



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

---

Fakulta Elektrotechnická  
katedra mikroelektroniky

**Studium vlastností optických vláken s dotací ionty erbia**

Properties Study of the Optical Fibres Doped with Erbium Ions

Bakalářská práce

Marek Zikmund

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

---

**Praha 2021**





# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

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

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Studium vlastností optických vláken s dotací ionty erbia**

Název bakalářské práce anglicky:

**Properties Study of the Optical Fibers Doped with Erbium Ions**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s teoretickými principy optických vláknových vlnodů.
- 2) Seznamte se optickými vlákny dotovanými erbiem.
- 3) Seznamte se dostupnými možnostmi pro měření vlastností optických vláken a optických vláken s příměsí erbia.
- 4) Změřte optické vlastnosti dostupných optických vláken s dotací erbia.

Seznam doporučené literatury:

1. K. Novotný: Optická Komunikační Technika, skripta ČVUT 1998
2. Z. Mlejnek: Optické zesilovače, bakalářská práce VUT Brno 2008
3. M.J.F. Digonnet: Rare-earth-doped fiber lasers and amplifiers, Marcel Dekker Inc 2001

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: **18.09.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

Platnost zadání bakalářské práce: **19.02.2022**

\_\_\_\_\_  
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:**

Rád bych poděkoval panu vedoucímu práce doc. Ing. Václavu Prajzlerovi, Ph.D. za velkou ochotu při konzultacích a za cenné připomínky k práci.

## **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 ...

.....

Marek Zikmund

## Abstrakt

*Optická vlákna jsou v dnešních dobách rozšířeným způsobem přenosu informace v komunikační síti. Tato vlákna nahrazují metalické vedení kvůli větší přenosové rychlosti a nízkému elektromagnetickému rušení. Při komunikaci optickým signálem na delší vzdálenosti je třeba využít optický zesilovač pro znovunabytí utlumeného signálu. Optický zesilovač je možné realizovat více způsoby. Polovodičovým zesilovačem, Ramanovým zesilovačem a optickým vláknovým zesilovačem. Tato práce se zabývá studiem optických vláknových zesilovačů s dotací erbia, které dokáže nejlépe zesilovat signály na vlnových délkách okolo 1530 nm. Dále se zabývá jednotlivými metodami čerpání při různých vlnových délkách čerpacích laserů, kterými je možné dodat zesilovači energii. Práce se také zabývá realizací vláknových laserů pomocí erbiem dotovaného vlákna. S tímto dotovaným vláknem lze realizovat kruhový laser a laser s Braggovou mřížkou, která slouží jako polopropustné zrcadlo.*

**Klíčová slova:** *optické vlákno, optický vláknový zesilovač, erbium, vláknový laser.*

## Abstract

*Optical fibers are nowadays an expanded type for transmitting information in a communication network. Optical fibers replace metallic wires due to a higher baud rate and smaller electromagnetic noise. For transmission to longer distances, it needs to use an optical amplifier. An Optical amplifier can be realized as a semiconductor optical amplifier, a Raman amplifier, or as an optical fiber amplifier. This thesis deals with study of erbium doped optical fiber amplifiers, which has the best amplification potential at a wavelength around 1530 nm. This thesis also deals with different pumping methods at different wavelengths of pumping laser. With erbium doped fiber it can be realized a laser. It can be realized as a circle laser or laser with Bragg grating.*

**Key words:** *optical fiber, optical fiber amplifier, erbium, fiber laser*

## Seznam symbolů:

symbol	veličina	jednotka
$n_p$	index lomu pláště	[-]
$n_j$	index lomu jádra	[-]
$\theta_m$	úhel od kolmice rozhrní	[°]
$G$	zesílení	[dB]
$g$	měrné zesílení	[dB/m]
$L$	délka	[m]
$P_{in}$	vstupní výkon	[dBm]
$P_{out}$	výstupní výkon	[mW]
$P_{max}$	maximální výkon	[mW]
$\lambda$	vlnová délka	[nm]
$I_p$	prahový proud	[mA]



# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>Optické vláknové vlnovody</b>	<b>10</b>
<b>3</b>	<b>Optické vláknové zesilovače</b>	<b>14</b>
3.1	Optické vláknové zesilovače s dotací erbia . . . . .	15
3.2	Metody optického čerpání . . . . .	16
<b>4</b>	<b>Optické zesilovače v síti CESNET</b>	<b>18</b>
<b>5</b>	<b>Použité přístroje a vybavení</b>	<b>19</b>
5.1	Optické zdroje . . . . .	19
5.2	Měřicí technika . . . . .	20
5.3	Optický zesilovač I.D.I.L. . . . .	21
5.4	Spektrální analyzátor Yokogawa . . . . .	22
5.5	Optická vlákna s dotací erbia . . . . .	22
<b>6</b>	<b>Popis měřených experimentů</b>	<b>22</b>
6.1	Měření laserů . . . . .	22
6.2	Měření spektrální charakteristiky erbiem dotovaného vlákna . . . . .	23
6.3	Měření zesílení erbiem dotovaných vláken . . . . .	24
6.4	Měření Braggových mřížek . . . . .	26
6.5	Realizace vláknových laserů . . . . .	27
<b>7</b>	<b>Naměřené výsledky</b>	<b>28</b>
7.1	Měření optických výkonů laserů . . . . .	28
7.2	Měření spektrálních charakteristik optických vláken s dotací erbia . . . . .	30
7.3	Měření zesílení erbiem dotovaných vláken . . . . .	31
7.4	Měření parametrů Braggových mřížek . . . . .	42
7.5	Realizace vláknového laseru s erbiem dotovaným optickým vláknem . . . . .	44
<b>8</b>	<b>Závěr</b>	<b>48</b>

# 1 Úvod

Přenos optického signálu je realizován pomocí optických vláken. Optická vlákna začala nahrazovat metalické vedení z důvodu větší přenosové rychlosti a menším elektromagnetickým rušením. Využívá se jich jak na kratší, tak na delší vzdálenosti, kde se začíná projevovat útlum optického vlákna. Pro znovunabytí ztraceného výkonu, či jeho navýšení se využívá optických zesilovačů.

Optický zesilovač je možné realizovat více způsoby. Pomocí polovodičových prvků, které pro dodání energie zesilovači využívají elektrický proud. Dále je možné využít Ramanovy zesilovače a vláknové zesilovače, které využívají optický signál k načerpání potřebné energie do vlákna.

Optické vláknové zesilovače využívají dotací prvků do optického vlákna, aby zajistili přenos energie na komunikační signál. Pro různé vlnové délky komunikačního signálu využívají optické vláknové zesilovače dotací různých prvků. Tato práce se zabývá měřením vlastností optických vláknových zesilovačů s dotací vzácné zeminy erbia, určených pro zesilování optického signálu na vlnových délkách okolo 1530 nm. Tato vlákna využívají pro dosažení zesílení více technik optického čerpání na různých vlnových délkách. V této práci jsou uvedeny a porovnávány různé techniky čerpání při použití čerpacích laserů na různých vlnových délkách.

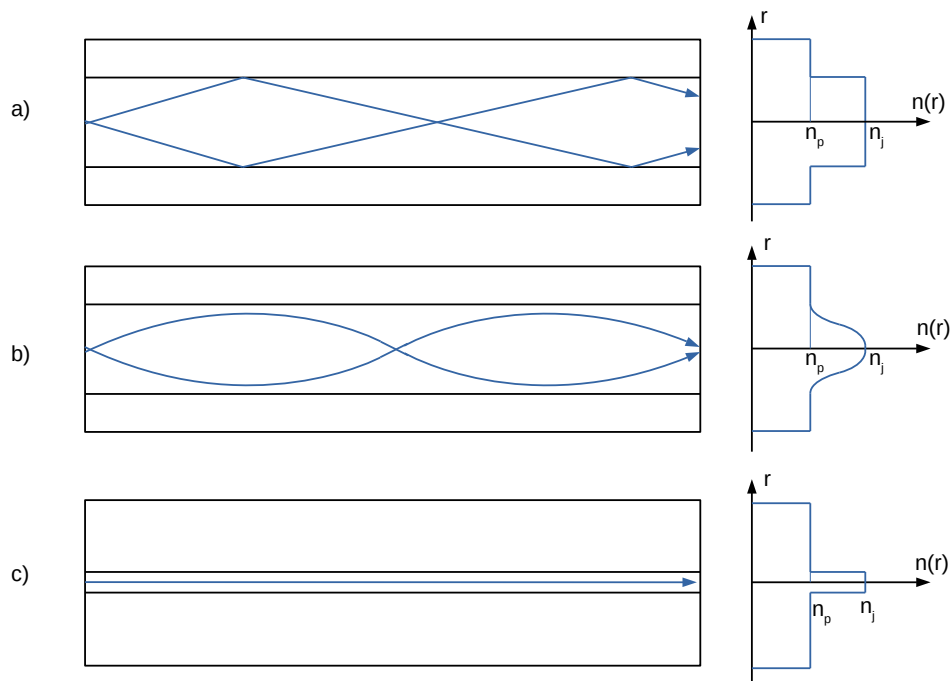
Tato práce se také zabývá možností, využít optické erbiem dotované vlákno jako aktivní prostředí pro vláknový laser. Tento laser lze zapojit dvěma způsoby. Realizoval jsem vláknové lasery s využitím erbiem dotovaného vlákna v zapojení s Braggovou mřížkou a také v zapojení do kruhového vláknového rezonátoru.

## 2 Optické vláknové vlnovody

Optický vláknový vlnovod je pasivní prvek, sloužící k přenosu optického signálu z vysílače k přijímači. Samotné vlákno je složeno ze dvou částí, optického jádra a optického pláště. Rozhraní těchto dvou materiálů slouží jako zrcadlo, od kterého se paprsek odráží a udržuje se v jádře vlnovodu.

Jádro a plášť jsou dvě dielektrická prostředí, které se liší indexy lomu, kde jádro vlákna je tvořeno materiálem s větším indexem lomu, než je index lomu pláště. Indexy lomu na rozhraní jádra a pláště mohou přecházet skokově, nebo postupnou změnou. Jedná se tak o vlákna se skokovým indexem lomu, nebo gradientním. Šíření optického paprsku optickým vláknem se liší. Při skokové změně se paprsek odrazí na rozhraní přímo. Vláknem s gradientním indexem lomu se optický paprsek odráží od rozhraní po parabolické křivce, jak je znázorněno na obrázku 1. Obrázek 1 ukazuje rozdíly šíření optického signálu ve vlákne vícevidovém se skokovým indexem lomu (obrázek 1 a)), vlákne vícevidovém s gradientním indexem lomu (obrázek 1 b)) a jednovidovým vláknem (obrázek 1 c)).

Samotný optický signál musí být zaveden do vlákna pod úhlem větším, než je mezní úhel. Tento mezní úhel je odvozen ze Snellova zákona, pod kterým je odraz přesně  $90^\circ$  od kolmice rozhraní. Tento parametr je označován jako úhlová akceptance [1].



Obrázek 1: Šíření optického signálu v optických vláknech. a) vícevidové vlákno se skokovým indexem lomu, b) vícevidové vlákno s gradientním indexem lomu, c) jednovidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu [2].

$$\theta_m > \arcsin\left(\frac{n_p}{n_j}\right). \quad (1)$$

Kde  $\theta_m$  je úhel od kolmice rozhraní jádra-plášť,  $n_p$  je index lomu pláště a  $n_j$  je index lomu jádra optického vláknového vlnovodu. Jak je patrné, index lomu jádra ( $n_j$ ) je vyšší než indexu lomu optického pláště ( $n_p$ ) [1].

Pokud je však úhel od směru osy vlákna větší, nedochází k totálnímu odrazu, ale pouze k lomu světla na rozhraní a část paprsku prostupuje pláštěm ven z optického vlákna a část paprsku se odráží zpět do jádra. Optický útlum je v takovém případě velice velký. Tento stav také nastává, když je optický vlnovod extrémně ohnut.

Zapříčiněno evanescentní vlnou, ve vláknech je určité množství energie rozloženo také do pláště vlnovodu. Evanescentní vlna vzniká při totálním odrazu na rozhraní jádro-plášť. Kvůli ní je zapotřebí realizovat plášť dostatečně velkých rozměrů, aby tato vlna neprostoupila skrz plášť a netvořila přílišný útlum vlákna. [2].

Optický útlum je definován, jako podíl výstupního výkonu ku vstupnímu výkonu signálu. Optický útlum vlákna je ovlivňován několika parametry. Na vlákno působí mnoho jevů jak materiálu, tak i výrobních vad. Jedním z faktorů vzniku útlumu je ohyb vlákna. Při výrobních vadách vznikají mikroohyby, kdy vlákno není dokonale rovné. Na těchto malých ohybech nemusí být splněna podmínka totálního odrazu. Tento stav také nastává, když je optický vlnovod extrémně ohnut, takzvaný makroohyb. Samotné dielektrické prostředí zároveň není dokonale čisté a krystalické a útlumy se tam tvoří díky rozptylu od sa-

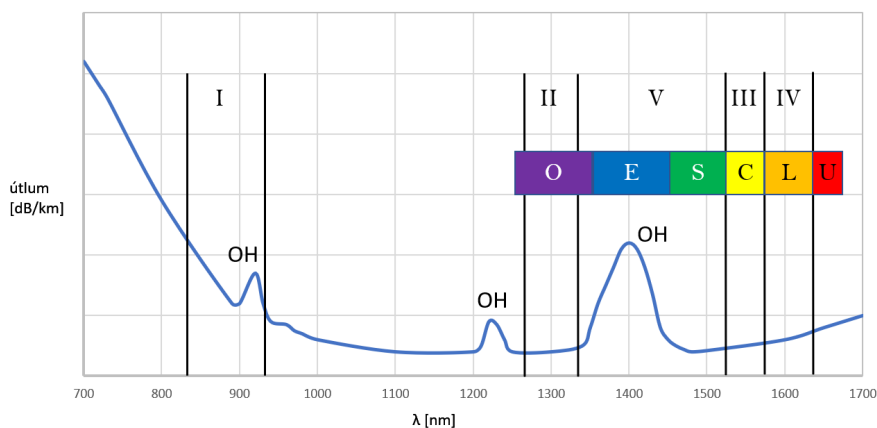
motné mřížky, nebo díky Rayleighova rozptylu. Ten nastává díky tepelným kmitům mřížky. Důležitým faktorem jsou také ionty OH které absorbují část energie. Moderními výrobními technikami je tendence tyto útlumy potlačovat [2].

Parametry optických vláken vycházejí z mezinárodně uznávaných standardů. Každé vlákno se dělí na typy, jakými jsou vlákna fyzicky uzpůsobena k přenosu signálu. Obecně jsou rozšířené jako označení OM (Optical Multi mode - optický multividový), pro multividová optická vlákna a OS (Optical Singlemode) pro jednovidová optická vlákna. Hlavním dělením je průměr jádra vláknového vlnovodu. Odlišné jsou také parametry útlumu. Standardy OM mají průměr jádra vlákna  $50\ \mu\text{m}$  a  $62,5\ \mu\text{m}$  a jsou určena pro vlnové délky  $850\ \text{nm}$  a  $1300\ \text{nm}$ . Přičemž průměr  $62,5\ \mu\text{m}$  je definován jen pro standard OM1, standardy OM2, OM3 a OM4 mají průměr jádra optického vlákna  $50\ \mu\text{m}$ . Ovšem jednotlivé standardy díky postupnému technologickému vývoji a potlačování útlumů OH, dokázaly zvýšit i šířku pásma přenosu na vlnové délce  $850\ \text{nm}$  a tím i zvýšit datový objem. Standard OM1 má šířku tohoto pásma  $200\ \text{MHz}\cdot\text{km}$ , OM2 zvyšuje tento parametr na  $500\ \text{MHz}\cdot\text{km}$ , OM3 má šířku pásma  $1500\ \text{MHz}\cdot\text{km}$ . Nevyšší parametr šířky pásma má OM4 s  $3500\ \text{MHz}\cdot\text{km}$  [3].

U jednovidového standardu OS je průměr jádra v řádech jednotek mikrometrů, nejčastěji se vyskytuje průměr jádra  $8 - 9\ \mu\text{m}$ . Průměr pláště je u všech telekomunikačních optických vláken stejný a činí  $125\ \mu\text{m}$ . Rozdíl mezi standardy OS1 a OS2 jsou v útlumech vlákna. Tyto útlumy jsou většinou definovány pro vlnové délky  $1310\ \text{nm}$  a  $1550\ \text{nm}$ . Standard OS1 má na obou těchto vlnových délkách útlum okolo  $1\ \text{dB/km}$ . Modernější standard OS2 nedosahuje takového útlumu vlákna. Útlum standardu OS2 se pohybuje okolo  $0,4\ \text{dB/km}$  [3].

## Přenosová Okna optického skleněného telekomunikačního vlákna

Přenosová okna pro optický signál jsou frekvenční pásma, na kterých jsou nejlepší parametry pro přenos signálu. Závisí na optickém útlumu křemenného vlákna na určitých vlnových délkách. Ty jsou ovlivňovány konstrukčními parametry, či absorpcí příměsí ionty OH, viz obrázek 2, kde je vidět útlumu křemenného vlákna ve spektru vlnových délek [4].



Obrázek 2: Spektrální útlumová charakteristika optického křemenného vlákna [4].

Jednotlivá okna se nacházejí:

- Okno I – V tomto okně jsou přenášeny mnohavidové signály. Z důvodu vyššího optického útlumu, který je okolo 2,5 dB/km, je možný realizovat pouze na kratších vzdálenostech. Nachází se mezi vlnovými délkami 840 nm a 940 nm.
- Okno II – Toto okno je v oblasti nejmenšího útlumu (útlum v řádu desetin dB na km délky). Využívá se pro vedení na dlouhé vzdálenosti. Nachází se mezi vlnovými délkami 1280 nm a 1335 nm.
- Okno III – Stejně jako u II. okna je využíván pro dlouhé přenosové trasy. Také je v tomto pásmu nejnižší útlum křemenného vlákna a to na vlnových délkách mezi 1530 nm a 1565 nm
- Okno IV – Nejvýše posazené okno co se týče operační frekvence. Je návazné na III okno, tedy se nachází mezi vlnovými délkami 1565 nm a 1625 nm
- Okno V – Je to spojka mezi II. a III. Spojením telekomunikačních oken se sousedními II. a III. kanálem vznikne široké okno mezi vlnovými délkami 1280 nm a 1565 nm. Nachází se mezi vlnovými délkami 1335 nm a 1530 nm. [4].

