



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## OPTICKÝ ZESILOVAČ V LABORATORNÍ VÝUCE

OPTICAL AMPLIFIER IN LABORATORY PRACTICE

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. PAVEL ŠUSTR, DiS.

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. MILOSLAV FILKA, CSc.

BRNO 2009



## ABSTRAKT

Cílem této práce je seznámit čtenáře s uplatněním a využitím optických zesilovačů EDFA v optických přenosech, provést zapojení a praktické otestování, včetně výkonových měření na zesilovači. Cílem práce je také navrhnout využití optického zesilovače v laboratorní výuce k předmětu Optické sítě.

Práce stručně seznamuje s problematikou datových přenosů po optických vláknech se zaměřením na využití optických zesilovačů. Jsou zde popsány základní vlastnosti optických přenosových tras, struktura přenosové trasy s optickým zesilovačem a důvody použití optických zesilovačů.

Jedna celá kapitola je věnována dělení optických zesilovačů. Zesilovače mohou být děleny dle umístění v přenosové trase na výkonové zesilovače, in-line zesilovače a předzesilovače, nebo dle použité zesilovací technologie na vláknové zesilovače s dotací, polovodičové optické zesilovače a ramanovské optické zesilovače. Jsou zde také popsány faktory ovlivňující účinnost optických zesilovačů, jako je šum a úroveň saturevaného výkonu.

Jsou zde také popsány různé typy optických zesilovačů od dvou výrobců. Z těchto zesilovačů byl vybrán EDFA zesilovač CzechLight Amplifier od firmy Optokon, který bude využit pro laboratorní úlohu v předmětu Optické sítě.

V této práci je také zmíněno využití EDFA optických zesilovačů v optických přenosových trasách. Tyto zesilovače mohou být využity v telekomunikačních přenosových systémech, i pro přenos dat na velké vzdálenosti. Využití najdou v WDM přenosových systémech a také v rozvodech kabelové televize po optických vláknech až ke koncovým uživatelům.

Praktické měření bylo provedeno na optickém zesilovači CLA-PB01F. V přenosové trase byl umístěn útlumový článek a byla měřena závislost výstupního výkonu signálu na vstupním výkonu. V rozmezí vstupních hodnot udávaných výrobcem byl zesilovací průběh lineární.

Laboratorní úloha, pro předmět Optické sítě, je zaměřena na seznámení studentů s problematikou optických EDFA zesilovačů a na praktické měření se zesilovačem CLA-PB01F. Studenti získají základní teoretické znalosti dané problematiky a ověří si funkčnost optického zesilovače na konkrétním příkladě.

Tato práce je určena všem, kdo se chtějí seznámit s optickými zesilovači, jejich vlastnostmi a možnostmi jejich využití v optických přenosových trasách.

**Klíčová slova:** optický zesilovač, erbiem dotovaný optický zesilovač, přenosový optický systém, útlumový článek, saturevaný výstupní výkon, zisk

# ABSTRACT

The aim of this thesis is to introduce to reader the application and use of optical EDFA amplifiers in optical transmission and to show wiring and practical test, including measurements on amplifier. The aim of this thesis is to propose the use of optical amplifier in laboratory practice for subject Optical networks.

The thesis briefly introduces the problems of data transmissions through optical fibers with a focus on the use of optical amplifiers. The basic characteristic of optical transmission paths and the reasons for the use of optical amplifiers are described here.

One entire chapter is devoted to distinction of optical amplifiers. Amplifiers can be divided according to location in the transmission path to the booster, in-line and pre-amplifiers and according to the used of amplifying technology to optical amplifiers with subsidies, semiconductor optical amplifiers and Raman optical amplifiers. The factors affecting the efficiency of optical amplifiers, such as noise and the level of saturated power are mentioned here too.

The different types of optical amplifiers from the two producers are also described. From these amplifiers was chosen EDFA CzechLight Amplifier from Optokon to be used for the laboratory exercise in the subject of Optical networks.

The use of EDFA optical amplifiers in optical transmission lines is mentioned here too. These amplifiers can be used in telecommunications transmission systems and for data transmission over long distances. They will find use in WDM transmission systems and cable TV distribution through the optical fiber to the end users.

Practical measurements were performed on optical amplifier CLA-PB01F. In the transmission route was located attenuator and the dependence of output power to input signal power was measured. The amplification course was linear in the range of input values provided by the manufacturer.

Laboratory exercise for the subject of Optical networks is aimed at preacquaintance of students with problems EDFA optical amplifiers and practical measurements with the optical amplifier CLA-PB01F. Students acquire basic theoretical knowledge of the issue and verify the functionality of optical amplifiers on a specific exercise.

This work is destined for all who wish to get basic knowledge of optical amplifiers, their characteristics and possibilities of their use in optical transmission lines.

**Keywords:** optical amplifier, erbium-doped fibre amplifier, transmission optical system, attenuator, saturated output power, gain

ŠUSTR, P. *Optický zesilovač v laboratorní výuce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 53 stran, 1 příloha. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Miloslav Filka, CSc.

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Optický zesilovač v laboratorní výuce jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 26. 5. 2009

.....

podpis autora

Děkuji vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Miloslavu Filkovi, CSc., za odborné vedení, užitečnou pomoc a cenné rady, které pro mne byly velkým přínosem při zpracování diplomové práce.

V Brně dne 26. 5. 2009

.....

podpis autora

## Obsah

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Úvod.....   | 10 |
| 2     | Komunikace po optických vláknech.....                 | 11 |
| 3     | Optické zesilovače.....                               | 13 |
| 3.1   | Rozdělení zesilovačů dle umístění na trase.....       | 13 |
| 3.2   | Optické vláknové zesilovače s dotací.....             | 14 |
| 3.2.1 | EDFA - Erbiem dotované optické zesilovače.....        | 17 |
| 3.2.2 | PDFA - Praseodymiem dotované optické zesilovače.....  | 18 |
| 3.2.3 | TDFA - Thiliem dotované optické zesilovače.....       | 18 |
| 3.2.4 | YDFA - Yterbiem dotované optické zesilovače.....      | 18 |
| 3.3   | Polovodičové optické zesilovače.....                  | 18 |
| 3.4   | Ramanovské optické zesilovače.....                    | 20 |
| 4     | Výběr optického zesilovače pro laboratorní výuku..... | 22 |
| 4.1   | Zesilovače CzechLight.....                            | 22 |
| 4.2   | WDM optický zesilovač C-pásma.....                    | 23 |
| 4.3   | 1.0 μm Yterbiový vláknový zesilovač.....              | 23 |
| 4.4   | Ramanovský zesilovač.....                             | 24 |
| 5     | Využití optických EDFA zesilovačů.....                | 26 |
| 5.1   | Využití v přenosech WDM.....                          | 26 |
| 5.2   | Využití v CATV.....                                   | 26 |
| 6     | Praktické měření.....                                 | 27 |
| 6.1   | Použité přístroje.....                                | 27 |
| 6.1.1 | EDFA optický zesilovač CLA-PB01F.....                 | 27 |
| 6.1.2 | Univerzální jednotka pro testovací moduly UMS-10..... | 31 |
| 6.1.3 | Optický útlumový článek OFA-420.....                  | 34 |
| 6.1.4 | Splitter SFT-TAP-AT-10.....                           | 35 |
| 6.2   | Pracovní postup měření.....                           | 36 |
| 6.3   | Výsledky měření.....                                  | 37 |
| 7     | Laboratorní úloha.....                                | 40 |
| 7.1   | Zadání.....   | 40 |
| 7.2   | Teoretický úvod.....                                  | 40 |
| 7.2.1 | Optické zesilovače.....                               | 40 |
| 7.2.2 | Rozdělení zesilovačů dle umístění na trase.....       | 41 |
| 7.2.3 | Optické vláknové zesilovače s dotací.....             | 42 |
| 7.2.4 | EDFA optický zesilovač CLA-PB01F.....                 | 43 |
| 7.2.5 | Univerzální jednotka pro testovací moduly UMS-10..... | 45 |
| 7.2.6 | Optický útlumový článek OFA-420.....                  | 46 |
| 7.2.7 | Splitter SFT-TAP-AT-10.....                           | 47 |
| 7.3   | Pracovní postup.....                                  | 47 |
| 7.4   | Zpracování.....                                       | 49 |
| 7.5   | Závěr.....  | 49 |
| 8     | Závěr.....  | 50 |



