyl naměřen žádný výkon, můžeme tedy potvrdit, že bylo veškeré čerpání absorbováno v 12 metrovém vlákně. Měřením bylo zjištěno, že pro nižší úrovně vstupního signálu je výhodnější využívat kratších úseků thuliového vlákna. Vstupní signál byl pro 4 metrové thuliové vlákno zesilován v okolí hodnot čerpání 20 dBm, zatímco 12 metrové vlákno začínalo zesilovat až na hodnotě čerpání 24 dBm.

V práci byla také porovnáována naměřená a simulovaná data pro závislost výstupního výkonu na výkonu čerpání. Při porovnání naměřených a simulovaných hodnot, bylo zjištěno, že simulační software neuvažuje dostatečně vliv absorpce thuliového vlákna a tím pádem vykazuje simulace vyšších výstupních výkonů. Pro zpřesnění hodnot simulace by musela být absorpce vlákna modelována jako útlum vlákna v závislosti na čerpání.

SEZNAM LITERATURY

- [1] Lucki, M., 2013. Optické zesilovače. Praha: České vysoké učení technické, Fakulta elektrotechnická,[cit.3.2.2019]. Dostupné z:http://data.cedupoint.cz/oppa_elearning/2_KME/162.pdf.
- [2] KUMAR, Shiva a M. Jamal DEEN. *Fiber optic communications: fundamentals and applications*. Chichester, West Sussex, United Kingdom: Wiley, [2014]. ISBN 978-0-470-51867-0.
- [3] YU, Jinlong, Hao HU, Aixu ZHANG, et al. All-optical 3R regeneration based on the XPM effect of semiconductor optical amplifier. *Microwave and Optical Technology Letters* [online]. 2008, **50**(7), 1807-1810 [cit. 2019-05-05]. DOI: 10.1002/mop.23473. ISSN 08952477. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/mop.23473>
- [4] ANTTALAINEN, Tarmo. *Introduction to telecommunications network engineering*. 2nd ed. Boston: Artech House, c2003. ISBN 9781580535007.
- [5] MAMYSHEV, P.V. All-optical data regeneration based on self-phase modulation effect. In: *24th European Conference on Optical Communication. ECOC '98 (IEEE Cat. No.98TH8398)* [online]. Telefonica, 1998, s. 475-476 [cit. 2019-05-05]. DOI: 10.1109/ECOC.1998.732666. ISBN 84-89900-14-0. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/732666/>
- [6] SENIOR, John M. a M. Yousif JAMRO. *Optical fiber communications: principles and practice*. 3rd ed. New York: Financial Times/Prentice Hall, 2009. ISBN 013032681x.
- [7] THE EDITORS OF ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA, ed. Thulium. *Encyclopædia Britannica* [online]. Encyclopædia Britannica, 2014, června 17, 2014 [cit. 2019 02-03]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/thulium>

- [8] KHAMIS, Mustafa A. a Karin ENNSER. Theoretical Model of a Thulium-Doped Fiber Amplifier Pumped at 1570 nm and 793 nm in the Presence of Cross Relaxation. *Journal of Lightwave Technology* [online]. 2016, **34**(24), 5675-5681 [cit. 2019-05-05]. DOI: 10.1109/JLT.2016.2631635. ISSN 0733-8724. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7752850/>
- [9] YAMAMOTO, T., Y. MIYAJIMA a T. KOMUKAI. 1.9 μm Tm-doped silica fibre laser pumped at 1.57 μm . *Electronics Letters* [online]. 1994, **30**(3), 220-221 [cit. 2019-05-05]. DOI: 10.1049/el:19940135. ISSN 0013-5194. Dostupné z: https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/el_19940135
- [10] Cross-relaxation. *Simphotek* [online]. USA: Simphotek, Inc. USA, 2015 [cit. 2019-02-03]. Dostupné z: <http://www.simphotek.net/bckg/bckg.cross-relx.html>
- [11] HENDERSON, S.W., P.J.M. SUNI, C.P. HALE, S.M. HANNON, J.R. MAGEE, D.L. BRUNS a E.H. YUEN. Coherent laser radar at 2 μm using solid-state lasers. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* [online]. 1993, **31**(1), 4-15 [cit. 2019-05-05]. DOI: 10.1109/36.210439. ISSN 01962892. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/210439/>
- [12] POKORNÝ J., HANUŠ T. Současnost a perspektiva laserové litotripse v urologii. *Endoskopie* [online]. 18. vydání. Olomouc : Solen, s.r.o., 2009, č 3, s. 105-107. ISSN 1804-6096. Dostupné z: www.casopisendoskopie.cz/pdfs/end/2009/03/06.pdf.
- [13] FRIED, Nathaniel M. Recent advances in infrared laser lithotripsy [Invited]. *Biomedical Optics Express* [online]. 2018, **9**(9), 1-17 [cit. 2019-05-05]. DOI: 10.1364/BOE.9.004552. ISSN 2156-7085. Dostupné z: <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=boe-9-9-4552>