Celé spektrum však může být označováno a rozděleno podle jiného standardu a označováno písmennými zkratkami a i celá okna mají jiné rozsahy vlnových délek.

- Pásmo O (Original) překrývá okno II a je mezi vlnovými délkami 1260 nm a 1360 nm.
- Pásmo E (extended) mezi vlnovými délkami 1360 nm a 1460 nm, které překrývá jednu polovinu V. okna,
- Pásmo S (short) překrývá druhou polovinu V. okna a je na vlnových délkách 1460 nm až 1530 nm.
- Pásmo C (convetional) je ve spektru umístěno stejně jako okno III. To znamená že se nachází mezi vlnovými délkami 1530 nm a 1565 nm.
- Pásmo L (long) které se nachází v okně IV, tedy mezi vlnovými délkami 1565 nm a 1625 nm)
- Pásmo U (ultra long) je mezi vlnovými délkami 1625 nm a 1675 nm [4].

## **Vlnový multiplex WDM**

Přenos dat je realizován mezi jedním vysílačem a přijímačem na určité vlnové délce optického signálu. Optickým vláknem je možné přenášet několik komunikačních spojení najednou. Ke spojení jednotlivých komunikačních spojů do jednoho vláknového vlnovodu je využito vlnového multiplexu WDM (Wave Division Multiplex). Tato technologie vysílá do optického vlákna jeden optický signál, obsahující více vlnových délek. Každá vlnová délka pojme jeden komunikační kanál. Podle odstupů jednotlivých kanálů ve spektrální oblasti rozlišujeme typ provedení. Technologie WDM je rozdělen na WWDM (Wide WDM), CWDM (Coarse WDM) a DWDM (Dense WDM) [5].

Typ WWDM je starší technologie, využívající nejčastěji pouze čtyř kanálů v optických oknech I a II. Přičemž odstup jednotlivých kanálů ve spektrální rovině je větší než 20 nm. CWDM je technologie náročnější než WWDM. Ovšem umožňuje více kanálů pro komunikační spojení. Tato technologie využívá optická pásma O, E, S, C a L od vlnové délky 1270 nm až do 1610 nm. DWDM je technika nejnáročnější, která také dokáže zajistit kvalitu spoje při odstup jednotlivých kanálů ve spektrální oblasti pouze v desetínách nm (obvykle 0,8 nm). Kanály se nacházejí nejvíce v pásmech S, C a L, tedy v rozsahu mezi vlnovými délkami 1490 nm a 1620 nm [5].

### 3 Optické vláknové zesilovače

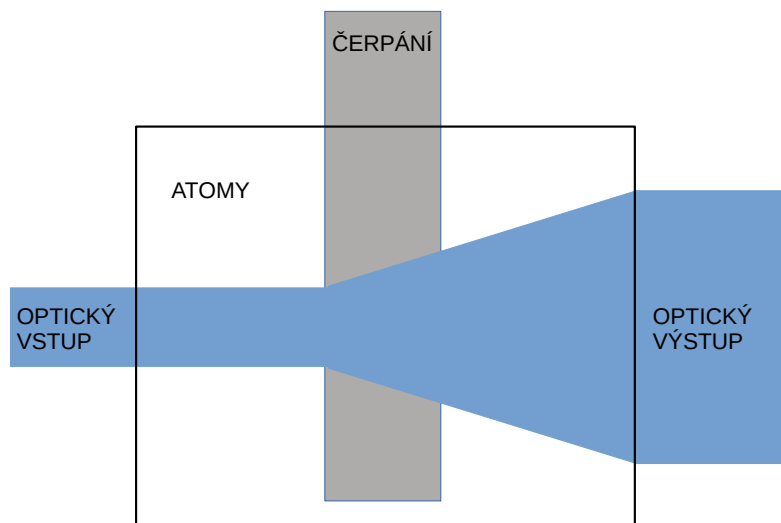
Pro zesílení optického signálu, který byl utlumen v důsledku přenosu na velkou vzdálenost, je nutné vyžít zesilovací prvek. Využívá se jich jednak na začátku trasy, kde plní funkci předzesílení výstupního signálu z komunikačního prvku, uprostřed trasy, aby mohl být prodloužen komunikační spoj, ale i u koncových přijímačů, kde zesilují výstupní signál, aby mohl být čitelný.

Zesílení signálu můžeme zajistit polovodičovými zesilovači, Rammanovými zesilovači, nebo optickými vláknovými zesilovači. Důležitý faktor těchto zesilovačů je fakt, že signál nemusí být konvertován na elektrický signál, aby byl zesílen, ale je zesilován samotný optický signál.

Optický zesilovač obecně pracuje na principu stimulované emise. V zesilovači je optickým, či elektrickým čerpáním absorbována energie a atomy se dostanou do excitovaného stavu. Elektrony v excitovaném stavu nabývají energie a přecházejí do vyšších energetických hladin. Fotony ze vstupního signálu, který chceme zesílit, interagují s elektrony ve vyšších vrstvách. Tyto elektrony padají zpět do předešlých hladin a uvolňují energii, jež je vyzářena v podobě fotonu. Tento foton má stejnou vlnovou délku, jako foton, který vybudil přechod z vyšších energetických hladin zpět. Tento princip je znázorněn na obrázku 3, který znázorňuje ovlivnění vstupního optického signálu čerpacím signálem [6].

Pro polovodičový zesilovač je čerpání realizováno elektrickým proudem. Ten je pulzně přiváděn do aktivní oblasti. Atomy v aktivní oblasti jsou tak excitovány elektrickou veličinou [7]. Rammanův zesilovač je postupem času více a více rozšířenější v optických komunikačních sítích. Na rozdíl od polovodičových zesilovačů je zde čerpání prováděno pomocí laseru spojeného s křemenným vláknem. Zesilovač pak využívá Rammanova rozptylu k zesílení vstupního signálu. Rammanův rozptyl je jev, kde čerpací optická vlna excituje molekuly  $SiO_2$  na vyšší energetické hladiny. Tato energie ovlivňuje a rozptyluje se do optické vlny, procházející vláknem. Tímto způsobem lze zesilovat signály na vyšších vlnových délkách, než je vlnová délka čerpacího laseru [7].

Vlákná optických zesilovačů jsou dotována jiným prvkem ten způsobuje, že vlákno dokáže na jistých vlnových délkách zesilovat optický signál. Pokud jde o EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier - erbiem dotovaný vláknový zesilovač) je zesilovač dotovaný ionty vzácné zeminy erbia  $Er^{3+}$ , anebo Erbiem a Yterbiem ( $Er^{3+}/Yb^{3+}$ ). Ten pracuje v optických komunikačních pásmech III a IV. Jedná se o vlnové délky 1530 nm až 1625 nm. Největší zesílení se nachází na vlnové délce okolo 1530 nm, na které se nejčastěji využívá.



Obrázek 3: Znázornění principu optického zesilovače [6].

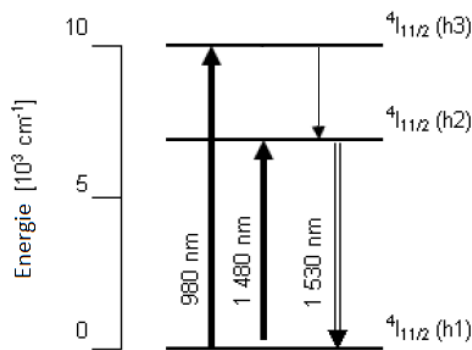
Možné jsou i jiné dotace vlákn. Existují například zesilovače s dotací praseodymiem, které (PDFA) pracují na vlnových délkách 1280 nm až 1320 nm. Je to v optickém okně II. Existuje i dotace thuliem do fluoridového vlákna (TDFA) operující na 1460 nm až 1490 nm. Ani PDFA, ani TDFA však nefungují v křemenných vláknech [7].

### 3.1 Optické vláknové zesilovače s dotací erbia

Optický vláknový zesilovač je několikametrové křemenné optické vlákno s dotací jiného prvku. V případě EDFA se jedná o ionty erbia ( $Er^{3+}$ ), či vzácných zemin erbia a ytterbia ( $Er^{3+}/Yb^{3+}$ ). Tyto sloučeniny způsobují, že je možné, aby byl optický signál zesilován. Signál je nejlépe zesilován ve III. optickém okně na vlnových délkách okolo 1530 nm [7].

Erbium je prvek, který byl objeven již v 19. století ve švédském městě Ytterby, řazený mezi kovy. V periodické tabulce prvků jej nalezneme s atomovým číslem 68. Normální konfigurace elektronového obalu je  $[Xe]4f^{12}6s^2$ . Erbium je však často ve stavu trojmocném, což je pro využití ve vláknovém zesilovači velmi chtěné. Trojmocný iont erbia, tedy  $Er^{3+}$  pak existuje v konfiguraci  $4f^{11}$  [8].

Elektrony v atomu erbia se nachází v energetických hladinách, viz obrázek 4. Přechody mezi hladinami jsou možné jen v případě, že změníme elektronu energii. Přechod směrem do vyšších energetických hladin je umožněn díky absorpci energie. Emise znamená přechod elektronu na nižší energetickou hladinu. V erbiu je rozdíl energetických hladin  ${}^4I_{13/2}$  (hladina  $h_2$ ) a  ${}^4I_{15/2}$  (hladina  $h_1$ ) odpovídající energii fotonu s vlnovou délkou okolo 1530 nm. Rozdíl mezi hladinou  ${}^4I_{11/2}$  (hladina  $h_3$ ) a hladinou  $h_1$  odpovídá fotonu s vlnovou délkou 980 nm [8].



Obrázek 4: Energetické hladiny iontů erbia [7].

### Optické čerpání

Dodání energie do vláknového zesilovače je realizované generováním záření pomocí laseru. Při přímém čerpání je nejčastěji použita vlnová délka okolo 1480 nm. Tato energie fotonů tohoto signálu je dostatečná pro přesun z hladiny  $h_1$  do  $h_2$ . Při nepřímém čerpání je používána vlnová délka 980 nm. To excituje elektron až do hladiny  $h_3$ . V této hladině však nedokáže elektron vydržet dlouho, pouze několik mikrosekund. Následně sestoupí do hladiny  $h_2$ . Elektron je na hladině  $h_2$  schopen setrvat až okolo 10 ms [7].

### Stimulovaná emise

Emise nastává ve chvíli, kdy se elektron již nedokáže udržet na té dané hladině a ztrácí energii přechodem na nižší energetickou hladinu. Se ztrátou energie se emituje foton. Tento jev se také nazývá fluorescence. Přechod však může být způsoben i stimulací energií fotonu zesilovaného signálu, pak se jedná o stimulovanou emisi. Vyzářený foton ze stimulované emise má stejnou vlnovou délku a stejný fázový posuv jako má foton, který tuto emisi vyvolal. Takzvané koherentní záření. Díky rozdílu mezi hladinami  $h_2$  a  $h_1$  má erbiový zesilovač největší potenciál zesilovat vstupní signál vlnové délky v okolí 1530 nm [7].

## 3.2 Metody optického čerpání

Čerpání do vláknového zesilovače je možné provádět v obou směrech vlákna. Čerpací laser můžeme umístit v trase před erbiové vlákno, pak se jedná o dopředné čerpání, za erbiem dotované vlákno, jde pak o zpětné čerpání, nebo spojením metod vzejde čerpání obousměrné (viz obrázek 5). Výkon čerpacího laseru ovlivňuje zesílení celého optického zesilovače.

Při čerpání se vyskytuje také nežádoucí šum ASE (Amplified Spontaneous Emission), který vzniká vyzářováním fotonů spontánní emisí a následným zesílením při průchodu vláknovým zesilovačem [9].



## Dopředné čerpání

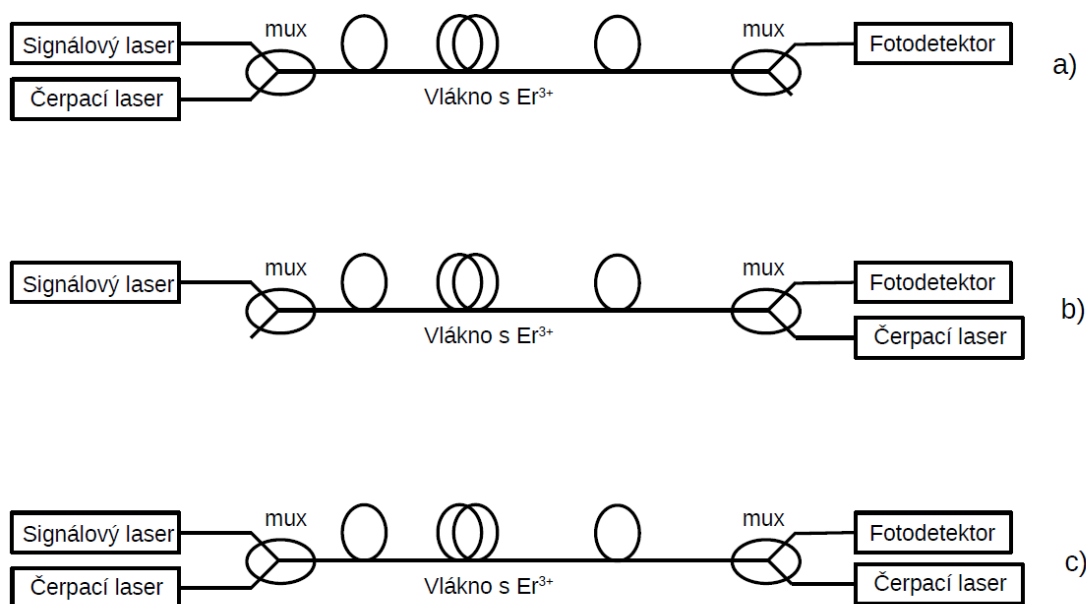
Při dopředném čerpání je signál z čerpacího laseru veden ve stejném směru, jako vstupní signál komunikační (viz obrázek 5 a)). Tento typ čerpání má menší zesílení komunikačního signálu, jelikož je energie absorbována na vstupu vlákna, kde je vstupní signál zesilován. Ovšem nízký je i výstupní šum. Naopak šum vstupní je podstatně větší [9].

## Zpětné čerpání

Směr čerpacího signálu je veden v opačném směru jako signál komunikační (viz obrázek 5 b)). Tato konfigurace má opačné vlastnosti, tedy vstupní ASE šum. Ovšem i výstupní šum je velký. Díky zpětnému čerpání je nejvíce energie absorbováno u výstupu vlákna, a tak je výstupní výkon větší než při dopředném čerpání [9].

## Obousměrné čerpání

Pro obousměrné čerpání jsou v optickém zesilovači dva čerpací signály směřovány v opačných směrech. Kombinuje tím metody dopředného a zpětného čerpání (viz obrázek 5 c)). Tímto sloučením dostáváme největší zesílení i nejvyšší výstupní výkon. Ovšem v této konfiguraci projevují více i šumové parametry na vstupu i na výstupu optického zesilovače [9].

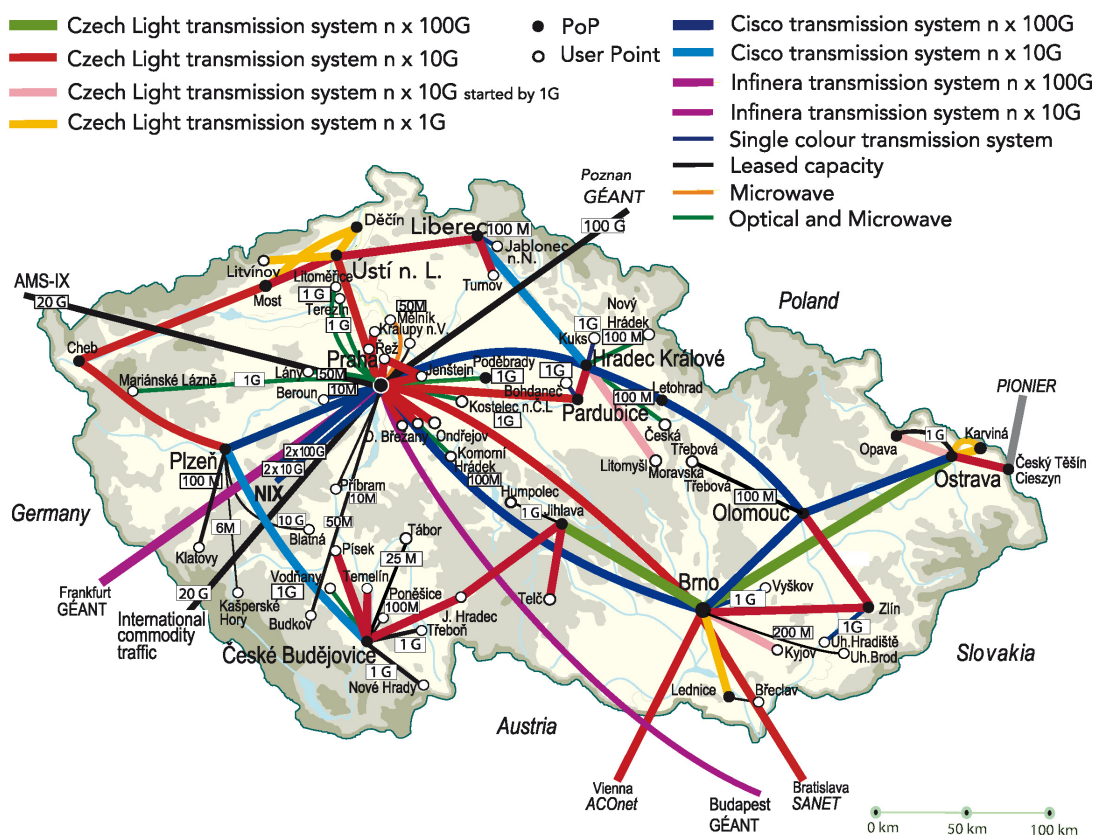


Obrázek 5: Schémata používaných optických čerpání, se signálovým laserem s pracovní vlnovou délkou 1550 nm a čerpacím laserem s pracovní vlnovou délkou 980 nm, nebo 1480 nm, a) dopředným čerpání, b) zpětným čerpání, c) obousměrným čerpání [9].

## 4 Optické zesilovače v síti CESNET

Optická komunikační síť CESNET2 (Czech Educational and Scientific NETwork) je síť v České republice (viz obrázek 6), která provozuje infrastrukturu pro vědecké, akademické a výzkumné účely. Tato síť, budována od roku 2005, kdy byl vybudován spoj mezi Prahou a Brnem, zajišťuje užití technologie DWDM, která díky desítkám přenosových kanálů dovoluje více rychlostních stupňů Ethernetu. Dovoluje rychlosti od 1 Gb/s do 100 Gb/s Ethernetu. Síť CESNET je spojena i se zahraničními sítěmi na Slovensku, v Rakousku, v Polsku i evropskou sítí GÉANT. Vedle sítě DWDM je také realizováno spojení „single colour“ i mikrovlnné spoje.