|    |  |    |
|----|--|----|
| 9  | Seznam literatury a použitých zdrojů.....        | 51 |
| 10 | Seznam použitých zkratek, veličin a symbolů..... | 52 |
| 11 | Seznam příloh .....                              | 53 |

# 1 Úvod

Tato diplomová práce je zaměřena na využití a uplatnění optických zesilovačů EDFA v optických přenosech. V následujících odstavcích je popsána problematika přenosu signálu po optických vláknech a jsou uvedeny vlastnosti a jednotlivé typy optických zesilovačů.

Součástí práce je také výběr vhodného typu optického zesilovače, na kterém budou provedena výkonová měření a který by bylo možné použít pro laboratorní výuku ve školní laboratoři. Na trhu jsou k dispozici optické zesilovače různých typů a od mnoha výrobců. Tato práce bude zaměřena pouze na produkty firem Optokon a Keopsys.

Měření bude zaměřeno na zapojení optického EDFA zesilovače do přenosové trasy, otestování jeho zesilovacích vlastností a výkonových měření, porovnávajících vstupní a výstupní výkon zesilovaného signálu.

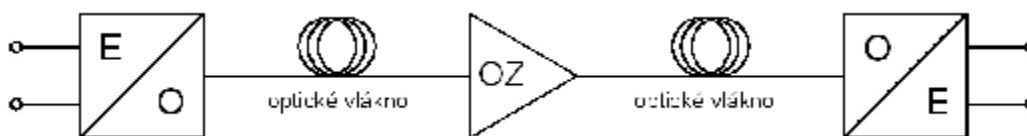
Úkolem je také navrhnout vhodné využití vybraného zesilovače pro laboratorní výuku v předmětu Optické sítě. Laboratorní úloha s touto problematikou by studentům měla umožnit seznámit se jak s teoretickými základy zesilování optického signálu, tak si i vyzkoušet daný přístroj v praxi, zapojit funkční přenosový systém a provést příslušná měření.

## 2 Komunikace po optických vláknech

Datová komunikace po optických vláknech se již stala běžnou součástí přenosových systémů. Stále častěji se uplatňuje i pro připojení na krátké vzdálenosti, jako je například připojení „poslední míle“, ale stále je nejvíce využívána pro vysokorychlostní přenosy na velké vzdálenosti.

Způsob kterým dochází k přenosu signálu optickým vláknem je znám již dlouho dobu. Využívá se znalostí o odrazech světelného paprsku na rozhraní dvou prostředí s odlišnými optickými vlastnostmi. Pokud dopadá optický paprsek na rozhraní dvou optických prostředí s odlišným indexem lomu pod dostatečně malým úhlem, který je menší než tzv. numerická apertura (mezní úhel odrazu), dochází k jeho úplnému odrazu a paprsek zůstává v původním optickém prostředí. U optického vlákna se paprsek šíří jádrem, které má vyšší index lomu než jeho obal a díky tomu jsou vytvořeny vhodné podmínky pro úplný odraz paprsku.

Optický spoj je v podstatě tvořen modulovaným zdrojem záření, optickým prostředím a přijímačem záření. Vstupní i výstupní signál takového optického spoje je elektrický, tzn., že vysílací a přijímací část obsahuje mimo optoelektronických prvků a optických soustav také elektronické obvody, které zpracovávají vstupní a výstupní signál.



Obr. 2.1: Optoelektronický přenosový systém s optickým zesilovačem.

Optický spoj je odolný proti vnějším rušivým signálům a lze obtížně odposlouchávat. Nedochází ke zpětnému ovlivňování z výstupu na vstup, spojení je jednosměrné. Mezi výhody můžeme počítat i galvanické oddělení vstupu a výstupu.

Kvalita přenášeného signálu samozřejmě závisí na mnoha faktorech. Jedním z nich je také zdroj světla. V praxi se používají dva druhy světelných zdrojů. LED diody, které jsou levnější, poskytují světelné paprsky s horšími vlastnostmi a umožňují datový přenos do rychlostí řádově stovek  $\text{Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$ . Na druhou stranu laserové zdroje jsou dražší, ale mají mnohem lepší vlastnosti. S využitím laserových zdrojů světelného paprsku lze dosáhnout přenosových rychlostí řádově v desítkách  $\text{Gbit}\cdot\text{s}^{-1}$  a vyšších.

Při šíření signálu optickým vláknem dochází k poklesu intenzity světla v důsledku útlumu, který je způsoben nedokonalostmi optického vlákna. Když se optická vlákna začala poprvé využívat pro přenosy na větší vzdálenosti, nebyla jejich kvalita dostatečná a útlum dosahoval až  $20 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$ . V dnešní době se výrobní proces zdokonalil natolik že jsme schopni vyrobit nízkouútlumová vlákna, jejichž útlum je  $0,2$  až  $0,3 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$ . Přenosové vlastnosti, obdobně jako geometrické parametry, jsou specifikovány v doporučeních ITU-T.

Při nutnosti přenášet signál na co nejdelší vzdálenosti, nám bude ztráta výkonu na optickém systému, v podobě útlumu, vždy způsobovat problémy. Pro odstranění této překážky slouží zesilovače optického signálu. Dříve se používaly regenerační zesilovače,

které převáděly optický signál na elektrický, který zesilovaly a následně převáděly zpět na signál optický. Se snahou o zvyšování přenosové rychlosti optických vedení se právě tato konverze začala projevovat jako úzké hrdlo, které bránilo popř. zpomalovalo postup vpřed. Nyní se již využívají zesilovače čistě optické, které zesilují přímo optický signál. Umožňují tak komunikaci na větší vzdálenosti a s většími přenosovými rychlostmi.

### 3 Optické zesilovače

Optické zesilovače jsou zařízení, které zesilují přímo optický signál bez nutnosti převádět ho na signál elektrický. Princip na kterém fungují je založen na existenci stimulované emise záření v optickém vlákně. Přechod soustavy elektronů do stavu s nižší energií vyvolaný stimulujícím fotonem je doprovázen vyzářením fotonu, který má stejnou energii, stejný směr šíření a stejnou fázi i polarizační vlnění jako foton stimulující. Stimulující foton se uvažovanou soustavou nepohlí, pouze soustavou projde a přidá se k němu foton stimulovaný. Tento jev se nazývá stimulovaná emise záření [4].