- [14] SCHOLLE, Karsten, Samir LAMRINI, Philipp KOOPMANN a Peter FUHRBERG. 2 μm Laser Sources and Their Possible Applications. PAL, Bishnu, ed. *Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics* [online]. 2010. InTech, 2010, 2010-02-01, s. 1-33 [cit. 2019-05-05]. DOI: 10.5772/39538. ISBN 978-953-7619-82-4. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/frontiers-in-guided-wave-optics-and-optoelectronics/2-m-laser-sources-and-their-possible-applications>
- [15] MINGAREEV, Ilya, Fabian WEIRAUCH, Alexander OLOWINSKY, Lawrence SHAH, Pankaj KADWANI a Martin RICHARDSON. Welding of polymers using a 2 μm thulium fiber laser. *Optics & Laser Technology* [online]. 2012, **44**(7), 2095-2099 [cit. 2019-05-05]. DOI: 10.1016/j.optlastec.2012.03.020. ISSN 00303992. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0030399212001302>
- [16] Svařování plastů laserem. *www.LT.cz* [online]. Leonardo technology s.r.o., 2018 [cit. 2019-02-03]. Dostupné z: www.lt.cz/e-learning/laser/svarovani-plastu-laserem
- [17] WANG, Junjia, Sijing LIANG, Yongmin JUNG, Qiongyue KANG, Shaif-UI ALAM a David J. RICHARDSON. Broadband Silica-Based Thulium Doped Fiber Amplifier Employing Dual-Wavelength Pumping. In: *Conference on Lasers and Electro-Optics* [online]. Washington, D.C: OSA, 2016, 2016, SM1Q.2- [cit. 2019-05-05]. DOI: 10.1364/CLEO_SI.2016.SM1Q.2. ISBN 978-1-943580-11-8. Dostupné z: https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=CLEO_SI-2016-SM1Q.2
- [18] TANABE, Setsuhisa. Rare-earth-doped glasses for fiber amplifiers in broadband telecommunication. *Comptes Rendus Chimie* [online]. 2002, **5**(12), 815-824 [cit. 2019-05-05]. DOI: 10.1016/S1631-0748(02)01449-2. ISSN 16310748. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1631074802014492>
- [19] PETERKO, Pavel, Pavel HONZÁTKO, Ivan KAŠÍK a Adéla Michková MICHKOVÁ. *Vláknové lasery* [online]. Praha: Academia, 2014 [cit. 2019-05-05]. 11710. ISBN 0009-0700. Dostupné z: https://www.ufe.cz/sites/default/files/peterka/fjfi/4_vlaknove_lasery_vkn.pdf

- [20] TAO, Guangming, Heike EBENDORFF-HEIDEPRIEM, Alexander M. STOLYAROV, Sylvain DANTO, John V. BADDING, Yoel FINK, John BALLATO a Ayman F. ABOURADDY. Infrared fibers. *Advances in Optics and Photonics* [online]. 2015, 7(2) [cit. 2019-05-05]. DOI: 10.1364/AOP.7.000379. ISSN 1943-8206. Dostupné z: www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=aop-7-2-379
- [21] HARRINGTON, James A. Infrared fiber optics. *OSA Handbook 3* [online]. 2001, 1-13 [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/8885/cd8784b627f0feb2e7b28579702375192656.pdf>