### CESNET2 Topology (June 2020)



Obrázek 6: Topologie sítě CESNET v České republice [10].

Systém DWDM zajišťuje několik systémů. Czech Light, Cisco a Infinera. Na několika trasách je využíván zesilovací prvek v podobě erbiem dotovaného vláknového zesilovače CLA (Czech Light Amplifier) typu PB01F, PB02F a DI01F. Typy zesilovačů CLA jsou určeny podle polohy jejich využití. PB01F a PB02F je využit jako předzesilovač, nebo jako zesilovač na konci trasy, DI01F je využíván zesilovač v prostředí trasy. Mimo tyto zesilovače využívá CESNET také zesilovače CLA BiDi. Jedná se o zesilovače EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier), kde čerpání zařizuje připojená laserová dioda, generující

optický výkon na vlnové délce 980 nm. Čerpací optický výkon je rozdělen do obou vstupů erbiem dotovaného vlákna. Zesílení těchto zesilovačů se pohybuje okolo 20 dB (viz [12]). Tyto lasery jsou zapojeny stejně, jako DI01F na trase, aby pomohly prodloužit vzdálenost komunikačního spoje [11].

Tyto zesilovače jsou umístěny například na trasách trase Brno-Olomouc-Ostrava, Praha-Hradec Králové, Letohrad-Olomouc, nebo Praha-Brno. Tyto trasy se jsou dlouhé stovky kilometrů a na trase se nachází jeden, nebo i více zesilovacích stanic. Nejdelší vzdálenost, na kterou optický zesilovač zajišťuje komunikační spoj je 99,5 km úsek z Mostiště do Brna na trase Praha-Brno [13].

## 5 Použité přístroje a vybavení

V této kapitole uvádím popis přístrojů, které jsem měl k dispozici při řešení bakalářské práce. Využíval jsem lasery a širokopásmového zdroje pro generování optického signálu. Pro detekování a vyhodnocení výstupního optického signálu jsem využil optických detektorů a fotometru.

### 5.1 Optické zdroje

Zdroje záření, které jsem k měření využil, byly lasery, pracující na vlnových délkách 980 nm a 1480 nm. Tyto lasery byly použity pro čerpání EDFA.

#### Laboratorní lasery

Tři laboratorní lasery od firmy Safibra:

- OFLS-6K PLM - pracovní vlnová délka je 976 nm. Tento laser má tři možné úrovně optického výkonu označené jako úrovně P0, P1, P2. Výkonové úrovně jsou možné programovat až do maximálního výkonu laseru, jenž činí 171 mW. Optický signál je vyveden do optického vlákna přes konektory FC/PC.
- OFLS-6 SLED - pracovní délka tohoto laseru je 1474 nm. Stejně jako u předešlého laseru jsou možné tři úrovně P0, P1, P2 s maximálním možným výkonem 14,4 mW. Konektor k tomuto laseru je typu FC/APC.
- Laser OFLS-5 DFB - pracovní délka je, stejně jako předchozí laser, na vlnové délce 1490 nm s výkonem 277  $\mu$ m. Konektory využívá FC/PC.

Poslední laboratorní laser PL-FP-1480-1-A81-PA na vlnové délce 1480 nm je řízen počítačem, kterým nastavujeme proud, a tím je řízen výkon optického laserového paprsku. Maximální nastavitelný optický výkon činí 400 mW. Spojen s vlákem je konektorem FC/APC [14].

## Širokopásmový zdroj

Thorlabs SLS201L/S – Tento zdroj pracuje v širokém pásmu vlnových délek a to od 360 nm až do 2600 nm. Výkon jednotlivých vlnových délek však není konstantní. Nejvyšší výkon vyzařuje na 1000 nm. Celkový vyzařovaný optický výkon je 10 mW. Spojen s vláknem je konektorem FC/PC [15].

## 5.2 Měřicí technika

Pro měření výstupního výkonu jsem využil optické detektory. Pro následné vyhodnocení pak bylo využito osciloskopů a fotometrů. Detektor převede optický signál na elektrickou veličinu. Elektrická veličina je pak zobrazována na zobrazovací jednotce osciloskopu či fotometru.

### Fotometr

Thorlabs PM100D - je digitální konzole, která vyhodnocuje vstupní signál z připojené sondy. Zobrazení hodnot a ovládání je na čtyř palcové obrazovce. Ovšem lze také přenést data přes porty USB 2.0. Výkon se neměří přímo tímto přístrojem. Měření je prováděno přes sondy stejné firmy (uvedené níže), který převede optický výkon na elektrickou veličinu. Ta je posléze vyhodnocována tímto přístrojem [16].

### Optické sondy

Thorlabs S155C - tento InGaAS detektor pracuje na vlnových délkách od 800 nm do 1700 nm. Tento detektor dokáže změřit hodnoty od 1 nW do 20 mW. Tento detektor je možné spojit s vláknem přes konektor FC/PC [18].

Thorlabs S302C - pyroelektrický detektor výkonu, pracující na vlnových délkách 190 nm až 2500 nm. Optický signál, který lze detekovat tímto přístrojem musí být v rozmezí výkonů od 100  $\mu$ W do 2 W. Stejně jako u předchozího detektoru je možné spojit tento přístroj s vláknem přes konektor FC/PC [17].

### Osciloskop

RIGOL DS1102E - Je dvoukanálový digitální osciloskop. Maximální možná frekvence je 100 MHz. Maximálním možným vstupním napětím je 40 V, při střídavém napětí je maximální napětí 40 V špička-špička. Minimální nastavitelné rozlišení je 25 mV/dílek. A maximální je 20 V/dílek. Tento přístroj umožňuje ovládání skrze obrazovou jednotku o úhlopříčce 5,6 palců. Komunikaci s externím zařízením zajišťuje přes sériovou sběrnici RS232, nebo přes USB. Lze tedy připojit externí úložný prostor k uložení měřených průběhů [19].

### 5.3 Optický zesilovač I.D.I.L.

Pro měření experimentů jsem využil modulu od firmy I.D.I.L. Toto je modul k širokému využití při studiu vláknových zesilovačů i jiných prvků využívaných v optické komunikaci.

Tento modul obsahuje [20]:

- 50 m dlouhé erbiem dotované vlákno se zesílením více než 30 dB,
- čerpací laser na vlnové délce 980 nm s maximálním výkonem 80 mW konstantního záření,
- DFB laserovou diodu na vlnové délce 1550 nm o maximálním výkonu 2 mW konstantního záření,
- zlaté zrcadlo,
- coupler 90/10,
- 2× 980/1550 nm multiplexory,
- attenuátory 5, 10 a 20 dB
- optický izolátor,
- Vláknovou Bragovu mřížku,
- optický detektor s fotodiodou InGaAs fotodiodou,
- E2000/APC patchcordy.

Výukový modul je možný využít do čtyř zapojení. Optický vláknový zesilovač využívá lasery o vlnových délkách 980 i 1550 nm, jenž jsou spojeny WDM (Wave Division Multiplex) do erbiem dopovaného vlákna. Na výstupu z vlákna WDM rozděljuje jednotlivé vlnové délky na dva výstupy, z nichž lze měřit jak zesílený signál pro přenos dat, tak lze měřit i čerpací signál. Tímto zapojením lze měřit velikost zesílení, saturace a spektrum zesilovaného signálu.

Zapojení pro vyvolání super fluorescentní zdroje záření využívá na jednom konci zlaté zrcadlové zakončení. Zpětná vazba, nezbytná pro vyvolání záření je realizována erbiem dotovaným vlákem. V tomto zapojení lze měřit výstupní výkon, zbytkový výkon čerpacího signálu [21].

Z těchto komponentů je možné realizovat lineární i kruhové lasery. Lineární laser využívá dotované vlákno jako aktivního prostředí, pozlaceného zrcadla a Bragovy mřížky. Kruhový laser využívá dotované vlákno, které je díky optickým vláknům a vazebných členů spojeno do kruhu. Pomocí multiplexorů lze sledovat výstupy u obou typů laseru. Z obou výstupů lze získat výstupní výkon, spektrum signálu, měření závislosti s čerpacím signálem [20].

Optický detektor, jenž je umístěn v modulu I.D.I.L., jsem využil pro měření výstupního zesíleného signálu optickým zesilovačem. Tento detektor je InGaAs polovodičová dioda, ke které je v modulu připojen zesilovač. Tedy převedený elektrický signál je zesilován.

## 5.4 Spektrální analyzátor Yokogawa

Optický spektrální analyzátor (OSA - Optical Spectral Analyser) slouží k měření vstupního optického signálu a jeho jednotlivé frekvenční složky. Rozložením podle vlnové délky je analyzován výkon pro jednotlivé vlnové délky. Procházením všech vlnových délek je pak určeno výkonové spektrum optického paprsku.

Optický spektrální analyzátor od firmy Yokogawa model AQ6370D, jenž jsem využil při měření experimentů, má možnost měřit rozsah vlnových délek od 600 do 1700 nm. Rozlišovací schopnost vlnových délek tohoto analyzátoru je od 0,02 do 2 nm s přesností 0,01 nm. V rovině výkonu dokáže detekovat nejmenší hodnoty na hladině -90 dBm. Největší přijatý výkon může být až na úrovni 20 dBm.

Analyzátor má jeden optický konektor pro vstup a jeden kalibrační výstup. Zobrazení hodnot zajišťuje 10,4-ti palcový monitor s vysokým rozlišením. Toto zařízení je však také možné ovládat myší a klávesnicí pomocí USB portů, nebo lze těmito porty přenášet změřená data na externí úložiště. Data z analyzátoru je možné přenášet i Ethernetovým portem či po sériové lince [22].

## 5.5 Optická vlákna s dotací erbia

Mimo vlákna z modulu I.D.I.L., jenž jsem užíval při experimentech, jsem měl také k dispozici čtyři vlákna od výrobce Fibercore. Dvě 10 m dlouhá vlákna a dvě 3 m dlouhá vlákna s dotací erbia typu I-4(980/125)HC [23]. Tato erbiem dotovaná vlákna jsou určena pro zesilování signálů v optickém pásmu C. Absorpce dotovaného vlákna uváděná výrobcem je v rozmezí 7,7 dB/m a 9,4 dB/m, jenž je určená pro vlnovou délku 1531 nm. Útlum erbiem dotovaného vlákna je menší než 10 dB/km. Tato vlákna jsou spojena s ostatními prvky pomocí konektorů FC/APC.

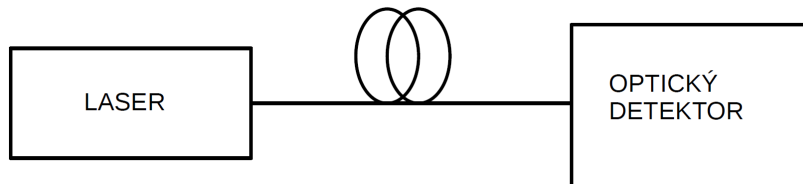
# 6 Popis měřených experimentů

Při experimentech jsem měřil výkony jednotlivých laserů, využitých posléze k měření zesílení erbiem dotovaných vláknových zesilovačů. Zesílení jsem měřil na vláknech délek 3, 10 a 50 m. Následně jsem z dvou desetimetrových vláken složil pomocí spojky FC/APC erbiem dotované vlákno o délce 20 m. Tato vlákna jsem připojil také na spektrální analyzátor a změřil jsem spektrum vlnových délek pro zjištění vlnových délek, na kterých tato vlákna čerpají. Následně jsem tyto vlákna využil k realizaci vláknových laserů. Jednak s Braggovou mřížkou, a jednak jako kruhový laser.

## 6.1 Měření laserů

Lasery v modulu I.D.I.L. a laboratorní laser s vlnovou délkou 1480 nm jsou napájeny elektrickým proudem. Tento proud je možné nastavovat pomocí potenciometru. Připojením laserů na optický detektor lze změřit závislost optického výkonu na proudu dodávanému laseru.

Pro měření laserů jsem zapojil lasery k optickému detektoru podle obrázku 7, kde je schéma zapojení pro měření laserů. Pro toto měření jsem využil 2 m dlouhé jednovidové optické vlákno a optického detektoru jenž je připojen na fotometr, viz obrázek 7. Následně jsem nastavoval velikosti vstupního elektrického proudu a měřil optický výkon laseru.



Obrázek 7: Schéma zapojení pro měření optického výkonu zdroje světla [21].

Měřené lasery jsem měřil dvěma fotodetektory. Lasery, které svým maximálním optickým výkonem přesahují hodnotu 20 mW, jsem změřil pomocí detektoru Thorlabs S302C, který je dimenzován na výkon 2 W. Lasery s nižším maximálním výkonem jsem měřil pomocí fotodetektoru Thorlabs S155C.

## 6.2 Měření spektrální charakteristiky erbiem dotovaného vlákna

Zapojením erbiem dotovaného vlákna, širokopásmového zdroje a spektrálního analyzátoru podle obrázku 8, lze při čerpání do vlákna zkoumat na výstupu optický výkon. Ze známého výkonu zdroje, určeného pomocí referenčního měření, jsem určoval množství výkonu absorbovaného v samotném vlákne. Ze vztahu výkonů (vstupního a výstupního) jsem měřil optický útlum vlákna v závislosti na vlnové délce.



Obrázek 8: Schéma zapojení pro měření spektrální charakteristiky dotovaných vláken [21].

Pro měření jsem využil širokopásmový zdroj Thorlabs SLS201L/S. Ten byl nejdříve připojen ke křemennému vláknu, které sloužilo jako reference pro změření vstupního výkonu. Spektrální analyzátor vykreslil charakteristiku výkonu závislého na vlnové délce a to ve spektrálním rozsahu 600 nm až 1700 nm. Následně jsem křemenné vlákno vyjmul a nahradil erbiem dotovaným vláknem a měření jsem zopakoval. Měření jsem prováděl na čtyřech různě dlouhých vláknech s délkou 3 m, 10 m a 50 m. Také jsem toto měření prováděl na vlákně dlouhém 20 m, jenž jsem složil ze dvou 10 m vláken pomocí konektorů FC/APC.

### 6.3 Měření zesílení erbiem dotovaných vláken

Hlavní parametr optického vláknového zesilovače je zesílení, které jsem měřil při nižších výkonech signálového laseru. Následně jsem při konstantním čerpacím výkonu proměřoval závislost zesílení vlákna na vstupním optickém signálu. Tyto závislosti jsem proměřoval pro tři úrovně čerpacího výkonu 20, 40 a 72 mW.

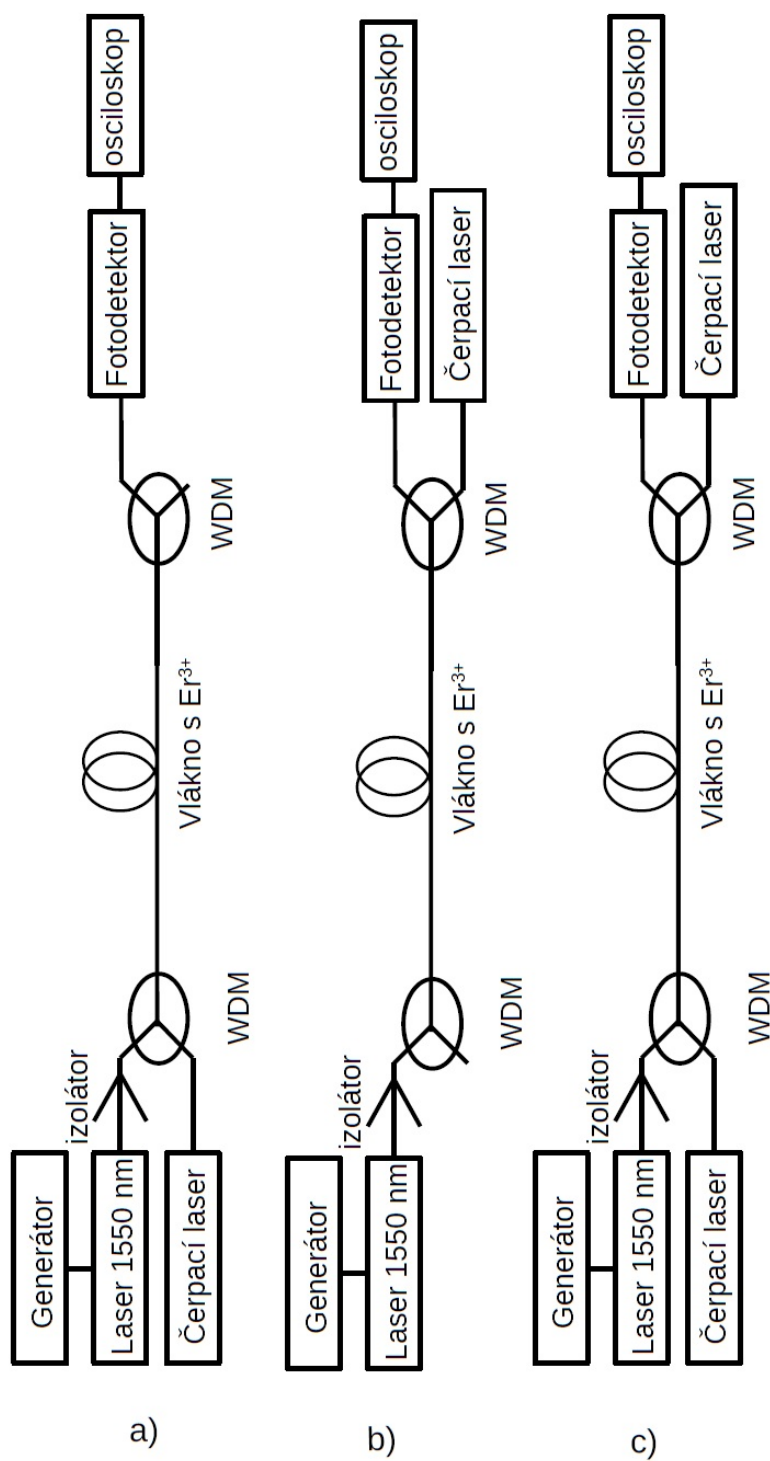
Optický vláknový zesilovač operuje se dvěma signály. Čerpací signál dodává potřebnou energii vláknu, které tuto energii využije k zesílení signálu, určeného pro komunikaci. Oba signály jsou přivedeny do erbiem dotovaného vlákna současně pomocí multiplexoru, který spojí oba signály do jednoho. Na výstupu demultiplexor tyto dva signály rozděljuje pro následnou analýzu signálu. Pro měření zesílení vlákna jsem použil čerpání se signálem na dvou vlnových délkách, 980 nm a 1480 nm. Čerpací signál byl přiváděn dopředným čerpáním, tedy stejným směrem jako vstupní signál. Následně byl tento čerpací signál přiveden z opačné strany pro měření zesílení pro čerpání zpětné. Při posledním obousměrném čerpání byly zapojeny lasery na vlnových délkách 980 nm i 1480 nm. Laser na vlnové délce 980 nm byl připojen na vstup a laser na vlnové délce 1480 nm na výstup.