K zesilování je nutné dodat jistou energii, kterou poskytuje čerpací zdroj. Rozlišujeme dva základní druhy dodané energie:

- § optická energie – dodaná ve formě záření s koherentní vlnovou délkou (laserové čerpací zdroje). Využívá se ve vláknových zesilovačích s dotací.
- § elektrická energie – dodaná ve formě proudu. Využívá se v polovodičových zesilovačích.

Ani vláknový ani polovodičový zesilovač příchozí signál jiným způsobem neupravují, pouze ho zesílí. Ale oba přináší do přenosové trasy přídavný šum – ASE (Amplified Spontaneous Emission). Tento šum je v podstatě světlo vytvořené samovolnou emisí, které je opticky zesíleno procesem stimulované emise záření ve vlákně. ASE negativně ovlivňuje maximální zisk, kterého lze dosáhnout. Velikost zisku zesilovače je funkcí vlnové délky vstupního světla a vstupní signálové úrovně (bodu saturace). Všechny optické zesilovače jsou omezeny svým maximálním výkonem na výstupu – saturačním výkonem [5].

#### 3.1 Rozdělení zesilovačů dle umístění na trase

Zesilovače můžeme do optického přenosového systému umístit několika způsoby podle jejich zesilovacích vlastností. Podle umístění na trase dělíme zesilovače na:

##### § Výkonové zesilovače (Booster)

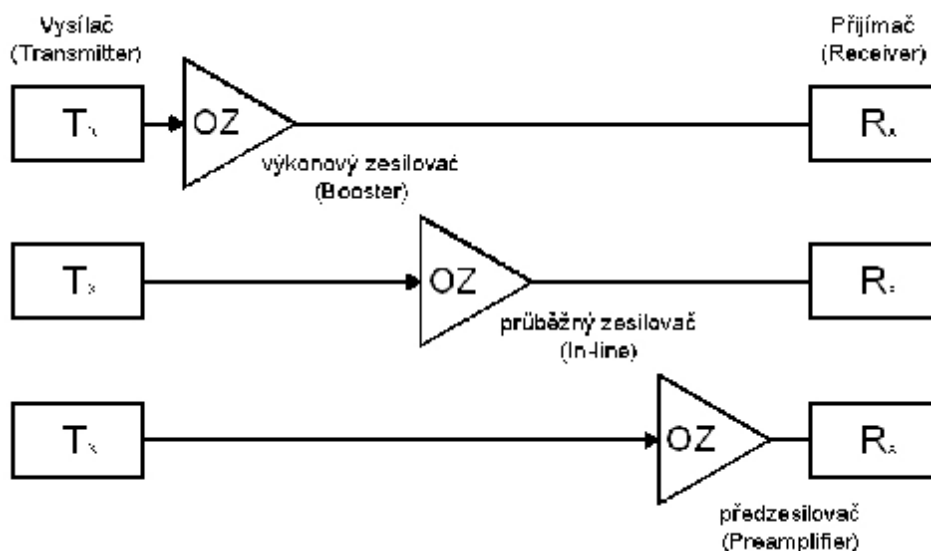
Umístujeme je na začátek optické trasy hned za vysílač. Zesilují signál na maximální úroveň, kterou lze do vlákna navázat, zároveň musí být uzpůsobeny k tomu, aby byly schopné přijmout velký vstupní signál z vysílače. Dosahují velkého výstupního saturačního výkonu a malého šumu.

##### § Průběžné zesilovače (In-line)

Průběžné zesilovače umístujeme do optické trasy. Jejich úkolem je zesilovat utlumený vstupní signál a zesilovat ho na co nejvyšší možný výstupní signál. Dochází ke kompenzaci útlumu způsobeného předchozím úsekem trasy. Zesilovače dosahují velkého zisku popřípadě velkého výstupního saturačního výkonu.

### § Předzesilovače (Preamplifier)

Zesilují velice nízké úrovně signálu na konci přenosové trasy tak, aby je byl koncový detektor schopný zpracovat. Je důležité aby předzesilovače měli co nejmenší úroveň vnitřního šumu.



Obr. 3.1: Rozmístění zesilovačů v přenosovém systému.

Optických zesilovačů můžeme využít pro kompenzace ztrát v optických sítích, např. rozvodů kabelové televize po optických vláknech (CATV). U optických rozvodů kabelových televizí je snížení úrovně signálu způsobeno především požadavkem rozdělení optického signálu do více vláken. Pomocí OZ je signál zesílen ještě před jeho rozdělením tak, aby byla dosažena stejná úroveň signálu ve výstupních vláknech jako u vlákna původního.

## 3.2 Optické vláknové zesilovače s dotací

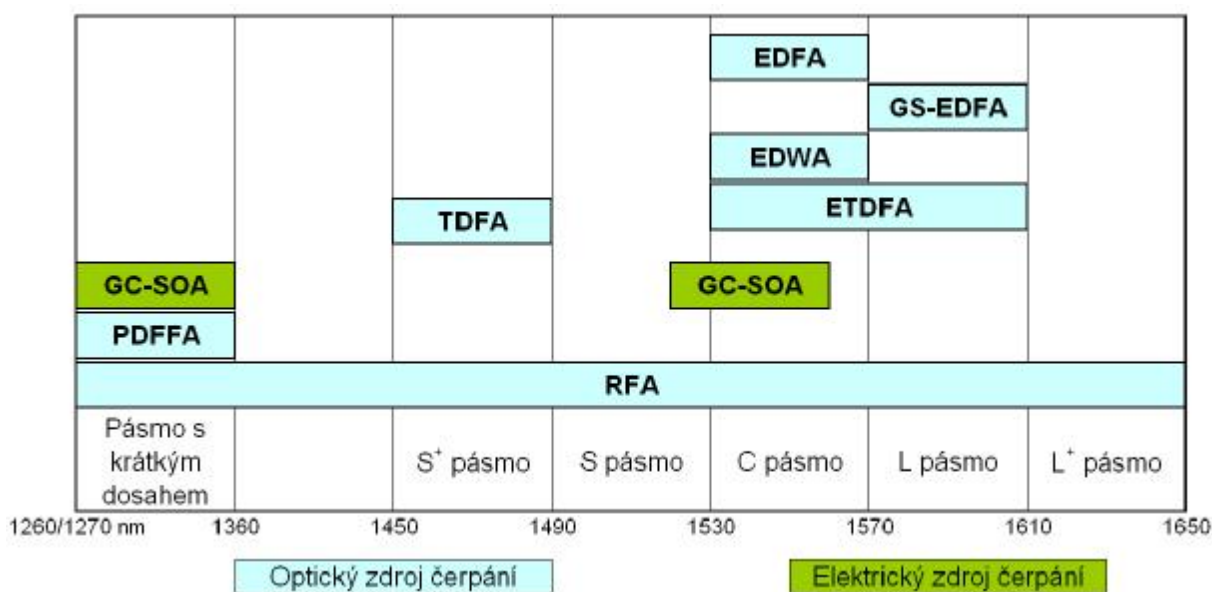
Jedná se o zesilovače, které využívají dotovaného optického vlákna jako média, které umožňuje zesílení optického signálu. Toto vlákno je rozměrově podobné normálnímu single módovému vláknu, a proto, aby bylo schopné zesilovat signál, musí být při výrobě dotováno některými vzácnými prvky. Spektrální závislosti zisku zesilovače jsou výrazně ovlivňovány volbou dopantu.