Pro dopředné čerpání jsem nejdříve připojil vlákno k laseru čerpacímu na vlnové délce 980 nm, laseru signálovému na vlnové délce 1550 nm a detektoru podle obrázku 9 a). Pro zpětné čerpání jsem využil schématu zapojení podle obrázku 9 b). Při měření s kombinací čerpací na vlnových délkách 980 nm a 1480 nm jsem využil schéma z obrázku 9 c). Zesílení jsem měřil na třech výkonových hladinách čerpání. Nastavené optické výkony čerpacího laseru byly 20 mW, 40 mW a 72 mW konstantního záření. Signálový laser byl přepnut do pulzního režimu řízený externím generátorem obdélníkového signálu se střídou 50 %. Pro čerpání na vlnové délce 1480 nm, jsem ponechal stejné zapojení, jen jsem nahradil multiplexory kompatibilní s vlnovou délkou 980 nm za multiplexory operující se signály na vlnové délce 1480 nm a 1550 nm.

Pro detekování výstupního signálu jsem využil detektor zabudovaný v modulu I.D.I.L., jenž převádí optický výkon na elektrické veličinu napětí, které jsem pak měřil osciloskopem, kde bylo zobrazeno výstupní napětí z detektoru v závislosti na čase. Připojením fotodetektoru s fotometrem přes křemenná vlákna na tento signálový laser jsem změřil střední hodnotu optického výkonu signálu na vlnové délce 1550 nm. Následně toto měření sloužilo k převodu výstupního napětí z detektoru na hodnotu optického výkonu.

Pro každé nastavení konfigurace čerpání a pro všechna měřená vlákna jsem změřil pět výkonů vstupního signálu. Vstupnímu signálu byly nastaveny střední hodnoty -29,2 dB, -22,7 dB, -17,4 dB, -15,9 dB, a -15,4 dB. Při spojení laserů s erbiem dotovaným vláknem a fotodetektorem jsem následně na fotodetektoru změřil výstupní výkon. Postupně jsem takto změřil různé délky erbiem dotovaných vláken, jimiž byly optická vlákna o délce 3 m, 10 m a 50 m (v modulu I.D.I.L.). Následně jsem sestavil a proměřil vlákno o délce 20 m složené ze dvou 10 metrových optických vláken s dotací  $Er^{3+}$  spojených konektorem FC/APC.



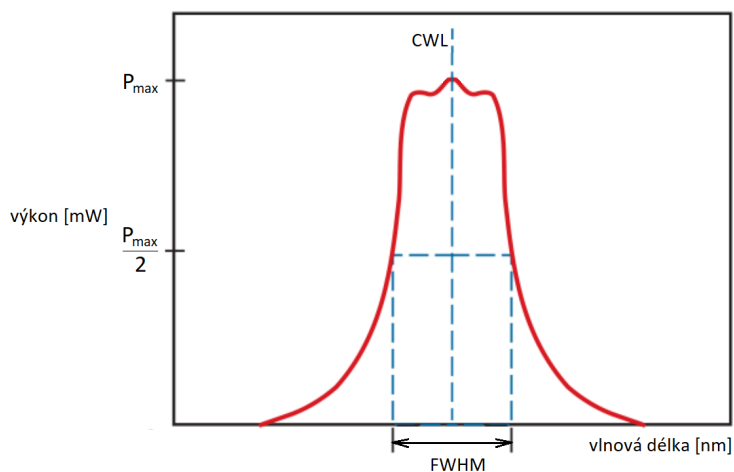


Obrázek 9: Schéma zapojení pro měření vláknového zesilovače a) dopředné čerpání, b) zpětné čerpání a c) obousměrné čerpání [21].

## 6.4 Měření Braggových mřížek

Braggova mřížka je prvek, který pracuje na bázi filtru. Jedná se o difrakční strukturu ve vlákne, kterou prostupuje optický paprsek. Celá struktura má periodicky se opakující změny indexu lomu. Tyto změny indexu lomu interagují se vstupním paprskem a jeho vlnovými délkami. Vzdálenost jednotlivých přechodů od sebe určuje, s jakou vlnovou délkou interaguje. Tato vlnová délka je odražena zpět, ostatní spektrální složky projdou mřížkou dále. Vláknová Braggova mřížka má celou strukturu umístěnou v jádře vlákna [24].

Braggova mřížka je určena několika parametry. Vlnovou délkou, na které Braggova mřížka nejvíce odráží optický paprsek, neboli maximální odražený výkon. Ten určuje parametr CWL (Central Wave Length – střední vlnová délka). Parametr FWHM (Full Width Half Maximum) je parametr, který určuje šířku spektra odrazu, který poklesne o polovinu výkonu od maximálního odraženého výkonu [25]. Parametry centrální vlnové délky (CWL) a šířkou spektrální čáry (FWHM) jsou znázorněny na obrázku 10.

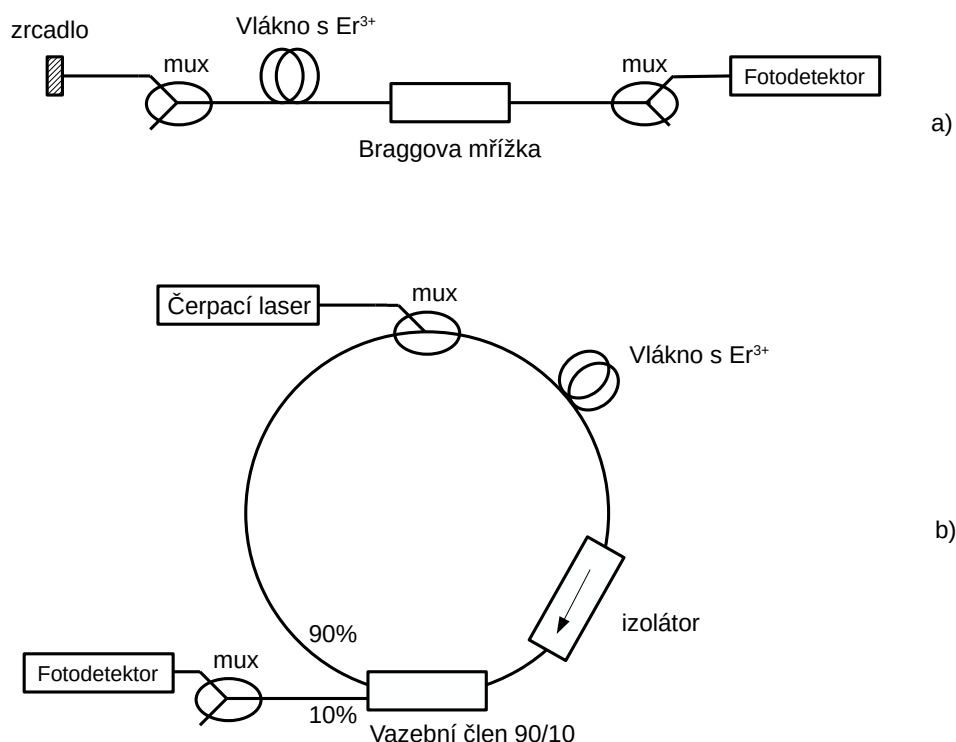


Obrázek 10: Znázornění parametrů centrální vlnové délky (CWL) a šířka spektrální čáry (FWHM) [26].

Vlastnosti Braggovy mřížky jsem změřil pomocí širokopásmového zdroje Thorlab SLS201 L/S, který byl připojen na Braggovu mřížku a spektrálního analyzátoru YOKOGAWA. Při realizaci vláknového laseru bylo k dispozici pět mřížek. Jedna mřížka, jež je integrována v modulu I.D.I.L., s centrální vlnovou délkou 1553 nm a čtyři vlákna od firmy NETWORK Group s.r.o. s centrálními vlnovými délkami 1535, 1539, 1545, 1550 nm. Na spektrálním analyzátoru jsem měřil spektrum přeneseného optického signálu skrz mřížky.

## 6.5 Realizace vláknových laserů

Vláknový laser lze zapojit dvěma různými způsoby. Zapojením erbiem dotovaného vlákna s Braggovou mřížkou a odrazovou plochu vznikne vláknový laser (Obrázek 11 a)). Také erbiem dotované vlákno může být připojeno s vazebním členem do kruhového laseru (obrázek 11 b)). Sledoval jsem čtyři parametry. Pracovní vlnová délka, parametr FWHM, maximální výkon, a prahový proud.



Obrázek 11: Zapojení erbiového laseru. a) zapojení s Braggovou mřížkou, b) kruhové zapojení [21].

Pro určení prahového proudu jsem změřil závislost výstupního optického výkonu na vstupním elektrickém proudu. Jako čerpací laser pro obě vlákna (10 metrů i 50 metrů) jsem použil laser z modulu I.D.I.L., který pracuje na vlnové délce 980 nm. Zde je vstupní proud řízen potenciometrem do maximálního proudu 155,7 mA. Z tohoto měření jsem také určil maximální optický výkon vláknového laseru.

Následně jsem zapojil laser ke spektrálnímu analyzátoru a změřil spektrální charakteristiku. Spektrální charakteristika ukazuje podstatné parametry laseru jako pracovní vlnovou délku, na které vláknový laser pracuje a šířku spektrální čáry, jenž je definována mezi polovičními výkony od maxima (FWHM) a výkon laseru. Následně byly porovnány parametry obou délek a obou typů sestavených laserů.

## 7 Naměřené výsledky

### 7.1 Měření optických výkonů laserů

Lasery jsou definovány následujícími parametry. Maximálním výkonem, prahovým proudem, pracovní vlnovou délkou, kterou vyzařuje a šířkou spektrální čáry. Šířku spektrální čáry označuje parametr FWHM (Full Width Half Maximum), který je určen jako šířka mezi vlnovými délkami, kde je výkon poloviční od maximálního výkonu.

Prahový proud je definovaný bod v charakteristice laseru, kde je dodaný elektrický proud dostatečně velký, aby v laseru začala stimulovaná emise. Při stimulované emisi je závislost optického výkonu na vstupním elektrickém proudu lineární. Tuto lineární závislost jsem popsal lineární rovnicí. Lineární popis závislosti vyzářeného výkonu jednotlivých laserů na vstupním proudu jsem získal metodou nejmenších čtverců z naměřených dat. Po získání lineární rovnice závislosti optického proudu na elektrickém výkonu:

$$P = AI + b. \quad (2)$$

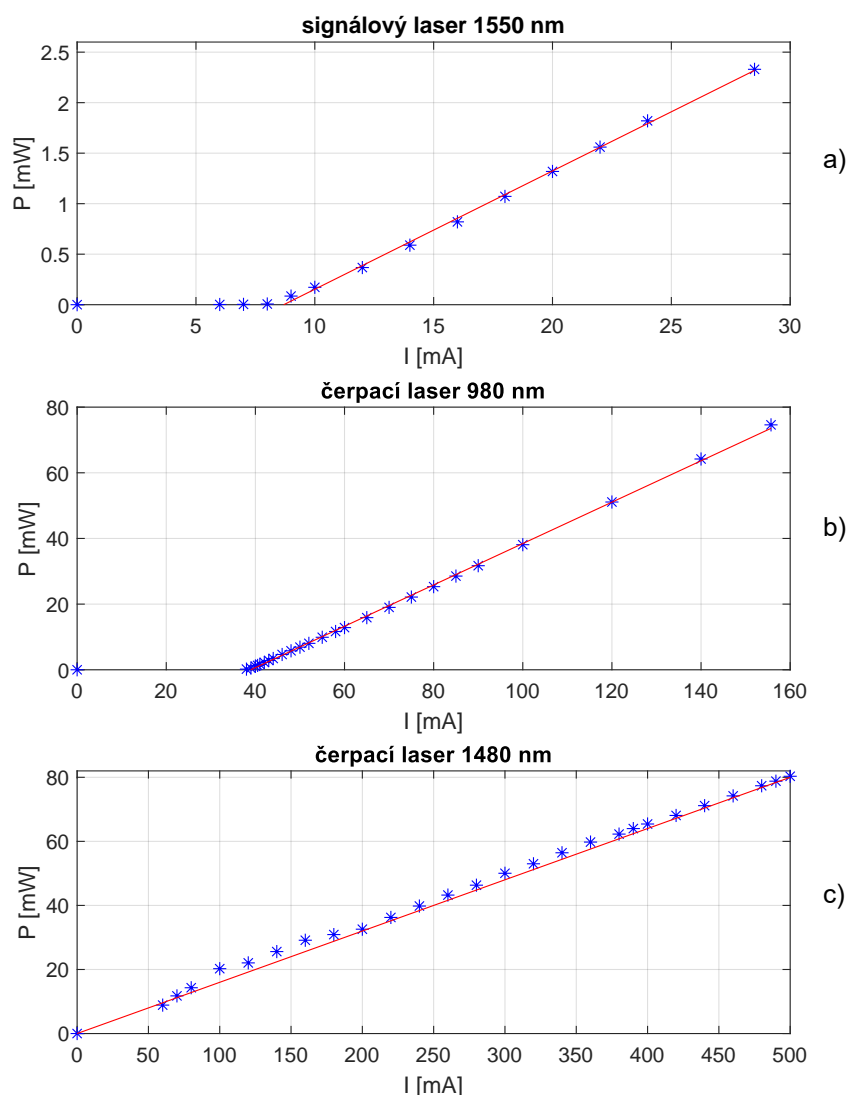
Kde  $P$  je výkon v [mW],  $I$  je vstupní proud v [mA] a  $A$  a  $b$  jsou konstanty, definující tuto přímku. Jsem určil prahový proud z rovnice přímky jako bod, kde je  $P = 0$ .

Parametry lineární rovnice  $A$  a  $b$  definující aktivní oblast závislosti optického výkonu na vstupním elektrickém proudu laserů, jsou uvedeny v tabulce 1. Stejně jako parametry maximálního výkonu ( $P_{max}$ ) a prahového proudu ( $I_p$ ).

Tabulka 1: Parametry rovnice, popisující závislost optického výkonu na čerpacím elektrickém proudu laserů, a určené parametry prahového proudu  $I_p$  a maximálního měřeného optického výkonu  $P_{max}$ .

Vlnová délka [nm]	A	b	Prahový proud $I_p$ [mA]	Maximální výkon $P_{max}$ [mW]
1550	0,12	-1,01	7,58	2,33
980	0,63	-24,55	38,96	74,6
1480	0,16	0	–	80

Z tabulky 1 je vidět že laser, generující signál na vlnové délce 1550 nm, má nejmenší maximální výkon a to 2,1 mW při konstantním záření. Tento laser je využit jako signálový laser pro experiment měření zesílení erbiem dotovaných vláken. Charakteristika tohoto laseru je znázorněna na obrázku 12 a). Dva další lasery, generující signál na vlnových délkách 980 nm a 1480 nm, dokáží generovat optický výkon i v řádech desítek mW. Laser, generující optický signál na vlnové délce 1480 nm je připojen a řízen počítačem, kde jsem v počítačovém programu nastavoval čerpací elektrický proud do laseru.

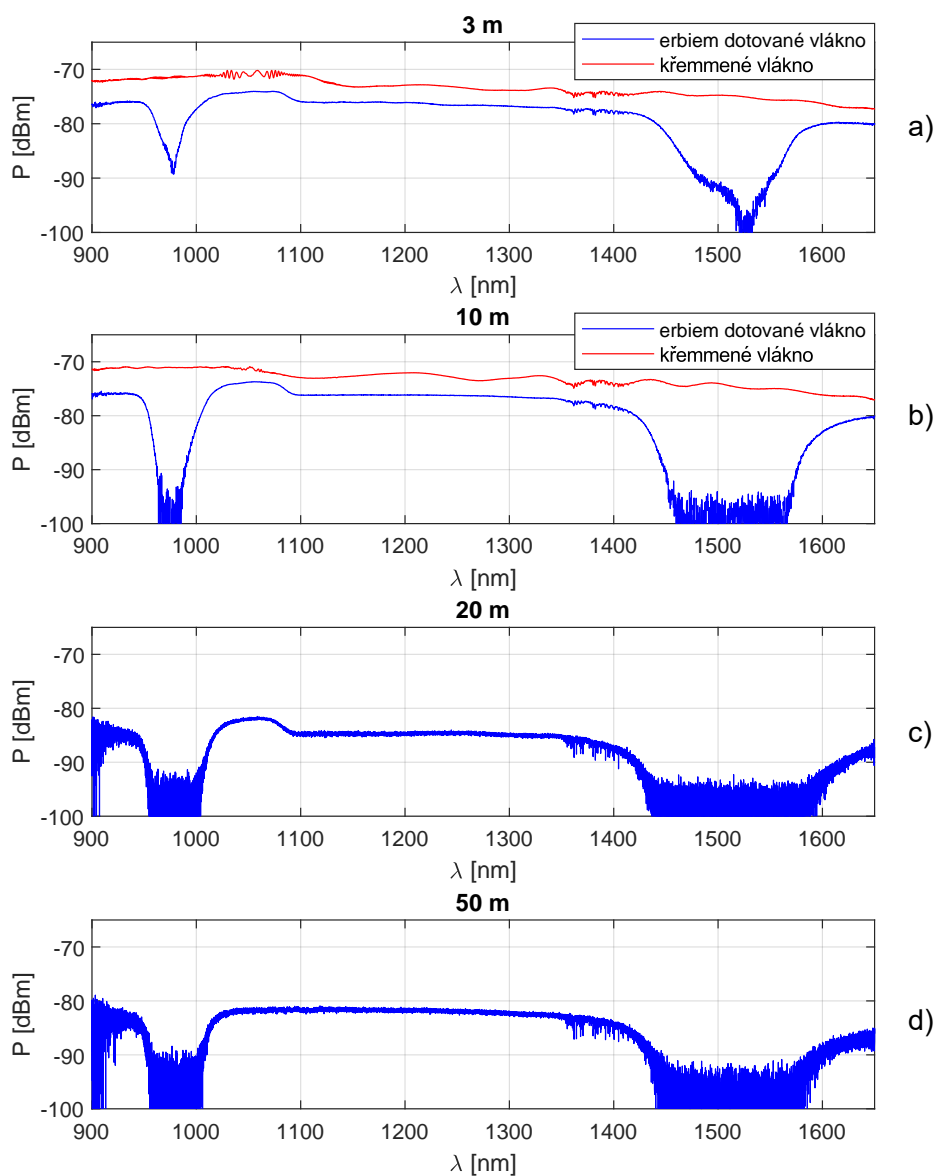


Obrázek 12: Závislost výkonu laserů na čerpacím elektrickém proudu. a) signálový laser na vlnové délce 1550 nm, b) čerpací laser na vlnové délce 980 nm, c) čerpací laser na vlnové délce 1480 nm.

Obrázek 12 ukazuje změřené charakteristiky výkonů laserů závislých na dodaném elektrickém proudu třech laserů s vlnovou délkou 1550 nm (obrázek 12 a) a 980 nm (obrázek 12 b)). Bodový graf ukazuje naměřenou charakteristiku laserů, která je proložena přímkou, vzešlou z popisu aktivní oblasti laseru. V bodě, kde přímka protíná nulový výkon, se nachází prahový proud daného laseru označen v grafu jako  $I_p$ . Čerpací laser na vlnové délce 1480 nm (obrázek 12 c)) je připojen a řízen počítačem, kde jsem v programu nastavoval čerpací elektrický proud do laseru. U tohoto laseru nelze určit prahový proud.

## 7.2 Měření spektrálních charakteristik optických vláken s dotací erbia

Ionty vzácné zeminy erbia ovlivňují přenosovou spektrální charakteristiku. Na určitých vlnových délkách se energie absorbuje ve vlákně a excituje ionty erbia do vyšších energetických hladin. Tyto vlnové délky odpovídají energetické vzdálenosti mezi jednotlivými hladinami. Provedením měření na spektrálním analyzátoru jsem získal obraz přenosu, či absorbované energie v průřezu spektra vlnových délek. Výsledek měření pomocí spektrálního analyzátoru je uveden na obrázku 13.



Obrázek 13: Spektrální charakteristiky vláken dotovaných  $Er^{3+}$ , a) 3 m dlouhé, b) 10 m dlouhé, c) 20 m dlouhé a d) 50 m dlouhé erbiem dotované vlákno.

Na obrázku 13 a) je vidět spektrální charakteristika přenosu erbiem dotovaným vláknem 3 m dlouhého vlákna v porovnání s referenčním křemenným optickým vláknem stejné délky, obrázek 13 b) ukazuje charakteristiku pro 10 m dlouhé vlákno v porovnání s referenčním křemenným optickým vláknem stejné délky. Na obrázku obrázek 13 c) vidět spektrální charakteristika vlákna 20 m ( $2 \times 10$  m) a obrázek 13 d) ukazuje charakteristiku 50 m dlouhého vlákna.

Obrázky 13 a), b), c) a d) ukazují dvě oblasti na vlnových délkách okolo 980 nm a 1530 nm. Porovnáním se změřenými spektry s referenčními křemennými vlákny lze určit i výkony absorbované vláknem. Oblast na vlnových délkách okolo 980 nm je ze spektrálního hlediska mnohem užší, než oblast na vlnových délkách kolem 1550 nm. Druhá oblast čerpání začíná na vlnové délce 1460 nm a končí okolo vlnové délky 1560 nm. Tyto oblasti jsou způsobeny dotací vzácné zeminy erbia do optického vlákna. Energie fotonů na vlnových délkách odpovídají rozdílu mezi energetickými hladinami iontu erbia.

Na vlnových délkách okolo 1530 nm nelze množství absorbované energie s přesností určit ovšem z grafů je patrné, že činí více jak 20 dB, a to i pro 3 metrové vlákno. Pro erbiem dotované vlákno 3 metry dlouhé (obrázek 13 a)) je v oblasti okolo vlnových délek vidět maximální načerpaný výkon 17 dB.

### 7.3 Měření zesílení erbiem dotovaných vláken

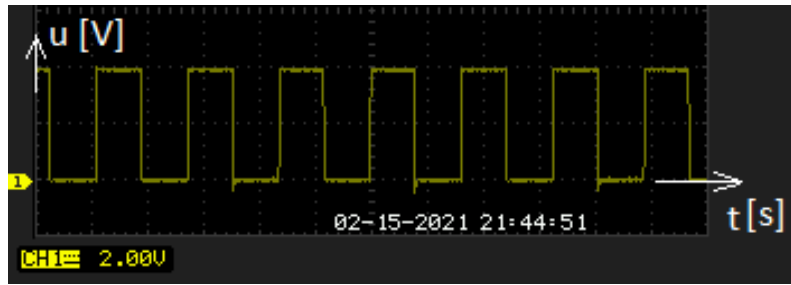
Zesílení vláknového zesilovače je závislé na výkonu čerpání, na délce optického vlákna s dotací  $Er^{3+}$  a také na výkonu vstupního optického signálu. Pro měření zesílení erbiem dotovaného vlákna jsem využil vstupní signál v pulsním režimu, se střídou 50 %. Tento signál zajišťoval laser na vlnové délce 1550 nm integrovaný v modulu I.D.I.L. Pro měření zesílení jsem zvolil hodnoty vstupního optického výkonu -29,2 dBm, -22,7 dBm, -17,4 dBm, -15,9 dBm, a -15,4 dBm. Pro realizaci čerpacího optického výkonu jsem si zvolil laser z modulu I.D.I.L. na vlnové délce 980 nm a externí čerpací laser na vlnové délce 1480 nm, jejichž charakteristiky jsem měřil v předešlém měření (kapitola 7.1). Pro čerpací lasery jsem si zvolil hodnoty optického výkonu 20 mW, 40 mW a 72 mW.

Výstupní optický signál jsem detekoval na detektoru, nacházejícím se v modulu I.D.I.L. Výstup tohoto detektoru je v jednotkách elektrického napětí a byl tedy připojen na osciloskop, aby bylo možné sledovat výstupní průběh signálu. Tento signál je znázorněn na obrázku 14, kde vidíme průběh výstupního napětí z detektoru v čase. Následně jsem změřil převodní konstantu mezi amplitudou napětí, odečtenou z osciloskopu a optickým výkonem, zachycený detektorem. Ze změřené charakteristiky jsem získal převodní konstantu  $39,31 \mu\text{W/mV}$ . Touto konstantou jsem převáděl odečtenou amplitudu elektrického napětí ového signálu na výstupní optický výkon.

Zesílení erbiem dotovaného vlákna je uváděno v decibelech. Pro výpočet jsem použil následující vztah:

$$G = 10 \log\left(\frac{P_{out}}{1 \text{ mW}}\right) - P_{in} \quad (3)$$

Kde  $G$  je zesílení v [dB],  $P_{out}$  je v [mW] a  $P_{in}$  je v [dBm].



Obrázek 14: Signál z osciloskopu vykreslující výstupní napětí z optického detektoru v průběhu času.

Postupně jsem proměřil zesílení a charakteristiku zesílení v závislosti na vstupním optickém výkonu na jednotlivých délkách erbiem dotovaného vlákna. Pro různé konfigurace čerpání, pro oba čerpací lasery a při různých výkonech optického čerpání.

### Čerpání na vlnové délce 1480 nm dopředným směrem

Pro čerpání na vlnové délce 1480 nm jsem realizoval dvě měření. Pro toto měření byl zapojen čerpací laser pro dopředné čerpání k vstupnímu signálu (viz kapitola 6.3). Pro sestavenou konfiguraci změřil a vypočítal hodnoty zesílení. Charakteristiky zesílení na vstupním optickém výkonu byly zakresleny do grafů, viz obrázek 15.

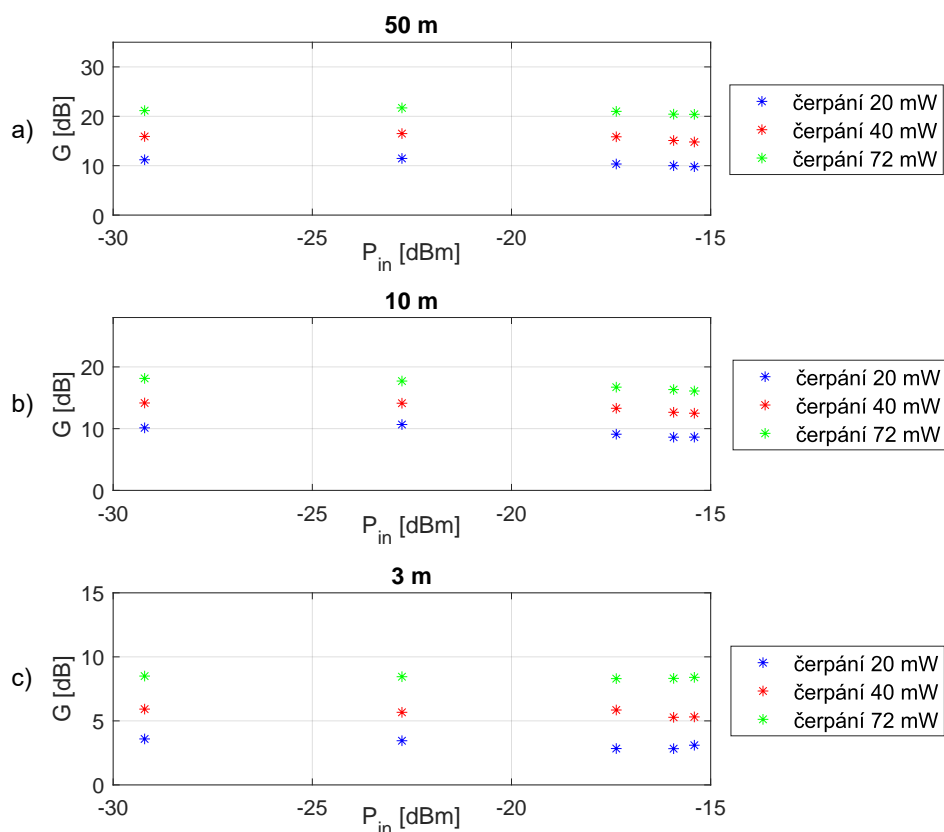
Na Obrázku 15 jsou znázorněny charakteristiky zesílení v závislosti na vstupním optickém výkonu pro čerpání na hladinách 20 mW, 40 mW a 72 mW. Nastavené vstupní hodnoty byly  $-29,2$  dBm,  $-22,7$  dBm,  $-17,4$  dBm,  $-15,9$  dBm, a  $-15,4$  dBm. Tento obrázek znázorňuje charakteristiku pro tři měřená vlákna délek 50 metrů (obrázek 15 a)), 10 metrů (obrázek 15 b)) a 3 metry dlouhé (obrázek 15 c)).

Hodnotu zesílení jsem určoval při hodnotě vstupního optického výkonu  $-22,7$  dBm. Hodnoty jednotlivých zesílení, při tomto vstupním výkonu jsou shrnuty v tabulce 2. Pro srovnání vlastností jednotlivých erbiem dotovaných optických vláken je převedeno zesílení na měrné zesílení. Tedy na zesílení vztahený na jeden metr erbiem dotovaného vlákna. Měrné zesílení je získáno ze zesílení podělením daného zesílení známou délkou dotovaného vlákna. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3.

Tabulka 2: Hodnoty zesílení při jednotlivých čerpacích výkonech na vlnové délce 1480 nm metodou dopředného čerpání pro všechna měřená vlákna.

		zesílení [dB]		
		50	10	3
délka vlákna [m]				
	20	11,7	10,7	3,5
čerpací výkon [mW]	40	16,5	14,1	5,7
	72	21,7	17,7	8,5





Obrázek 15: Závislosti zesílení na vstupním výkonu při jednotlivých výkonových hladinách dopředného čerpání na vlnové délce 1480 nm pro a) 50 m erbiem dotované vlákno, b) 10 m erbiem dotované vlákno, c) 3 m erbiem dotované vlákno, při nastavených vstupních výkonech  $-29,2$  dBm,  $-22,7$  dBm,  $-17,4$  dBm,  $-15,9$  dBm, a  $-15,4$  dBm.

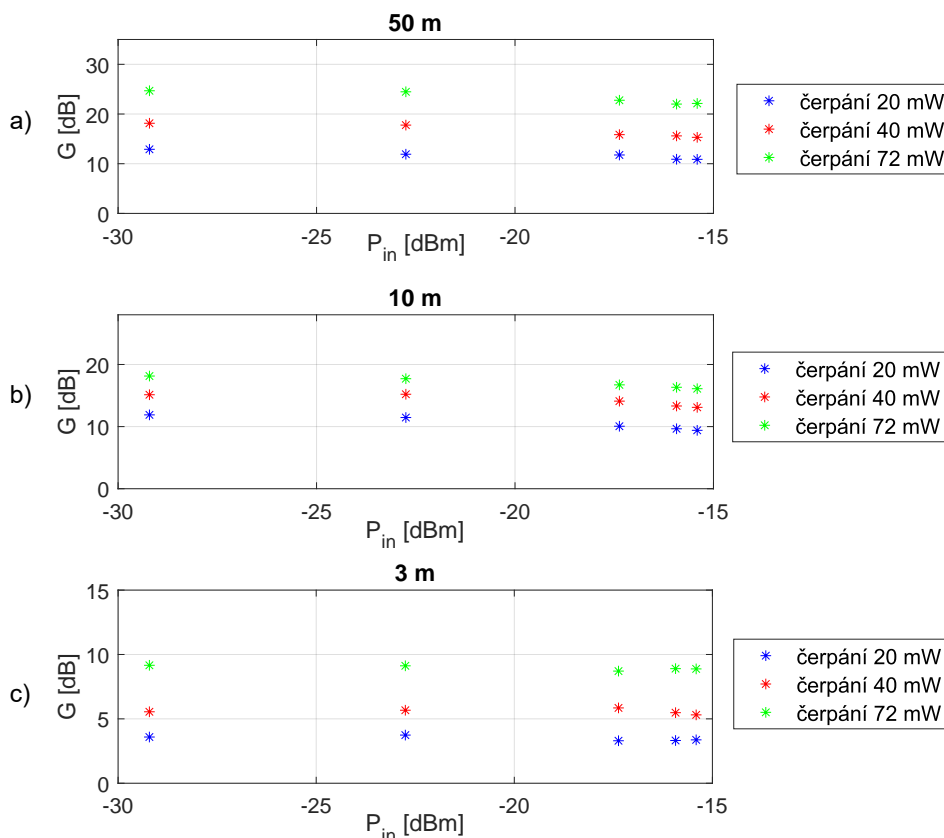
Tabulka 3: Hodnoty měrného zesílení při jednotlivých čerpacích výkonech na vlnové délce 1480 nm metodou dopředného čerpání pro všechna měřená vlákna.

		měrné zesílení [dB/m]		
		50	10	3
čerpací výkon [mW]	20	0,22	1,06	1,15
	40	0,32	1,41	1,89
	72	0,43	1,77	2,82

Z tabulek 2 a 3 vyplývá, že zesílení je největší při čerpání 72 mW do nejdelšího 50 m vlákna integrovaného v modulu I.D.I.L. a to 21,7 dB. Ovšem při srovnání zesílení na jeden metr je největší měrné zesílení u 3 metry dlouhého erbiem dotovaného vlákna. Hodnota největšího měrného zesílení je 2,82 dB/m. Z charakteristiky na obrázku 15 je patrné, že zesílení s měnícím se vstupním optickým výkonem zůstává konstantní.

## Čerpání na vlnové délce 1480 nm zpětným směrem

Stejný postup pro určení zesílení a měrného zesílení byl proveden i pro zpětné čerpání. Charakteristika zesílení v závislosti na vstupním výkonu při jednotlivých hladinách čerpání je znázorněna na obrázku 16. Obrázek 16 ukazuje charakteristiky zesílení v závislosti na vstupním optickém výkonu pro čerpání na hladinách 20, 40 a 72 mW. Tento obrázek znázorňuje charakteristiku pro tři měřená vlákna délek 50 metrů (obrázek 16 a)), 10 metrů (obrázek 16 b)) a 3 metry dlouhé (obrázek 16 c)).



Obrázek 16: Závislosti zesílení na vstupním výkonu při jednotlivých výkonových hladinách zpětného čerpání na vlnové délce 1480 nm a) 50 m erbiem dotované vlákno, b) 10 m erbiem dotované vlákno, c) 3 m erbiem dotované vlákno, při nastavených vstupních výkonech  $-29,2$  dBm,  $-22,7$  dBm,  $-17,4$  dBm,  $-15,9$  dBm, a  $-15,4$  dBm.

Následně jsem z naměřených dat určil zesílení jednotlivých vláken pro jednotlivé čerpací výkony a výsledek shrnul do tabulky 4. Stejně jako měrná zesílení, které jsou uvedeny v tabulce 5.

Při čerpání 72 mW bylo na 50 metrů dlouhém vlákne naměřeno největší zesílení 24,5 dB. Měrné zesílení je největší u vlákna nejkratšího 3 metry dlouhého vlákna. Největší měrné zesílení je 3,0 dB/m. V porovnání s dopředným čerpáním bylo zde u zpětného čerpání naměřeno vyšší zesílení. Pro čerpání o výkonu 72 mW do 50 m vlákna je rozdíl těchto zesílení 1,8 dB

Tabulka 4: Hodnoty zesílení při jednotlivých čerpacích výkonech na vlnové délce 1480 nm metodou zpětného čerpání pro všechna měřená vlákna.

		zesílení [dB]		
délka vlákna [m]		50	10	3
čerpací výkon [mW]	20	11,9	11,5	3,7
	40	17,7	15,2	5,6
	72	24,5	17,7	9,1

Tabulka 5: Hodnoty měrného zesílení při jednotlivých čerpacích výkonech na vlnové délce 1480 nm metodou zpětného čerpání pro všechna měřená vlákna.