Optická vlákna mohou být dopována prvky:

- § Erbium (Er)
- § Neodymium (Nd)
- § Praseodymium (Pr)
- § Thulium (Tm)
- § Ytterbium (Yb)

Od názvu chemického prvku, který je přidán do vlákna, se odvozuje i první písmeno z označení zesilovače. Např. EDFA, PDFFA, YDFA, kde DFA znamená Doped Fibre Amplifier (dotovaný vláknový zesilovač). Nejběžnějším prvkem, který se pro dopování vláken používá, je Erbium. Při výrobě vláken je třeba dbát na správnou volbu množství dopovaného prvku, protože při velké koncentraci dotace dochází ke zhoršení účinnosti zesilovače nebo ke snížení zisku, což je způsobeno ovlivňováním atomů dopantu mezi sebou.

Různé chemické prvky přidávané do optických vláken mají různé vlastnosti. Při výběru dotujícího prvku musíme vědět, na které vlnové délce má nejvyšší účinnost zesílení. A podle toho které vlnové délky chceme zesílit vybereme i příslušný zesilovač. V následující tabulce jsou uvedeny oblasti působení optických zesilovačů s různými příměsemi.

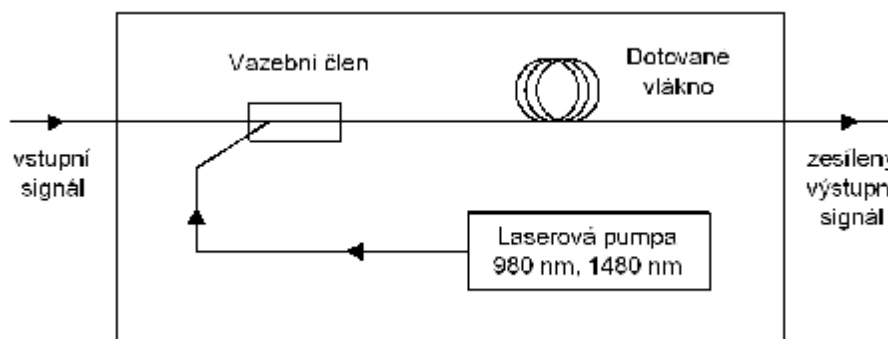


Tab. 3.1: Rozdělení zesilovačů s dotovaným vláknem podle pracovní oblasti [5].

|         |  |
|---------|--|
| EDFA    | Erbium doped fiber amplifier (Erbium dotovaný OZ) 1530 – 1570 nm                             |
| EDWA    | Erbium doped waveguide amplifier (Erbium dotovaný vlnododový zesilovač)                      |
| ETDFA   | Telluride based erbium doped fiber amplifier (Telluridový erbium dotovaný OZ) 1532 – 1608 nm |
| TDFA    | Thulium doped fluoride based fiber amplifier (Thuliem dopovaný fluoritový OZ)                |
| PDFFA   | Praseodymium-doped fluoride fiber amplifier (Praseodymiem dotovaný fluoritový OZ)            |
| GS-EDFA | Gain shifted EDFA (EDFA s posunutým ziskem)  |
| GC-SOA  | Gain clamped semiconductor optical amplifier (Polovodičový OZ)                               |
| RFA     | Raman fiber amplifier (Ramanovský OZ)  |

Princip funkce optických zesilovačů s dotací je vesměs stejný. Zesílení je dosaženo pomocí stimulované emise fotonů z iontů, které byly přidány do optického vlákna. Energie čerpacího zdroje přesune atomy dopantu do vyšší energetické hladiny. Při přechodu z vyšší

hladiny do nižší dochází k zářivému přechodu a dochází k uvolnění fotonu s jistou energií. Přejchod může být buď stimulovaný, nebo spontánní. Spontánní emise a absorpce elektronů snižují účinnost světelného zesilovače.



Obr. 3.2: Optický zesilovač s dotovaným vláknem.

## Šum

Hlavním zdrojem šumu ve vláknových zesilovačích s dotací je ASE, neboli zesílená spontánní emise, jenž má rozsah přibližně stejný jako je rozsah zisku zesilovače. Ideální úroveň šumu jsou 3 dB, ale v praxi se setkáváme se zesilovači s hodnotami šumu 6 až 8 dB.

Stejně, jako klesá elektron z vyšší energetické hladiny do nižší u řízené emise, tak klesá i při spontánní emisi, která je ovšem náhodná a závisí na struktuře skleněného vlákna. Fotony jsou emitovány spontánně ve všech směrech, ale část z nich je emitována do směru, který spadá do numerické apertury vlákna a jsou zachyceny a vedeny vláknem. Tyto ionty pak mohou vzájemně reagovat s ostatními dopovanými ionty a tak mohou být zesilovány stimulovanou emisí. Spontánní emise je tak zesílena stejným způsobem, jakým je zesílen i signál. ASE je vyzářeno zesilovačem do obou směrů přenosu, ale pouze dopředné vyzáření šumu ovlivňuje výkon systému, protože se zde spojuje se signálem, přichází do přijímače a degraduje tak výkon zesilovače.

## Saturovaný výkon

V optických zesilovačích s dotací je zisk dosažen populační inverzí dotovaných iontů. Inverze populace je takový fyzikální stav kvantové soustavy, při kterém došlo k takovému obsazení energetických hladin částicemi, které neodpovídá rovnovážnému rozdělení [6].

Úroveň inverze zesilovače je primárně dána výkonem čerpacího zdroje o určité vlnové délce a výkonem zesílení vlnových délek. Vzhledem k tomu jak se zvyšuje síla signálu, nebo klesá výkon čerpacího zdroje, tak se snižuje úroveň inverze a tím je snižován i zisk zesílení. Pojmem saturovaný výkon rozumíme, že když dochází ke zvýšení úrovně signálu, zesilovač je již nasycen a nemůže vytvořit další výstupní výkon a proto se snižuje zisk. Můžeme v této souvislosti mluvit také o kompresi zisku [7].