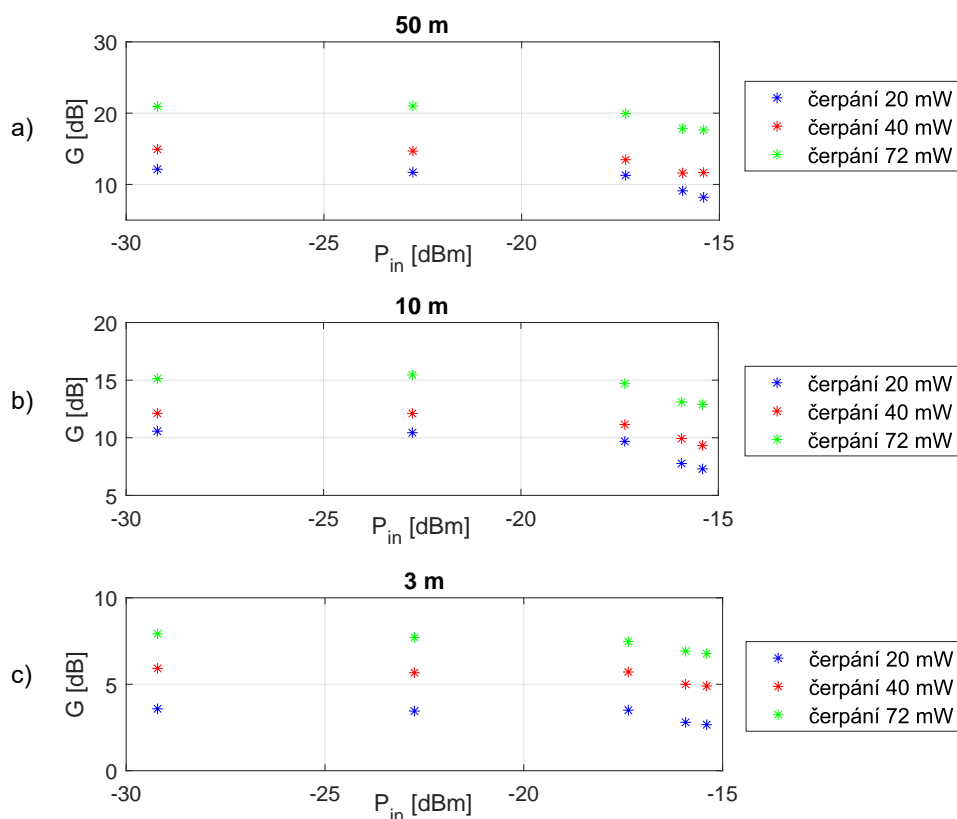
		měrné zesílení [dB/m]		
délka vlákna [m]		50	10	3
čerpací výkon [mW]	20	0,24	1,15	1,24
	40	0,35	1,52	1,89
	72	0,49	1,77	3,0

### Čerpání na vlnové délce 980 nm dopředným směrem

Měření s dopředným čerpáním na vlnové délce 980 nm bylo proměřeno na stejných výkonových hladinách, tedy 20, 40 a 72 mW. Vláknu 50 metrů dlouhé z modulu I.D.I.L., 10 metrů dlouhému a 3 metrovému vláknu byla změřena charakteristika závislosti zesílení na vstupním výkonu při jednotlivých čerpacích výkonech, tyto charakteristiky jsou znázorněny na obrázku 17. Na obrázku 17 a) je charakteristika zesílení pro vlákno dlouhé 50 m, na obrázku 17 b) je znázorněno zesílení pro vlákno 10 m dlouhé a obrázek 17 c) znázorňuje 3 m vlákno. Výsledek měření zesílení při vstupním výkonu -22,7 dBm a při všech třech čerpacích výkonech jsou uvedeny v tabulce 6. Zesílení na jednotku délky pro jednotlivé vlákna byla pak znázorněna v tabulce 7.

Tabulka 6: Hodnoty zesílení při jednotlivých čerpacích výkonech na vlnové délce 980 nm metodou dopředného čerpání pro všechna měřená vlákna.

		zesílení [dB]		
délka vlákna [m]		50	10	3
čerpací výkon [mW]	20	11,6	10,4	3,45
	40	14,7	12,11	5,7
	72	21,0	15,5	7,7



Obrázek 17: Závislosti zesílení na vstupním výkonu při jednotlivých výkonových hladinách dopředného čerpání na vlnové délce 980 nm pro a) 50 m erbiem dotované vlákno, b) 10 m erbiem dotované vlákno, c) 3 m erbiem dotované vlákno, při nastavených vstupních výkonech  $-29,2$  dBm,  $-22,7$  dBm,  $-17,4$  dBm,  $-15,9$  dBm, a  $-15,4$  dBm.

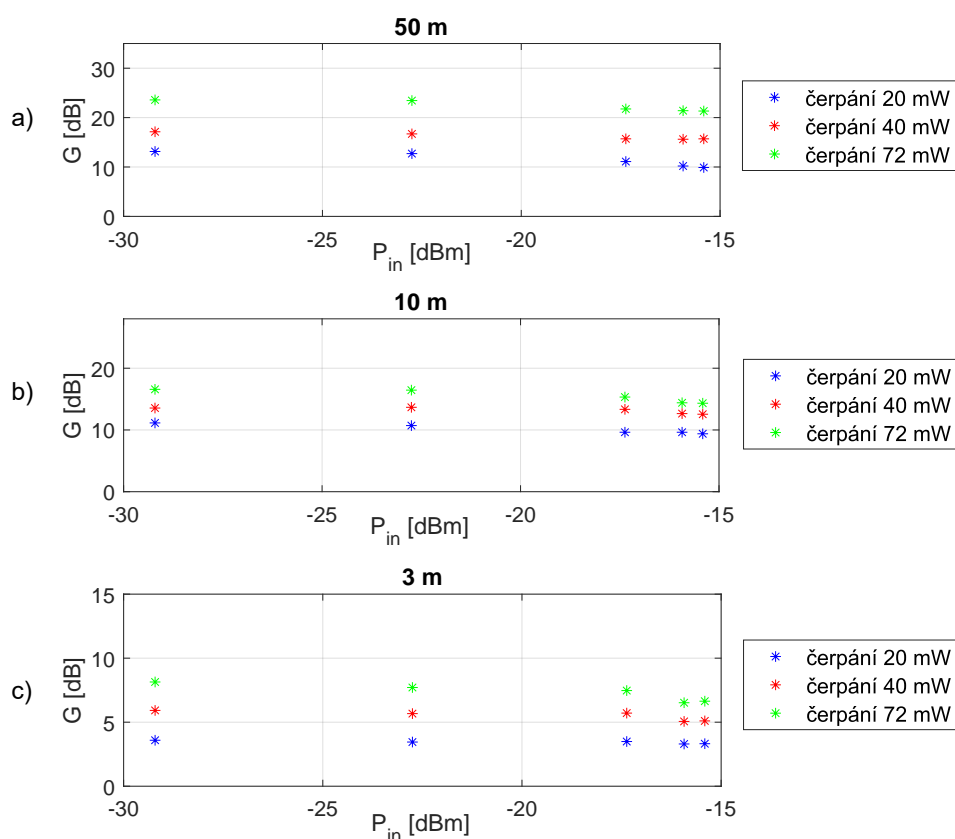
Tabulka 7: Hodnoty měrného zesílení při jednotlivých čerpacích výkonech na vlnové délce 980 nm metodou dopředného čerpání pro všechna měřená vlákna.

		měrné zesílení [dB/m]		
		50	10	3
čerpací výkon [mW]	20	0,22	1,04	1,15
	40	0,32	1,21	1,89
	72	0,42	1,55	2,57

Z naměřených hodnot je patrné, že nejvyššího zesílení dosáhlo vlákno 50 m dlouhé s hodnotou 21 dB, a to při čerpacím výkonu 72 mW. Největšího měrného zesílení však dosáhlo vlákno 3 m dlouhé s nejvyšší hodnotou 2,57 dB/m. V porovnání se stejným čerpáním na vlnové délce 1480 nm je při čerpání na 980 nm zesílení menší. Při čerpacím výkonu činí rozdíl zesílení 0,7 dB.

## Čerpání na vlnové délce 980 nm zpětným směrem

Pro zpětné čerpání bylo použito stejného postupu měření na stejných čerpacích výkonech jako v předchozích konfiguracích. Výsledky jsou uvedeny na obrázku 18, který ukazuje zesílení v závislosti na vstupním optickém výkonu při třech úrovních čerpacího výkonu 20, 40 a 72 mW. Obrázek 18 a) ukazuje charakteristiku pro vlákno 50 m, obrázek 18 b) znázorňuje charakteristiku pro vlákno 10 m dlouhé a obrázek 18 c) ukazuje závislost 3 m dlouhého vlákna. Jednotlivé zesílení je pak zapsané v tabulce 8. Změřené měrné zesílení je shrnuto v tabulce 9.



Obrázek 18: Závislosti zesílení na vstupním výkonu při jednotlivých výkonových hladinách zpětného čerpání na vlnové délce 980 nm pro a) 50 m erbiem dotované vlákno, b) 10 m erbiem dotované vlákno, c) 3 m erbiem dotované vlákna, při nastavených vstupních výkonech  $-29,2$  dBm,  $-22,7$  dBm,  $-17,4$  dBm,  $-15,9$  dBm, a  $-15,4$  dBm.

Pro zpětné zesílení na vlnové délce byl změřen výstupní výkon vyšší než u dopředného čerpání na stejné vlnové délce, tedy i zesílení bylo zjištěno větší. V porovnání se zpětným čerpáním na vlnové délce 1480 nm, je zde podobné zesílení, avšak trochu menší.

Tabulka 8: Hodnoty zesílení při jednotlivých čerpacích výkonech na vlnové délce 980 nm metodou zpětného čerpání.

		zesílení [dB]		
délka vlákna [m]		50	10	3
čerpací laser [mW]	20	12,9	10,7	3,5
	40	16,7	13,7	5,7
	72	23,5	16,5	7,7

Tabulka 9: Hodnoty měrného zesílení při jednotlivých čerpacích výkonech na vlnové délce 980 nm metodou zpětného čerpání.

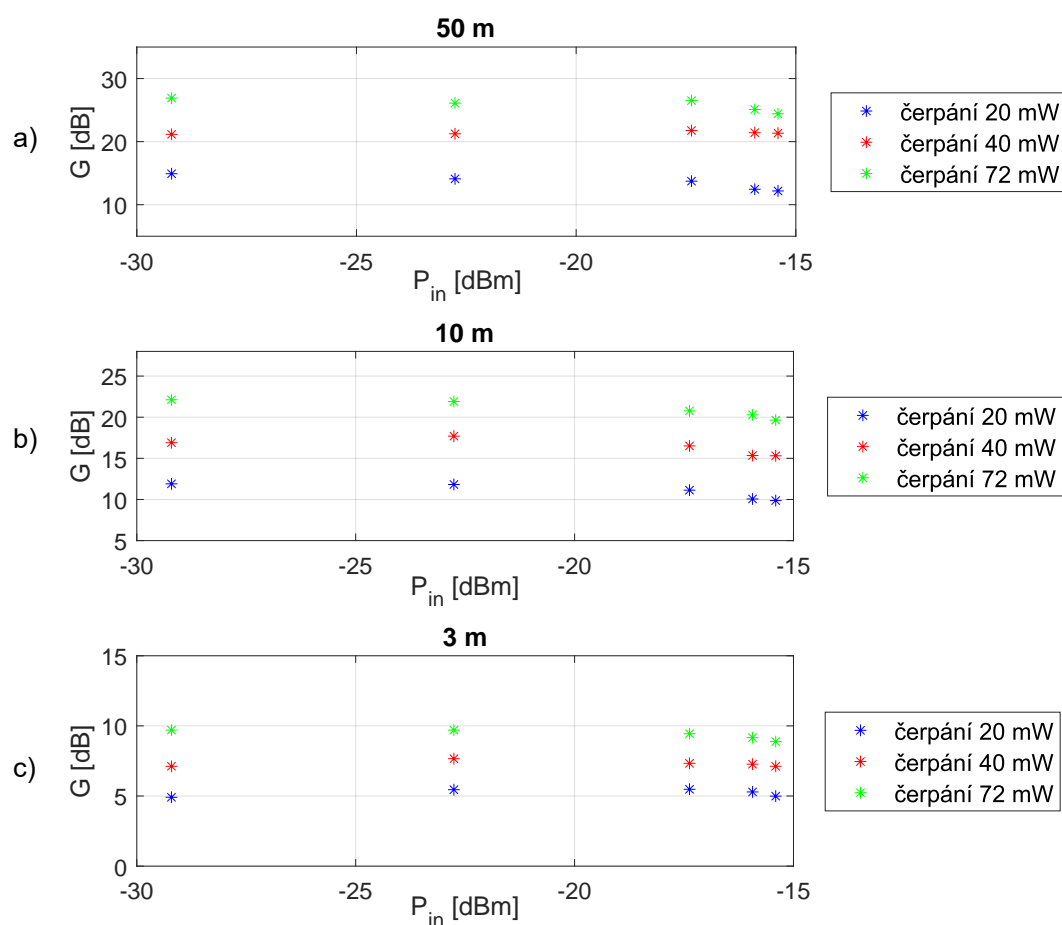
		měrné zesílení [dB/m]		
délka vlákna [m]		50	10	3
výkon čerpání [mW]	20	0,25	1,07	1,15
	40	0,33	1,37	1,89
	72	0,46	1,64	2,57

### Obousměrné čerpání s kombinací vlnových délek 980 nm a 1480 nm

Obousměrné čerpání s kombinací čerpacích laserů na vlnových délkách 980 nm a 1480 nm jsem změřil a výsledky zesílení pro jednotlivé čerpací výkony jsou uvedeny v tabulce 10. Převedené měrné zesílení je uvedeno v tabulce 11. Změřenou charakteristiku zesílení závislou na vstupním napětí jsem vynesl do obrázku 19. Tento obrázek ukazuje zesílení vláken 50 metrů (obrázek 19 a)), 10 metrů (obrázek 19 b)), 3 metry dlouhého (obrázek 19 c)) v závislosti na vstupním optickém výkonu při třech výkonech čerpání 20, 40 a 72 mW a pěti vstupních hodnotách výkonu  $-29,2$  dBm,  $-22,7$  dBm,  $-17,4$  dBm,  $-15,9$  dBm, a  $-15,4$  dBm. Při porovnání z předešlými konfiguracemi, zde bylo změřeno nejvyšší zesílení pro stejné parametry vstupního a čerpacího výkonu.

Tabulka 10: Hodnoty zesílení při jednotlivých čerpacích výkonech na vlnových délkách 980 nm a 1480 nm pro všechna měřená vlákna.

		zesílení [dB]		
délka vlákna [m]		50	10	3
čerpací výkon [mW]	20	14,1	11,8	5,4
	40	21,2	17,7	7,6
	72	26	21,9	9,7



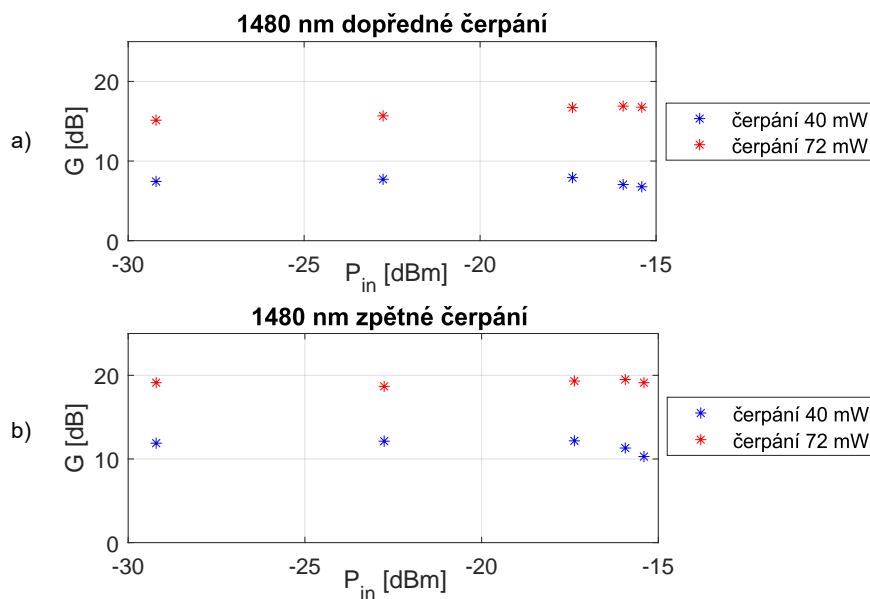
Obrázek 19: Závislosti zesílení na vstupním výkonu při jednotlivých výkonových hladinách obousměrného čerpání na vlnových délkách 980 nm a 1480 nm pro a) 50 m erbiem dotovaného vlákna, b) 3 m erbiem dotované vlákno, c) 10 m erbiem dotované vlákno, při nastavených vstupních výkonech  $-29,2$  dBm,  $-22,7$  dBm,  $-17,4$  dBm,  $-15,9$  dBm, a  $-15,4$  dBm.

Tabulka 11: Hodnoty zesílení na jednotku délky při jednotlivých čerpacích výkonech na vlnových délkách 980 nm a 1480 nm pro všechna měřená vlákna.

		měrné zesílení [dB/m]		
délka vlákna [m]		50	10	3
čerpací laser [mW]	20	0,28	1,18	1,81
	40	0,42	1,77	2,55
	72	0,52	2,19	3,23

## Měření zesílení 20 m dlouhé erbiem dotované vlákno

Při měření 20 m dlouhých vláken složených z dvou 10 metrových vláken, spojených konektory FC/APC, jsem nejdříve proměřoval charakteristiku zesílení na vstupním výkonu pro čerpací signál na vlnové délce 1480 nm. Stejně, jako u ostatních vláken byly proměřovány charakteristiky pro dopředné a zpětné zapojení čerpacího laseru na třech výkonových hladinách, a to 20, 40 a 72 mW. Změřené a vyhodnocené charakteristiky jsou znázorněny v obrázku 20. Tento obrázek ukazuje dopředné (obrázek 20 a)) i zpětné čerpání (obrázek 20 b)) a z porovnání charakteristik je patrné, že při zapojení čerpacího laseru k výstupu, dokáže vláknový zesilovač dosahovat vyšších hodnot zesílení.



Obrázek 20: Závislosti zesílení na vstupním výkonu 20 m  $Er^{3+}$  dotovaného vlákna pro a) dopředné čerpání b) zpětné čerpání na vlnové délce 1480 nm, při nastavených vstupních výkonech  $-29,2$  dBm,  $-22,7$  dBm,  $-17,4$  dBm,  $-15,9$  dBm, a  $-15,4$  dBm.

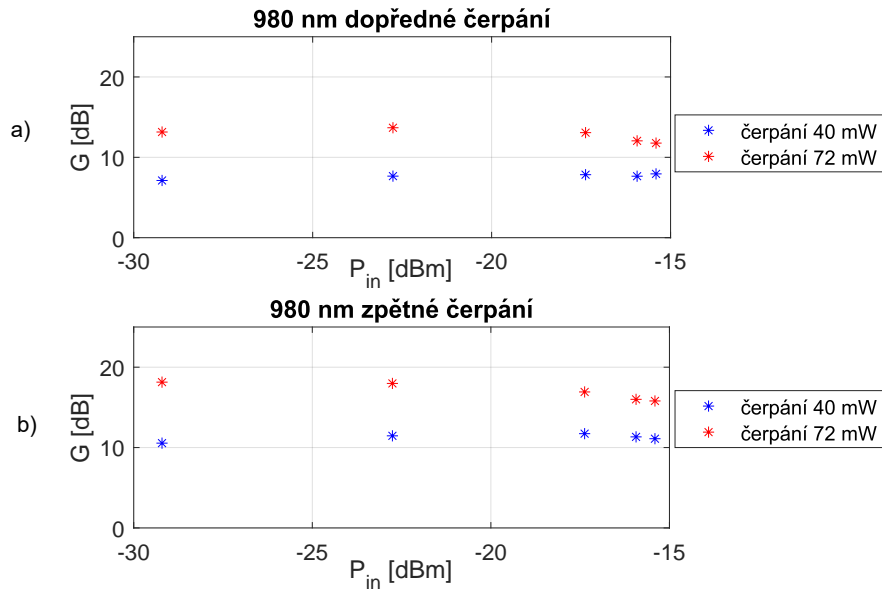
Toto srovnání je uvedeno v tabulce 12. V této tabulce je uvedeno zesílení vlákna pro jednotlivé výkony čerpání jak metodou dopřednou, tak zpětnou. Toto zesílení bylo měřeno při vstupním výkonu  $-22,7$  dBm.

Tabulka 12: Hodnoty měrného zesílení při jednotlivých čerpacích výkonech na vlnové délce 1480 nm pro dopředné i zpětné čerpání.

metoda čerpání		zesílení [dB]	
		dopředné	zpětné
čerpací výkon [mW]	40	7,7	12,1
	72	15,7	18,7



Hodnoty zesílení při využití čerpacího laseru na vlnové délce 980 nm jsou uvedeny v tabulce 13. Charakteristiku závislosti tohoto zesílení na vstupním optickém výkonu ukazuje obrázek 21. Hodnoty zesílení jsou pro tuto vlnovou délku čerpání menší, než při čerpání na vlnové délce 1480 nm. A to jak při dopředném, tak při zpětném čerpání.



Obrázek 21: Závislosti zesílení na vstupním výkonu 20 m  $Er^3$  dotovaného vlákna pro a) dopředné čerpání, b) zpětné čerpání na vlnové délce 980 nm, při nastavených vstupních výkonech  $-29,2$  dBm,  $-22,7$  dBm,  $-17,4$  dBm,  $-15,9$  dBm, a  $-15,4$  dBm.

Tabulka 13: Hodnoty měrného zesílení zesílení při jednotlivých čerpacích výkonech na vlnové délce 980 nm pro dopředné i zpětné čerpání.

metoda čerpání		zesílení [dB]	
		dopředná	zpětná
čerpací výkon [mW]	40	7,6	11,5
	72	13,7	18,0

Při nastaveném výkonu čerpacího laseru na 20 mW je výkon příliš malý, aby mohlo biterbium dotované vlákno schopné zesilovat. Hodnoty zesílení proto nebylo možné určit. Nejsou proto uvedeny ani v tabulkách, ani v grafech.

## Zhodnocení měření zesílení erbiem dotovaných vláken

Při měření a studiu zesílení erbiem dotovaných vláknových zesilovačů je z naměřených dat patrné, že největší hodnotu zesílení má nejdelší, tedy 50 metrů dlouhé vlákno. Hodnota tohoto zesílení přesahuje 20 dB. Nejmenší zesílení, jenž bylo naměřeno na vlákne 3 metry dlouhém, dosahuje hodnot zesílení v jednotkách dB. Ovšem po převedení hodnot na měrné zesílení, pak 3 metrové vlákno má tuto hodnotu měrného zesílení nejvyšší.

Zesílení erbiem dotovaného zesilovače je závislé na typu čerpání. Při zpětném čerpání vlákno dosahuje vyššího zesílení než při čerpání dopředném. Nejvyšší zesílení jsem však změřil při čerpání obousměrném s kombinací čerpání na vlnových délkách 980 nm a 1480 nm. Nejvíce se rozdíl zesílení projevuje na 50 metrovém vlákne. Ovšem nezávisí pouze na délce vlákna a na metodě čerpání, ale také na vlnové délce čerpacího laseru. Z naměřených dat vyplývá, že pokud čerpáme na vlnové délce 1480 nm, pak dosáhneme vyššího zesílení, oproti čerpání na vlnové délce 980 nm. To je způsobeno efektivitou čerpání přímou a nepřímou metodou. Spojením obou vlnových délek v obousměrném čerpání dokáže vlákno zesilovat nejlépe.

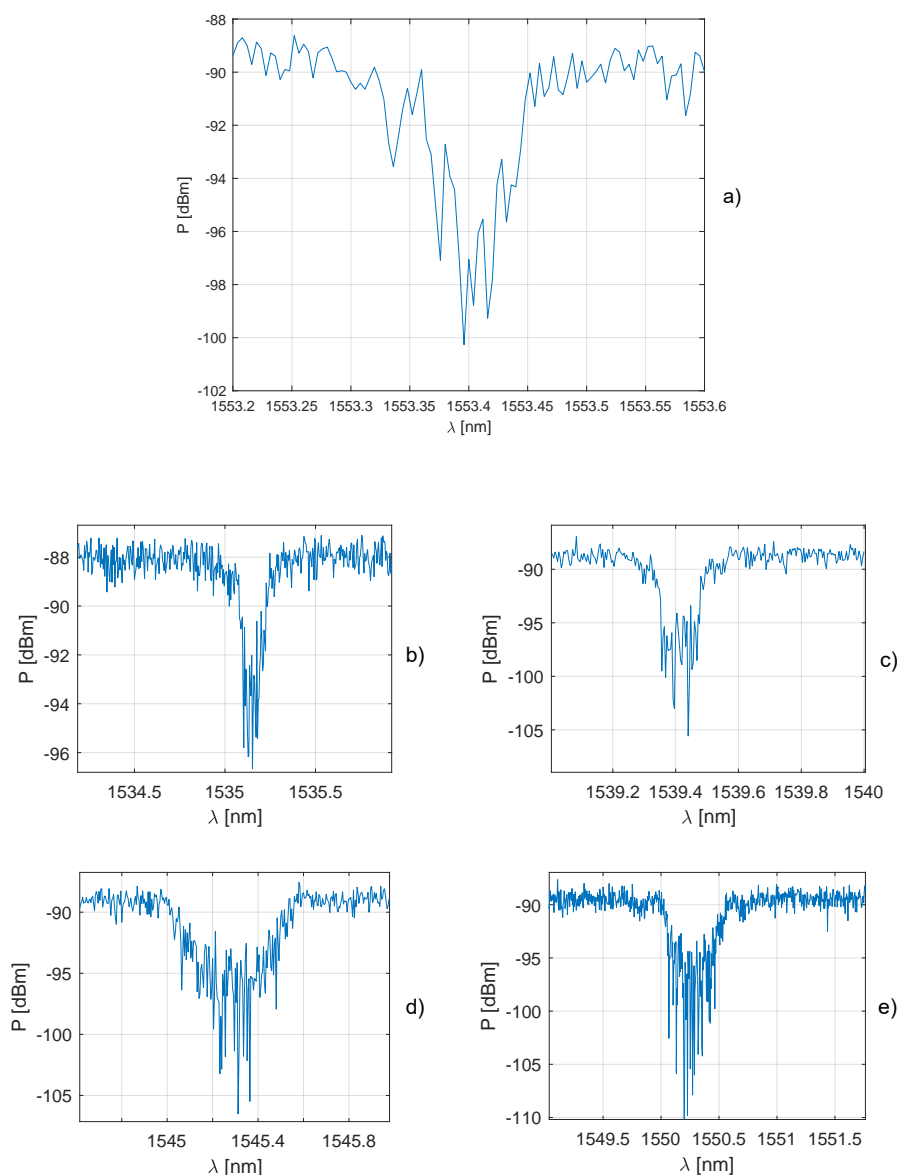
## 7.4 Měření parametrů Braggových mřížek

Při měření parametrů Braggových mřížek jsem postupně zapojil všechny měřené prvky na širokopásmový zdroj SLS201L/S a spektrální analyzátor YOKOGAWA. Pomocí spektrálního analyzátoru jsem měřil přenosovou charakteristiku přes měřenou Braggovu mřížku. Změřil jsem charakteristiky pěti mřížek (viz tabulka 14) a charakteristiky jsou znázorněny na obrázku 22. Z obrázku 22 lze odečíst parametry měřených Braggových mřížek, kterými jsou centrální vlnová délka (CWL) a šířka spektrální čáry (FWHM). Parametry měřených Braggových mřížek jsou shrnuty v tabulce 14 a porovnány s parametry uváděnými dodavatelem.

Tabulka 14: Parametry dostupných Braggových mřížek. Parametry centrální vlnová délka (CWL) a šířka spektrální čáry (FWHM), změřeno pomocí spektrálního analyzátoru YOKOGAWA.

parametry:		změřené		udané výrobcem	
výrobce	mřížka	CWL [nm]	FWHM [nm]	CWL [nm]	FWHM [nm]
I.D.I.L.	1553	1553,46	0,04	– *	– *
NETWORK Goup s.r.o.	1535	1535,14	0,14	1535,606	0,164
NETWORK Goup s.r.o.	1539	1539,42	0,15	1539,866	0,166
NETWORK Goup s.r.o.	1545	1545,28	0,46	1545,696	0,460
NETWORK Goup s.r.o.	1550	1550,32	0,48	1550,679	0,485

\* výrobce neudává hodnotu



Obrázek 22: Spektrální charakteristiky dostupných Braggových mřížek a) na vlnové délce 1553 nm integrována v modulu I.D.I.L., mřížky dodané firmou NETWORK Group s.r.o. b) na vlnové délce 1535 nm, c) na vlnové délce 1539 nm, d) na vlnové délce 1545 nm a e) na vlnové délce 1550 nm

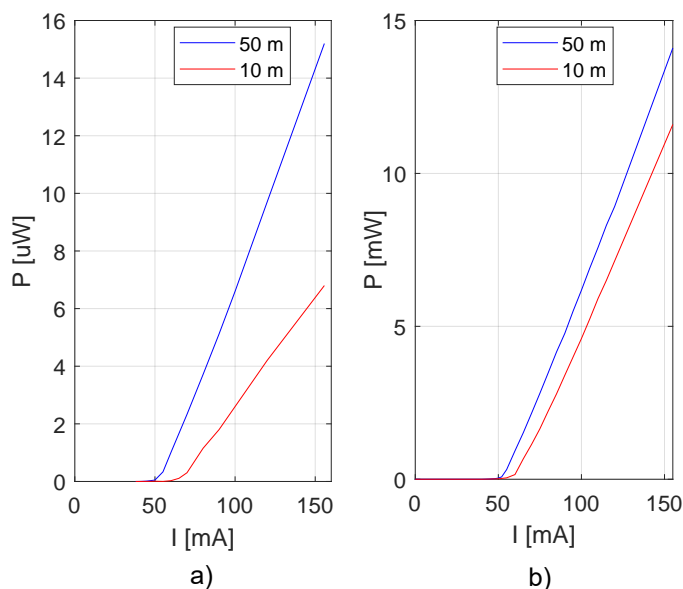
Porovnáním změřených parametrů s parametry dodanými výrobcem, uvedené v tabulce 14, můžeme vidět, že naměřené hodnoty se liší od údajů deklarovaných výrobcem. Pro parametr CWL je odchylka naměřených hodnot maximálně 0,45 nm od hodnot určených výrobcem. Změřené parametry FWHM se od hodnot dodaných výrobcem liší maximálně o hodnotu 0,02 nm. Pro Braggovu mřížku integrovanou v modulu I.D.I.L. výrobce neuvádí přesné parametry.

## 7.5 Realizace vláknového laseru s erbiem dotovaným optickým vláknem

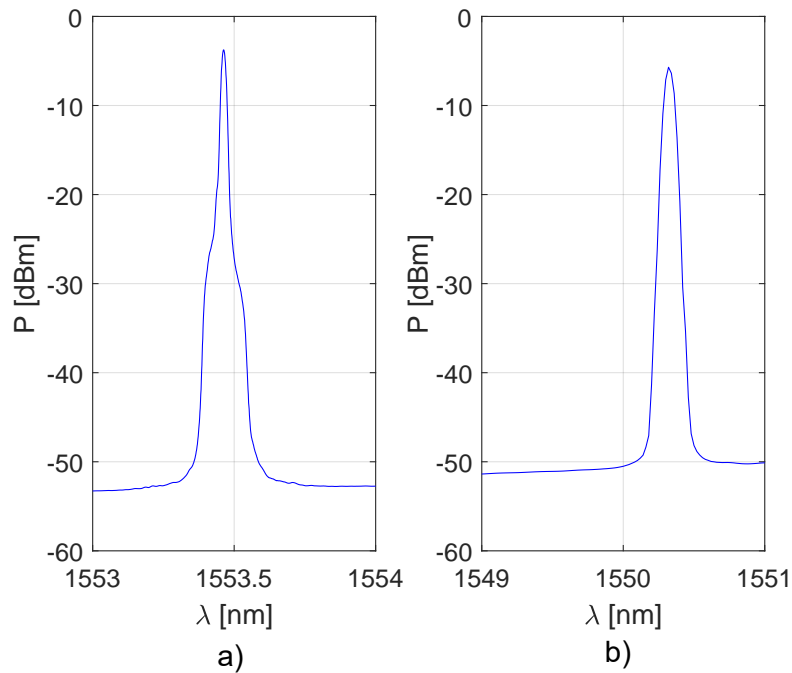
### Laser s Braggovou mřížkou

Nejprve jsem realizoval vláknový laser s pomocí Braggovy mřížky s čerpacím laserem na vlnové délce 980 nm. Laser jsem sestavil se dvěma Braggovými mřížkami. Využil jsem mřížku zabudovanou v modulu I.D.I.L. která má centrální vlnovou délku na 1553,46 nm a jednu mřížku od firmy NETWORK Group s.r.o. s centrální vlnovou délkou 1550,32 nm. Jejich parametry jsou uvedeny v tabulce 14. Tyto parametry definují vlnovou délku, na které laser pracuje. K realizaci laseru jsem také zvolil dvě vlákna, 10 metrů dlouhé a 50 metrů dlouhé.

Proměřil jsem charakteristika vyzářeného výkonu realizovaného vláknového laseru na elektrickém proudu čerpacího laseru, pracujícího na vlnové délce 980 nm. Tato závislost je uvedena na obrázku 23. Na obrázku 23 je znázorněna charakteristika výkonu sestaveného lineárního laseru v závislosti na elektrickém proudu pro realizovaný laser s Braggovou mřížkou integrovanou v modulu I.D.I.L. (obrázek 23 a) a Braggovou mřížkou od firmy NETWORK Group na vlnové délce 1550 nm (obrázek 23 b)). Z obrázku 23 je také patrné, kdy nastává stimulovaná emise, a tudíž kde je prahový proud obou sestavených laserů. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulkách 15 a 16. Při správné funkci laseru je také vidět, že je závislost výstupního optického výkonu na čerpacím elektrickém proudu lineární.



Obrázek 23: Charakteristiky vyzářeného výkonu vláknových laserů v závislosti na vstupním proudu čerpacího laseru s vlnovou délkou 980 nm. Realizováno s a) mřížkou integrovanou v modulu I.D.I.L., b) mřížka od firmy NETWORK Group s centrální vlnovou délkou 1550,32 nm.



Obrázek 24: Spektrum výstupního optického výkonu realizovaného laseru s Braggovou mřížkou a) na vlnové délce 1553,46 nm integrovanou v modulu I.D.I.L., b) na vlnové délce 1550,32 nm od firmy NETWORK Group s.r.o.

Z naměřených dat a následně i grafu jsem určil hodnoty prahových proudů a maximálního optického výkonu. Také jsem změřil spektrum signálu, znázorněné na obrázku 24, z něj jsem získal parametry pracovní vlnové délky vlnové délky, a parametru FWHM (Full Wavelength Half Maximum). Všechny změřené parametry jsou uvedeny v tabulkách 15 a 16 .

Tabulka 15: Parametry sestaveného vláknového laseru s Braggovou mřížkou o centrální vlnové délce 1553,32 nm.

délka vlákna [m]	prahový proud [mA]	max. výkon [mW]	vlnová délka [nm]	FWHM [pm]
50	54,44	15,2	1553,46	20
10	65,66	6,8	1553,47	20

Tabulka 16: Parametry sestaveného vláknového laseru s Braggovou mřížkou od fitmy NETWORK Group s.r.o. s centrální vlnovou délkou 1550,32 nm.

délka vlákna [m]	prahový proud [mA]	max. výkon [mW]	vlnová délka [nm]	FWHM [pm]
50	54,25	14,1	1550,32	70
10	61,51	11,6	1550,32	70

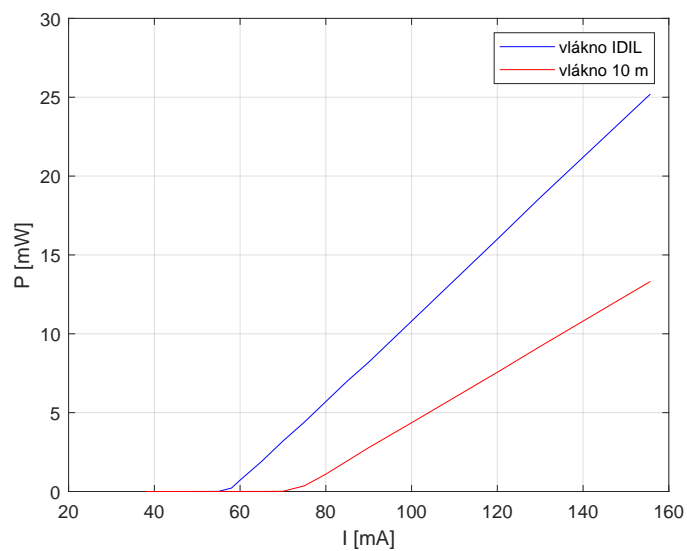
Z naměřených hodnot je patrné, že Braggova mřížka, použitá v zapojení laseru definuje parametr pracovní vlnové délky tohoto laseru. Pro laser v zapojení s Braggovou mřížkou integrovanou v modulu I.D.I.L. byla změřena pracovní vlnová délka 1553,46 nm, pro mřížku s centrální vlnovou délkou 1550,32 nm laser pracuje na vlnové délce 1550,32 nm. Laser s mřížkou na 1550 nm dosahuje podobných hodnot jako laser s mřížkou na 1553,46 nm a to přibližně 14,1 mW s 50 m erbiem dotovaným vláknem. S váknem 10 m dlouhým a mřížkou na 1553,46 nm jsem dosáhl optického výkonu 11,6 mW a při využití mřížky na 1550,32 nm byl nyměřen maximální výkon 6,8 mW.