Pro dosažení nejvýhodnější úrovně šumu pracují optické zesilovače s dotací pod velkým saturovaným výkonem, obvykle 10 dB. To snižuje míru spontánních emisí a tak se snižuje i ASE. Další výhodou použití těchto zesilovačů v oblasti saturovaného výkonu je,



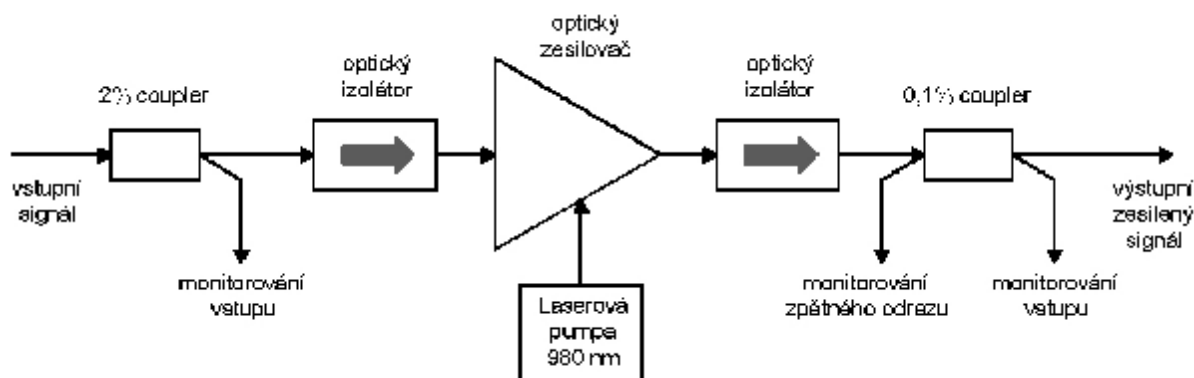
že malé kolísání výkonu vstupního signálu je minimalizováno na výstupním zesíleném signálu. Menší výkon vstupního signálu znamená vyšší (méně saturovaný) zisk, na druhou stranu vyšší vstupní výkon má za následek nižší zisk.

### 3.2.1 EDFA - Erbiem dotované optické zesilovače

Nejčastějším typem optických vláknových zesilovačů s dotací, jsou erbiem dotované zesilovače. Jejich zesilovací okno se kryje se třetím přenosovým oknem křemíkových optických vláken. Pro zesílení na třetím přenosovém okně jsou používána 2 pásma:

- § C-pásmo (C-band) – o rozpětí vlnových délek od 1525 nm do 1565 nm
- § L-pásmo (L-band) – o rozpětí vlnových délek od 1570 nm do 1610 nm

Obě dvě pásma mohou být zesilována jedním zesilovačem, ale běžně se používá dvou různých zesilovačů, které jsou optimalizované pro každé pásmo. U zesilovače pro L-pásmo se používá mnohem delšího dopovaného vlákna, což dovoluje použití nižší úrovně inverze a tak se na vyšších vlnových délkách stále dosahuje velkého zisku.



Obr. 3.4: Schéma EDFA zesilovače.

#### Dva typy čerpacích zdrojů pro EDFA

- § Čerpací laser 980 nm – má vyšší oblast útlumu a využívá se převážně tam kde je zapotřebí nižšího šumu. Útlumové pásmo je zde relativně úzké a proto je zapotřebí laserového zdroje se stabilizátorem vlnových délek. V dnešní době se používá převážně tohoto typu čerpacího zdroje. Hlavní předností je, že se s jeho využitím dosahuje menšího šumu.
- § Čerpací laser 1480 nm – má nižší, ale širší oblast útlumu a obvykle se používá pro velmi výkonné zesilovače. Zesilovače buzené těmito zdroji mají horší šumové parametry, ale dosahují větší účinnosti přeměny čerpacího výkonu na zesílený

signál. Tyto zdroje bývaly více spolehlivé a cenově dostupnější i s velkými vysílacími výkony.

V EDFA zesilovačích se využívá kombinace obou čerpacích zdrojů.

### **3.2.2 PDFA - Praseodymiem dotované optické zesilovače**

Tyto zesilovače pracují na stejném principu jako EDFA zesilovače, jen využívají optického vlákna s příměsí praseodymia. PDFA zesilovače lze využít k zesílení datových přenosových systémů nebo signálů CATV v pásmu 1310 nm. Umožňují překlenutí vyššího měrného útlumu optických vláken a také dosahují velmi nízkých hodnot chromatické disperse i pro přenosy na velkou vzdálenost. Umístování kompenzátorů chromatické disperse totiž značně zvyšuje náklady na vysokorychlostní dálkové přenosové trasy.

### **3.2.3 TDFA - Thliem dotované optické zesilovače**

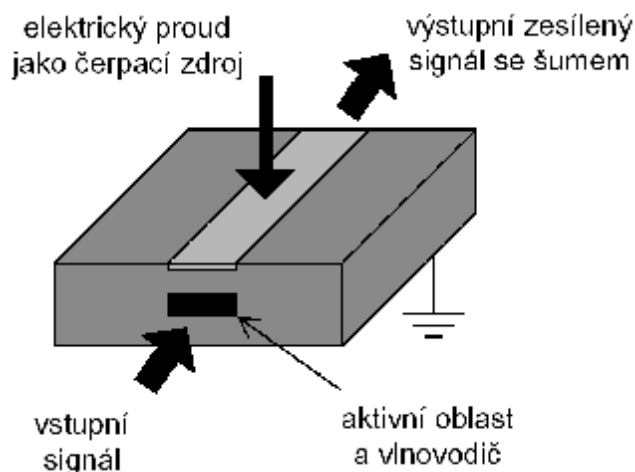
V současnosti je většina TDFA modulů založena na fluoridových thliem dopovaných vláknech (TDF), které mají nízkou fononovou energii. Fluoridová vlákna se hůře vyrábějí a mají menší odolnost vůči vnějším vlivům. Jsou také nekompatibilní se standardními telekomunikačními optickými vlákny. Využívají se pro zesílení signálu v oblasti S-pásma. Tato oblast pásma ale není příliš využívána pro komerční použití a tak se tyto zesilovače nevyužívají a nevyvíjí v takové míře jako zesilovače EDFA.

### **3.2.4 YDFA - Yterbiem dotované optické zesilovače**

Tyto zesilovače pracují v pásmu vlnových délek okolo 1  $\mu\text{m}$ , kde dosahují velkého výstupního výkonu a zesílení. Využívají se ve velké míře v průmyslu, převážně při zpracování materiálů.

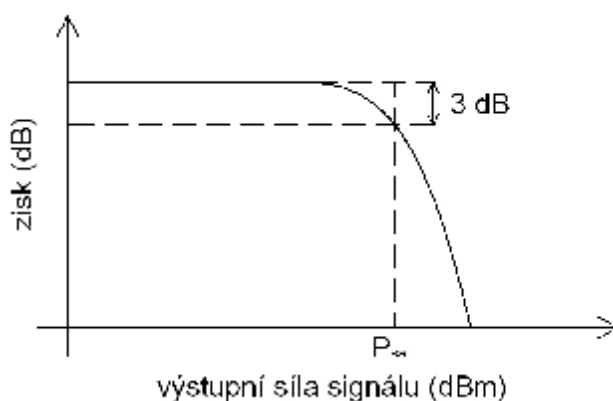
## **3.3 Polovodičové optické zesilovače**

Tento druh zesilovačů využívá polovodičové prvky k tomu, aby na optickém vlákne vybudily patřičný zisk. Zesilovače jsou napájené elektrickým proudem a zisk je do výstupního signálu dodáván pomocí stimulované emise (viz obr. 3.5). Výstupní signál ovšem také obsahuje šum (ASE), který je způsobený zesílením spontánní emise. Polovodičové optické zesilovače jsou velmi citlivé na polarizaci světla a to především z důvodů struktury vlnovodů a zisku materiálu z nichž jsou vyrobeny.



Obr. 3.5: Schéma polovodičového zesilovače.