### Kruhový laser

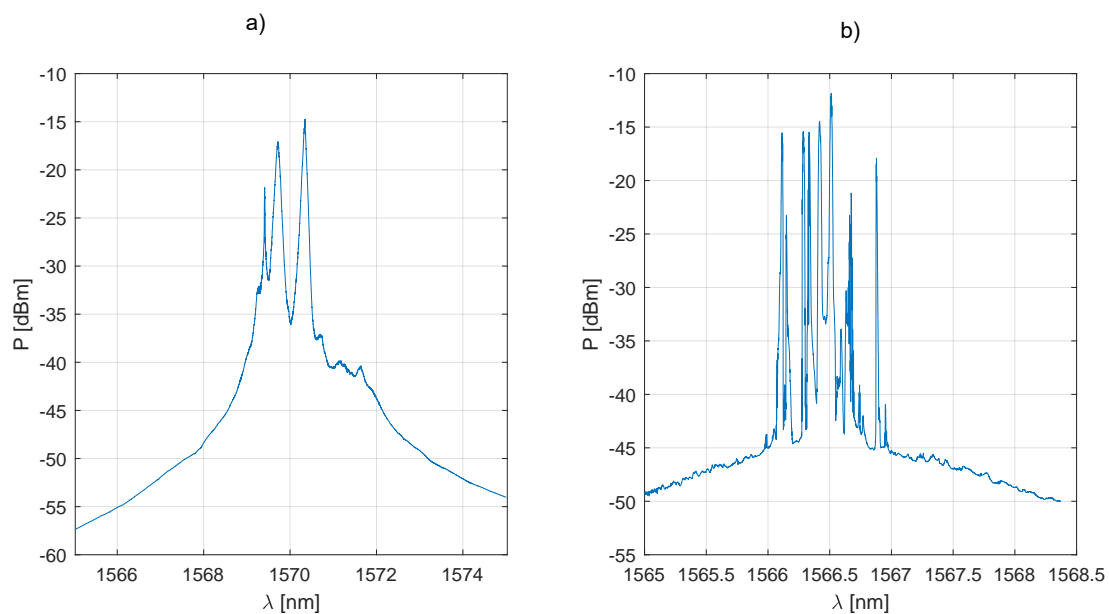
Pro zapojení vláknového zesilovače s erbiem dotovaným vláknem do kruhové konfigurace byla změřena charakteristika závislosti výkonu na vstupním proudu do čerpacího laseru stejně jako pro zesilovač s Braggovou mřížkou. Tato závislost je znázorněna na obrázku 25. Dále pak byl výstup realizovaného vláknového laseru připojen na spektrální analyzátor, kde byly proměřeny další parametry, jako pracovní vlnová délka, FWHM a optický výkon. Spektrum kruhového laseru pro 50 metrové a 10 metrové vlákno je znázorněno na obrázku 26. Parametry prahového proudu, maximálního výkonu, pracovní vlnové délky a FWHM byly změřeny a jsou uvedeny v tabulky 17.

Tabulka 17: Parametry sestaveného vláknového kruhového laseru s čerpacím laserem na vlnové délce 980 nm.

délka vlákna [m]	prahový proud [mA]	max. výkon [mW]	vlnová délka [nm]	FWHM [nm]
50	57,5	25,1	1570,04	0,67
10	72,9	13,3	1566,51	0,30



Obrázek 25: Charaktererika závislosti výstupního optického výkonu kruhového laseru na vstupním elektrickém proudu čerpacího laseru na vlnové délce 980 nm.



Obrázek 26: Spektrum výstupního optického výkonu realizovaného kruhového laseru s erbiem dotovaným vláknem délky a) 50 m, b) 10 m.

Ze spektrálních charakteristik laseru s Braggovou mřížkou a kruhového laseru je patrné, že u prvně zmíněného laseru je šířka spektrální čáry vyzářeného paprsku užší. Zde definuje centrální vlnovou délku Braggova mřížka. Kruhový laser má naopak širší spektrum a více rezonančních vlnových délek, které jsou velice blízko sebe.

Ve srovnání délek vláken 10 metrů a 50 metrů dlouhých, vyplývá že delší vlákno generuje vyšší optický výkon. U kruhového laseru jsou rozdílné vlnové délky, kdy 50 metrové vlákno má CWL na vlnové délce 1570,35 nm, zatímco 10 metrové vlákno má CWL na 1566,51 nm. Rozdíl pracovních délek kruhového laseru je způsoben změnou parametru kruhového vláknového rezonátoru.

## 8 Závěr

V bakalářské práci jsem se zabýval měřením základní vlastnosti optických vláken a optických vláknových zesilovačů s dotací erbia. Popsal jsem princip optických vláknových vlnovodů. Zmínil jsem fyzikální princip šíření optického signálu pomocí optického vlákna a to jak jednovidového, tak i vícevidového.

V Další kapitole jsem uvedl fyzikální princip optického zesilovače a optického vláknového zesilovače s dotací erbia. Uvedl jsem také princip optického čerpání, kterým dotovanému vláknu dodáváme potřebnou energii pro stimulovanou emisi, která z nabyté energie dokáže zesílit vstupní optický signál. Následně jsem teoreticky popsal jednotlivé konfigurace čerpání (dopřednou, zpětnou, obousměrnou), jejich výhody a nevýhody. Porovnával jsem schopnost zesílení, ale i šumové parametry každé metody optického čerpání.

V Praktické části bakalářské práce se zaměřuji na měření vlastností optických vláken s dotací erbia. V Prvním měření jsem sledoval transmisní spektra erbiem dotovaných vláken, když jsem toto vlákno připojil na spektrální analyzátor. Spektrum vlnových délek ukázalo dvě oblasti, v nichž vlákno vykazovalo zvýšenou absorpci. Tyto oblasti se nachází na vlnových délkách okolo 980 nm a okolo 1530 nm. Tyto oblasti vyššího útlumu jsou způsobeny dotací erbia, který absorbuje a dodává elektronům energii pro přechod na vyšší energetické hladiny. Porovnáním obou oblastí je patrné, že oblast okolo 980 nm je mnohem užší než oblast okolo 1530 nm. V oblasti okolo 980 nm dochází k čerpání na vyšší energetické hladiny, než při absorpci na vlnových délkách okolo 1530 nm. V těchto oblastech se nachází vlnové délky 980 nm a 1480 nm, což je využito pro realizaci vláknového zesilovače, kde se lasery s vlnovými délkami 980 nm a 1480 nm využívají pro čerpání výkonu.

Následně jsem erbiem dotovaná vlákna zapojil pro měření vlastností optických vláknových zesilovačů. Studoval jsem vlastnost zesílení pro signál na vlnové délce 1550 nm při čerpání na vlnových délkách 980 nm a 1480 nm. Stejně tak jsem porovnával zesílení pro tři konfigurace optického čerpání (dopředné, zpětné a obousměrné).

Při porovnání výsledků z jednotlivých konfigurací čerpání, je patrné že zesílení se zvyšuje s narůstající délkou optického dotovaného vlákna, takže nejvyšší zesílení jsem dosahoval u vlákna délky 50 m, kde vycházelo zesílení okolo 20 dB při čerpacím výkonu 72 mW a výkonu signálu na hladině  $-22,7$  dBm. Z měření vyplynulo, že čerpací laser na vlnové délce 1480 nm dosahuje, při stejném výkonu čerpání, vyšších hodnot zesílení, než



laser na vlnové délce 980 nm. Hodnoty zesílení se však mění také pro každou konfiguraci čerpání. Při měření zesílení pro dopřednou metodu čerpání jsem dosáhl nižších hodnot zesílení než pro čerpání zpětné. Při Kombinaci dvou laserů na vlnových délkách 980 nm a 1480 nm metodou obousměrného čerpání, dosáhl zesilovač nejvyšších hodnot zesílení. Při konfiguraci obousměrného čerpání s kombinací vlnových délek 980 nm a 1480 nm dosahuje 50 m vlákno zesílení 26 dB, 10 m vlákno zesílení 21,9 dB a 3 m vlákno dosahuje zesílení 9,7 dB (při výkonu vstupního signálu  $-22,7$  dBm). Tyto hodnoty byly dosaženy při celkovém čerpacím výkonu 72 mW.

Kromě vláknových zesilovačů jsem z erbiem dotovaných vláken realizoval vláknové lasery. Realizoval jsem laser v zapojení erbiem dotovaného vlákna s Braggovou mřížkou a také v zapojení do kruhového vláknového rezonátoru. Realizoval jsem dva lasery s Braggovými mřížkami, jejichž parametr centrální vlnové délky jsem naměřil jako 1550,32 nm a 1553,46 nm. Také jsem realizoval dva kruhové lasery. Jeden tvořený erbiem dotovaným vláknem s délkou 10 m a jeden s 50 m dlouhým vláknem. Při porovnání obou parametrů obou zapojení je ze spektrální charakteristiky patrné, že vlákno s Braggovou mřížkou má velice úzkou spektrální čáru. Pracovní vlnová délka tohoto laseru je závislá na parametru centrální vlnové délky Braggovy mřížky. Kruhový laser má mnohem širší spektrální čáru.

Realizované vláknové lasery s Braggovými mřížkami pracovaly na vlnových délkách 1550,32 nm a 1553,46 nm. Jejich maximální výkony byly 15,2 mW, pro mřížku s centrální vlnovou délkou 1553,46 nm, a 14,1 mW pro mřížku s centrální vlnovou délkou 1550,32 nm, při použití 50 m dlouhého erbiem dotovaného vlákna. Při použití vlákna 10 m byly naměřeny maximální optické výkony laserů 6,8 mW pro mřížku s centrální vlnovou délkou 1553,46 nm a 11,6 mW při použití Braggovy mřížky s centrální vlnovou délkou 1550,32 nm. Realizované kruhové lasery pracovaly na vlnových délkách 1566,51 nm, při použití 10 m erbiem dotovaného vlákna, kde dosáhl maximálního výkonu 13,3 mW, a 1570,04 nm, při použití vlákna 50 m, maximálním dosaženým optickým výkonem 25,1 mW.

Bakalářská práce prokázala, že lze využít erbiem dotované vlákno jako vláknový zesilovač k zesilování optického signálu na vlnových délkách okolo 1530 nm. Také ukázala využití erbiem dotovaného vlákna ke generování optického paprsku při realizaci vláknových laserů.

## Reference

- [1] KAŠÍK, Ivan a Pavel Peterka. *Optická vlákna – páteř moderních komunikací*, Československý časopis pro fyziku. Praha: Fyzikální ústav AV ČR, 2011, 1. sešit, 61. svazek, str. 4-7. ISSN 0009-0700. Také dostupné z : [https://www.ufe.cz/sites/default/files/Media/ccf\\_1-11\\_e.pdf](https://www.ufe.cz/sites/default/files/Media/ccf_1-11_e.pdf)
- [2] MARŠÁLEK, Leoš. *Optická vlákna*. [online] OSTRAVA, 2006 [cit. 20.10.2020]. Bakalářská práce. VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA dostupné z: <http://goro.czweb.org/download/interest/vlakna.pdf>
- [3] BHUMIK, Sudipta a Andrew McGrath. *Differences between OM1, OM2, OM3, OM4, OS1, OS2 fiber optic cable nomenclatures* Sterlight Tech, Prosinec 2013, [online] [cit. 29.4.2021]. převzato z:[https://www.stl.tech/optical-interconnect-products/optical-fibre/pdf/Differences\\_between\\_OM1\\_OM2\\_OM3\\_OM4\\_.pdf](https://www.stl.tech/optical-interconnect-products/optical-fibre/pdf/Differences_between_OM1_OM2_OM3_OM4_.pdf)
- [4] CHLEBOUN, Jiří. *SPEKTRÁLNÍ CHARAKTERISTIKY VE VLÁKNOVÉ OPTICE* [online] Brno, 2011 [cit. 20.11.2020]. Bakalářská práce. VUT v Brně. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=42546](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=42546)
- [5] ŠIFTA, Radim. *DWDM V PĚTISTUPOVÝCH SÍTÍCH* [online] Brno, 2011 [cit. 22.4.2021]. Diplomová práce. VUT v Brně. Převzato z:[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=37801](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=37801)
- [6] SALEH, Bahaa E.A. a Malvin C. Teich *Fundamentals of Photonics*, New York, N.Y.: © John Wiley & Sons, Inc. 1991. ISBN 0-471-2-1374-8.
- [7] MLEJNEK, Zbyněk. *Optické zesilovače* [online] Brno, 2008 [cit. 20.11.2020]. Bakalářská práce. VUT v Brně. Převzato z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=8652](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=8652)
- [8] POLMAN, A. *Erbium as a probe of everything?*, Physica B: Condensed Matter, Kruislaan 407, 1098 SJ Amsterdam, The Netherlands 2001, 300. ročník, str. 78-90. ISSN 0921-4526.
- [9] HUI, Rongqing a Maurice O'Sullivan, *Fiber Optic Measurement Techniques*, 2009 Elsevier Inc. ISBN 978-0-12-373865-3. převzato z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/pumping-configuration>
- [10] CESNET, *CESNET2 Topology June 2020* [online] [cit. 30.4.2021] převzato z:[https://photonics.cesnet.cz/\\_media/cs/topologie/topology\\_cesnet\\_june\\_20.jpg](https://photonics.cesnet.cz/_media/cs/topologie/topology_cesnet_june_20.jpg)
- [11] VOJTĚCH, Josef CESNET, *OPTICKÉ LINKY A JEJICH PERSPEKTIVA PRO PŘENOS PŘESNÉHO ČASU A FREKVENCE, MOŽNOST SDÍLENÍ S DATY* [online] Praha, květen 2019 [cit. 30.4.2021] převzato z:<https://docplayer.cz/105565741-Josef-vojtch-oddeleni-opticky-siti-cesnet.html>

- [12] VOJTĚCH, Josef CESNET, *HOW TO ACCOMMODATE INCREASED BANDWIDTH REQUESTS OF ADVANCED APPLICATIONS* [online] Praha, 3.9. 2019 [cit. 30.4.2021] převzato z:<https://www.cesnet.cz/wp-content/uploads/2019/09/vojt%C4%9Bch.pdf>
- [13] CESNET. *Přestavba a povýšení optické přenosové sítě DWDM ONS 15454*[online] CESNET z.s.p.o. ©1996–2012 [cit. 13.5.2021] převzato z:<https://archiv.cesnet.cz/doc/2011/zprava/nren.html#nren-dwdmtopo-2010>
- [14] LD-PD INC. *1480nm FP PM Raman Pump Laser Diode*[online], LD-PD Inc. Ltd., ©2015-2021 [cit. 17.5.2021]. Převzato z:<http://www.ld-pd.com/?a=cpinfo&id=500>
- [15] THORLABS. *SLS201L/M - Stabilized Fiber-Coupled Light Source* [online], Thorlabs, Inc., ©1999-2021 [cit. 3.4.2021].  
Převzato z:<https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=SLS201L/M>
- [16] THORLABS. *Digital Handheld Optical Power and Energy Meter Console* [online], Thorlabs, Inc., ©1999-2021 [cit. 12.3.2021].  
Převzato z:[https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=3341](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=3341)
- [17] THORLABS. *Thermal Power Sensor Head, Surface Absorber* [online], Thorlabs, Inc., ©1999-2021 [cit. 11.5.2021].  
Převzato z:<https://www.thorlabs.com/thorProduct.cfm?partnumber=S302C>
- [18] THORLABS. *Compact Fiber Photodiode Power Sensor, InGaAs* [online], Thorlabs, Inc., ©1999-2021 [cit. 11.5.2021].  
Převzato z:<https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=S155C>
- [19] RIGOL. *RIGOL Datasheet* [online], RIGOL Technologies, Inc. Feb.2010 [cit. 12.3.2021]  
Převzato z:<https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/Data+Sheet+DS1000E.pdf>
- [20] SAFIBRA. *Sestava EDFA zesilovač a vláknový laser*, SAFIBRA [online] , Safibra, s.r.o.©2021 [cit. 18.2.2021] převzato z:<http://www.safibra.cz/ampli-kit>
- [21] IDIL FIBRES OPTIQUES. *ERBIUM DOPED FIBER Manual* © z příručky 2021 IDIL FIBRES OPTIQUES str. 101-115
- [22] YOKOGAWA *Spektrální analyzátor* [online]. Yokogawa Test & Measurement Corporation ©, 2008-2021 [cit. 12.3.2021]. Převzato z:  
<https://tmi.yokogawa.com/solutions/products/optical-measuring-instruments/optical-spectrum-analyzer/aq6370d-optical-spectrum-analyzer/>
- [23] FIBERCORE. *High Efficiency C-Band Erbium Doped Fibers* [online], FIBERCORE, Inc. © Humanetics Group, 2020 [cit. 7.5.2021]. Převzato z:  
<https://fibercore.humaneticsgroup.com/products/doped-fiber/erbium-doped-fiber-isogain/high-efficiency-c-band-erbium-doped-fibers/i-4980125hp>

- [24] Bc. URBAN, František. *BRAGGOVY MŘÍŽKY V OPTICKÝCH VLÁKNECH* [online]. Brno, 2014 [cit. 20.4.2021]. Diplomová práce. VUT v Brně. Převzato z:<https://core.ac.uk/download/pdf/30299434.pdf>
- [25] Bc. BURIAN, Tomáš. *APODIZACE BRAGGOVÝCH VLÁKNOVÝCH MŘÍŽEK VYRÁBĚNÝCH UV EXPOZICÍ PŘES FÁZOVOU MASKU* [online]. Brno, 2019 [cit. 22.4.2021] Diplomová práce, VUT v Brně. Převzato z:[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=191938](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=191938)
- [26] Edmund Optics. *Optical Filters*[online], ©2021, Edmund optics Inc. [cit. 29.4.2021] převzato z: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/optics/optical-filters/>