Zisk těchto zesilovačů je do značné míry ovlivněn silou vstupního signálu a šumem, který vzniká při zesilovacím procesu. Z grafu (obr. 3.6) vidíme, že rostoucí síla vstupního signálu má za následek pokles zisku. Tento saturovaný zisk může způsobit značné zkreslení signálu a může také omezit zisk, kterého jsou schopny polovodičové zesilovače dosáhnout při použití jako vícekanálové zesilovače v multiplexních systémech s dělením vlnové délky (WDM). Dalším negativním faktorem je, že zisk rychle reaguje na změny způsobené čerpacím zdrojem, což u vícekanálových přenosů může způsobovat mezikanálové přeslechy [7].



Obr. 3.6: Graf závislosti síly výstupního signálu na zisku polovodičového OZ.

Polovodičové OZ pracují na vlnových délkách od 850 nm do 1600nm a generují zisk až do 30 dB. V optickém přenosovém systému mohou být použity výkonové zesilovače pro zvýšení vysílačích výkonů laseru, jako průběžné zesilovače pro vyrovnání ztrát na optickém přenosovém systému na středních a dlouhých trasách a jako předzesilovače pro zlepšení citlivosti přijímače.

Polovodičové zesilovače vykazují nelineární chování, které může způsobit problémy, jako je kolísání kmitočtu a vytváření mezimodulačních produktů [8]. Na druhou stranu mohou být tyto nelinearity výhodou a umožňují využití polovodičových optických zesilovačů jako

funkčních zařízení pro plně optické sítě – sítě bez využití elektronických prvků, neboť elektronické prvky bývají většinou tzv. úzkým hrdlem ve vysokorychlostních optických přenosových systémech. Využívají se např. jako převodníky vlnových délek, optické přepínače, multiplexory, atd.

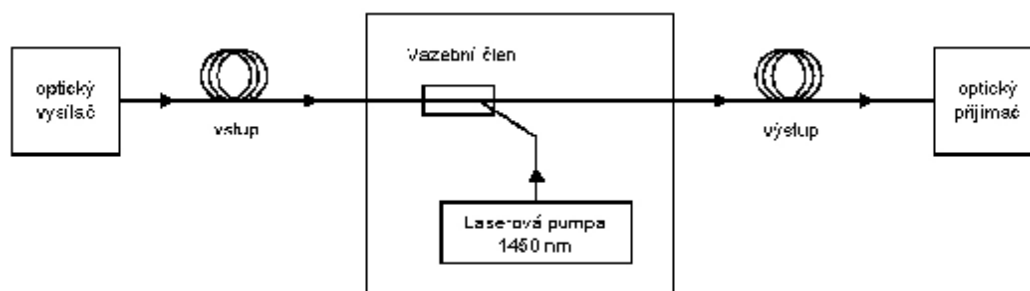
Tab. 3.2: Porovnání OZ s vláknovou dotací s polovodičovými OZ.

| Vlastnosti  | vláknový z.  | polovodičový z. |
|---|--------------|-----------------|
| Maximální zisk (dB)                                     | 30 - 50      | 30              |
| Vložný útlum (dB)                                       | 0,1 - 2      | 6 - 10          |
| Polarizační citlivost                                   | ne           | slabá (< 2dB)   |
| Čerpací zdroj   | optický      | elektrický      |
| Šířka pásma 3 dB zisku (nm)                             | 30           | 30 - 50         |
| Účinky nelinearit                                       | zanedbatelné | ano             |
| Výstupní saturovaný výkon (dBm)                         | 10 -15       | 5 - 20          |
| Úroveň šumu   | 3 - 5 dB     | 7 - 12 dBm      |
| Kompatibilní s integrovanými obvody?                    | ne           | ano             |
| Využití jako funkčních zařízení v celooptických sítích? | ne           | ano             |

V porovnání s EDFA (viz. tab. 3.2) jsou polovodičové zesilovače menší, levnější a v celooptických sítích mohou zastávat různé funkce. Ke svému provozu vyžadují však napájení elektrickým proudem. Jejich nevýhodou ovšem je, že dosahují vyššího šumu, nižšího zisku a vysokých nelinearit při vysokých přenosových rychlostech.

### 3.4 Ramanovské optické zesilovače

Ramanovské zesilovače používáme také pro zesilování optických signálů. Jedná se prakticky pouze o laserový zdroj záření, který je připojen na optickou trasu. Princip Ramanovského zesilovače spočívá ve vytvoření stimulovaného Ramanova rozptylu na částicích materiálu vlnovodu [7]. Při tomto rozptylu dochází k přenosu energie z nižších vlnových délek Ramanovské pumpy na vyšší vlnové délky přenášeného signálu. Tak dochází k zesílení signálu. Zapojení Ramanovského zesilovače do optické trasy je zobrazeno na obrázku 3.7.



Obr. 3.7: Zapojení Ramanovského zesilovače do optické trasy.

K zesílení signálu dochází přímo ve vlastním vlákně přenosové trasy a není zde tedy potřeba žádného speciálního vlákna. Další výhodou těchto zesilovačů je, že jsou schopny pracovat na širokém spektru vlnových délek a dají se lehce použít pro zesílení požadované vlnové délky, stačí jen vhodně zvolit vlnovou délku laserového zdroje. Zesilovače se umísťují na konec přenosového vlákna, neboť záření z laserové pumpy se šíří proti zesilovanému signálu. Ramanovské zesilovače nedosahují takových hodnot zesílení jako EDFA nebo polovodičové zesilovače a jejich výkon také nepříznivě ovlivňuje šum způsobený zesílením spontánní emise (ASE). Tyto zesilovače jsou schopny zvýšit úroveň signálu přibližně o 15 až 20 dB.

## 4 Výběr optického zesilovače pro laboratorní výuku

Součástí této práce je také výběr vhodného optického zesilovače, který by bylo možné použít pro laboratorní výuku v předmětu Optické sítě. V předchozích kapitolách byly popsány jednotlivé typy optických zesilovačů a nyní se zaměříme na konkrétní produkty od různých výrobců.

Jedním z dodavatelů optických zesilovačů je na českém trhu firma Safibra s.r.o.[9], která nabízí velký výběr optických zesilovačů pro široké použití, především zesilovače od francouzské firmy Keopsys. Na našem trhu působí také firma Optokon CO., Ltd., která je mimo jiné výrobcem zesilovačů CzechLight Amplifier (CLA).

### 4.1 Zesilovače CzechLight

Optické zesilovače CzechLight jsou vyráběny firmou Optokon. Díky jejich nízké hladině šumu a vysoké výkonnosti EDFA zesilovače hraje jejich nasazení významnou roli v oblasti optických přenosových sítí. CzechLight EDFA zesilovače v sobě zahrnují jak předzesilovač, tak výkonový i průběžný zesilovač. Jejich ovládání a nastavování je umožněno pomocí připojení monitoru a klávesnice, nebo vzdáleně přes sériové rozhraní RS-232 a nebo přes internet. K dispozici jsou také různé režimy řízení na každém stupni: automatické řízení zisku (AGC – automatic gain control), automatické řízení výkonu (APC – automatic power control) a automatické řízení proudu (ACC – automatic current control) [10].

#### Vlastnosti

- § Výstupní saturační výkon od 5 do 27 dBm
- § Nízká úroveň šumu
- § Široké spektrum vlnových délek
- § Nízká spotřeba
- § Řízení mikropočítačem

#### Využití

- § Mnohokanálové zesilování (např. DWDM)
- § Jednokanálové zesilování (např. CATV)
- § Jako výkonový, průběžný a předzesilovač

#### Obecné vlastnosti

- § Napájení 100 – 230 V AC / 48 VDC
- § Příkon do 150 W (obvykle 50 W)
- § Rozměry 88 x 430 x 300 mm (v x š x h)
- § Rozhraní USB, Ethernet, RS232

## 4.2 WDM optický zesilovač C-pásma

Tento erbiem dotovaný optický zesilovač je určený pro WDM přenosové systémy a aplikace. Patří do skupiny produktů, které jsou typické plochým průběhem zisku v celém požadovaném pásmu při současném vysokém výkonu. Velmi vysokého výstupního saturevaného výkonu je zde docíleno díky čerpací technologii Keopsys VPS®. Zesilovač vykazuje výborné šumové vlastnosti [11].

### Vlastnosti

- § Výstupní saturační výkon od 13 do 30 dBm
- § Šířka pásma 1529 – 1562 nm do 23 dBm
- § Šířka pásma 1530 – 1562 nm nad 23 dBm
- § Plochý průběh zisku na celém C-pásmu
- § Nízká úroveň šumu

### Využití

- § WDM linkový zesilovač
- § WDM předzesilovač
- § WDM výkonový zesilovač
- § 40 – 160 GHz přenosové systémy
- § Metropolitní sítě a sítě na dlouhé a velmi dlouhé vzdálenosti

### Obecné vlastnosti

- § Napájení 85 – 264 V AC
- § Příkon 30 – 100 W (záleží na výstupním výkonu)
- § Pracovní teplota +15 / +35 °C
- § Rozměry 88 x 448 x 446 mm (v x š x h)
- § Typ vlákna SMF28

## 4.3 1.0 mm Yterbiový vláknový zesilovač

Tento vysoce výkonný Yterbiový zesilovač od společnosti Keopsys využívá dvoustupňovou architekturu a je složen z výkonového zesilovače a z předzesilovače. Oba dva stupně využívají efektivní yterbiem dopované dvouplášťové jádro čerpané laserovou diodou. Pomocí speciální metody zvané V-groove Side dumping (VSP® technology), je optický výkon efektivně navázán do optického vlákna. Tento zesilovač byl navržen pro vědecké a vojenské aplikace. Vysokého výstupního výkonu je dosahováno v pásmu vlnových délek od 1050 nm do 1110 nm [12].

### **Vlastnosti**

- § Výstupní saturevaný výkon až 20 W
- § Šířka čáry vstupního signálu více jak 100MHz
- § Automatické řízení proudu (ACC)
- § Automatické řízení výkonu (APC) až do 5 W
- § GPIB a RS232 rozhraní
- § Možnost rozšíření pracovního optického pásma dle požadavků
- § Bezpečnostní zajištění proti ztrátám vstupního signálu

### **Využití**

- § Zpracování materiálu
- § Pumpy pro ramanovské konvertory
- § Heliové čerpání
- § Spektroskopie, měření absorpce plynu
- § Akustické snímání
- § Lékařství

### **Obecné vlastnosti**

- § Napájení 85 – 264 V AC
- § Příkon do 250 W (záleží na výstupním výkonu)
- § Pracovní teplota +15 / +35 °C
- § Rozměry 88 x 448 x 446 mm (v x š x h)
- § Typ vlákna SMF28  
PM0.98

## **4.4 Ramanovský zesilovač**

Společnost Keopsys dodává na trh ramanovské zesilovače, které jsou založeny na 1 μm yterbiové vláknovém laseru, který využívá k navázání záření do vlákna speciální dvouplášťová optická vlákna. Tyto vlákna jsou čerpána vysoce výkonnými a spolehlivými laserovými diodami. Tento Ramanovský zesilovač je vhodný jak pro zesilování signálu v přenosových systémech, tak pro testovací stanice a výzkumné laboratoře [13].

### **Vlastnosti**

- § standardní vlnové délky 1455 nm a 1480 nm
- § Automatické řízení proudu (ACC)
- § Automatické řízení výkonu (APC)
- § kompaktní velikost, k instalaci do racku
- § zabudovaný zpětnovazební optický monitor



## Využití

- § distribuované DWDM ramanovské zesilování
- § Telcordia odborná kvalifikace pasivních komponent
- § vzdálené čerpání EDFA bloků
- § struktura děleného čerpání
- § vysoko výkonový čerpací zdroj

## Obecné vlastnosti

- § Napájení 85 – 264 V AC
- § Příkon do 150 W (záleží na výstupním výkonu)
- § Pracovní teplota +15 / +35 °C
- § Rozměry 88 x 448 x 446 mm (v x š x h)
- § Typ vlákna SMF28

Pro laboratorní výuku k předmětu Optické sítě byl z výše uvedených přístrojů vybrán optický zesilovač CzechLight od firmy Optokon. Toto zařízení může být v rámci přenosového optického systému umístěno jako výkonový i průběžný zesilovač, tak i jako předzesilovač. Pomocí místní nebo vzdálené správy, lze na zesilovači měnit nastavení a různé režimy zesílení. Díky těmto možnostem různého nastavení a zapojení je tento zesilovač vhodný pro širší využití jak v praxi tak v laboratorní výuce.

## 5 Využití optických EDFA zesilovačů

EDFA optické zesilovače, se stejně jako jiné zesilovače, využívají na dlouhých přenosových trasách jak datových tak telekomunikačních přenosů. Jejich použití je vhodné pro zesilování jednokanálových přenosů i pro vícekanálové přenosy WDM, protože EDFA zesilovač zesiluje všechny kanály najednou. Využití EDFA zesilovačů je také možné pro kompenzaci ztrát u optických rozvodů kabelových televizí (CATV).

### 5.1 Využití v přenosech WDM

Vlnový multiplex WDM (Wavelength Division Multiplex) sdružuje více optických kanálů, které byly dříve přenášeny po samostatných vláknech, do jednoho vlákna. Využívá se zde principu vlnového, čili v podstatě frekvenčního oddělení, kdy je možné na jedno optické vlákno namodulovat až 41 vlnových délek. Rozpětí vlnových délek se pohybuje dle doporučení ITU-T G.692 v rozmezí od 1528,77 do 1560,61 nm. Jednotlivé vlnové délky jsou od sebe vzdáleny přibližně 0,8 nm a proto se hovoří také o tzv. hustém vlnovém multiplexu DWDM (Dense WDM) [14].

Optický zesilovač EDFA je pro přenosy WDM velmi důležitý, protože dokáže zesílit všechny optické kanály WDM signálu najednou, bez nutnosti převodu optického signálu na elektrický a naopak. Optický zesilovač je na přenosu bitově a protokolově nezávislý. Zisk zesilovače musí být přibližně konstantní na celém spektrálním oboru signálu WDM, aby byl každý kanál zesilován stejně. V případě dlouhých přenosových tras je možné do systému zapojit více zesilovačů a zde se může rozdíl zisku na jednotlivých vlnových délkách projevit nejvíce, protože při průchodu signálu několika zesilovači se jejich přenosová funkce násobí a případné rozdíly na spektrálním profilu zisku jsou tedy významnější.

### 5.2 Využití v CATV

V dnešní době se již můžeme setkat s rozvodem signálu kabelové televize (CATV) pomocí optických vláken až ke koncovému uživateli v rámci tzv. FTTH (Fibre To The Home). Televizní signál je veden jedním optickým vláknem a na konci přenosové trasy je jej třeba rozdělit do více vláken pro několik koncových uživatelů. Pro rozdělení optického signálu do více směrů se používají splittery s několika výstupy, které dělí výstupní signál rovnoměrně nebo v daném poměru.

U optických rozvodů kabelových televizí je snížení úrovně signálu způsobeno především požadavkem rozdělení optického signálu do více vláken. Pomocí EDFA zesilovače je signál zesílen ještě před jeho rozdělením tak, aby byla dosažena stejná úroveň signálu ve výstupních vláknech jako u vlákna původního [15]. V této oblasti se tedy využívají především předzesilovače, které dokáží zesílit signál s nízkým výkonem na požadovaný výkon.

## 6 Praktické měření

Předmětem praktického měření byl EDFA optický zesilovač CLA-PB01F od firmy Optokon. Tato specifikace byla nastavena pro využití zesilovače jako předzesilovače, který na vstupu může přijímat velmi nízkou úroveň signálu a na výstupu poskytuje dostatečný výstupní výkon pro zpracování přijímačem signálu. Měření bylo zaměřeno na zesilovací výkon zesilovače a výstupem z měření měla být závislost vstupního výkonu na výkonu výstupním.

### 6.1 Použité přístroje

Při měření výkonové charakteristiky na optickém EDFA zesilovači CzechLight Amplifier PB01F byly pro zdroj signálu a pro měření použity moduly univerzální jednotky UMS-10. Pomocí optického útlumového článku OFA-420 byl nastavován útlum signálu v přenosovém systému. Splitter SFT-TAP-AT-10 dělil výstupní zesílený signál a 10% výstupního výkonu přiváděl do měřícího přístroje. Všechna uvedená zařízení jsou produkty firmy Optokon.

#### 6.1.1 EDFA optický zesilovač CLA–PB01F

Použitý erbiem dotovaný optický zesilovač CLA-PB01F [16,17], od českého výrobce firmy Optokon, patří do rodiny výkonných zesilovačů s nízkým šumem, umožňuje nastavení zesílení i jiných parametrů dle potřeby přenosového systému. Je určený pro zesílení velkého počtu kanálů s plochou charakteristikou zisku.

Dostupné řídicí módy:

AGC (automatic gain control) – automatické řízení zisku.

APC (automatic power control) – automatické řízení výkonu.

ACC (automatic current control) – automatické řízení proudu.

#### Vlastnosti CLA-PB01F

Zesilovač vykazuje velmi nízký útlum a je schopný pokrýt široké spektrum vlnových délek. Zařízení obsahuje dva EDFA zesilovací moduly – výkonový zesilovač o výkonu až 30 dBm a předzesilovač. Saturační výkon tohoto typu zesilovače je výrobcem stanoven na 5 dBm [17].

Tab. 6.1: Parametry použitého optického zesilovače CLA-PB01F.

|                          | MIN  | MAX  | jednotky |
|--------------------------|------|------|----------|
| Vlnová délka signálu     | 1535 | 1565 | nm       |
| Vstupní optický výkon    | -30  | -10  | dBm      |
| Nominální zisk           |      | 30   | dB       |
| Saturační výstupní výkon | 5    |      | dBm      |

Součástí zesilovače je také mikropočítač s operačním systémem LINUX, který zesilovač řídí. Přes RS-232, Ethernet a USB rozhraní je umožněna vzdálené správa a komunikace se zesilovačem. Na přání je možno doplnit bezdrátové rozhraní GSM, Wi-Fi nebo Bluetooth. Pro vzdálený přístup a správu slouží příkazový řádek přes SSH. Varovné zprávy v případě problémů mohou být uživateli zasílány prostřednictvím e-mailů a všechny důležité provozní stavy jsou indikovány LED-diodami na čelním panelu zesilovače.

Při zacházení se zesilovačem je třeba řídit se bezpečnostními pravidly pro práci s lasery třídy 3B. Laser třídy 3B může poškodit zrak při přímém pohledu do světelného paprsku, ale odraz od papíru nebo podobného matného materiálu je neškodný. V prostředí v němž se může vyskytnout přímé vyzařování laserových paprsků třídy 3B je nutné používat prostředky k ochraně zraku. Lasery třídy 3B musí být vybaveny zámkem s bezpečnostním klíčem.

Napájení je řešeno dvěma jednotkami, kdy jedna je hlavní a druhá slouží pro připojení UPS a je záložní. Napájecí napětí 100-230 V AC nebo 48 V DC. Spotřeba 50-150 W.

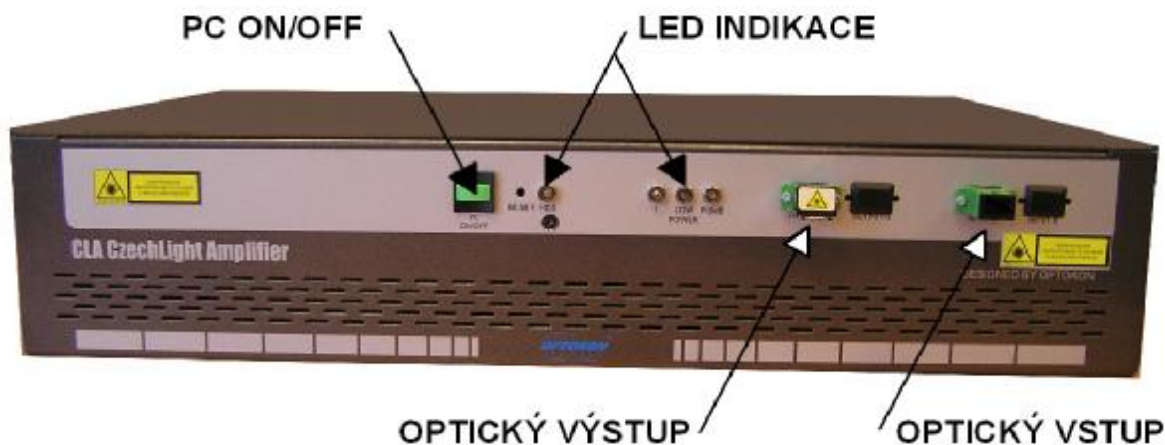
Rozměry: 430x300x88 mm (š x h x v).

## Ovládání zesilovače

Pro lokální ovládání a komunikaci se zařízením může být k zesilovači, respektive k mikropočítači, připojen monitor a klávesnice. Druhou možností je připojení přes rozhraní sériového portu RS-232 s modulační rychlostí 9600 Bd. Ovládání přes sériové rozhraní je umožněno například programem Hyper Terminal.

Zařízení je možné plně ovládat i pomocí vzdáleného přístupu přes internet, protokolem SSH. Pro vzdálený přístup musí být správně nastaveny síťové volby a správně musí být nastaven i firewall, který brání proti nežádoucím útokům z internetu.

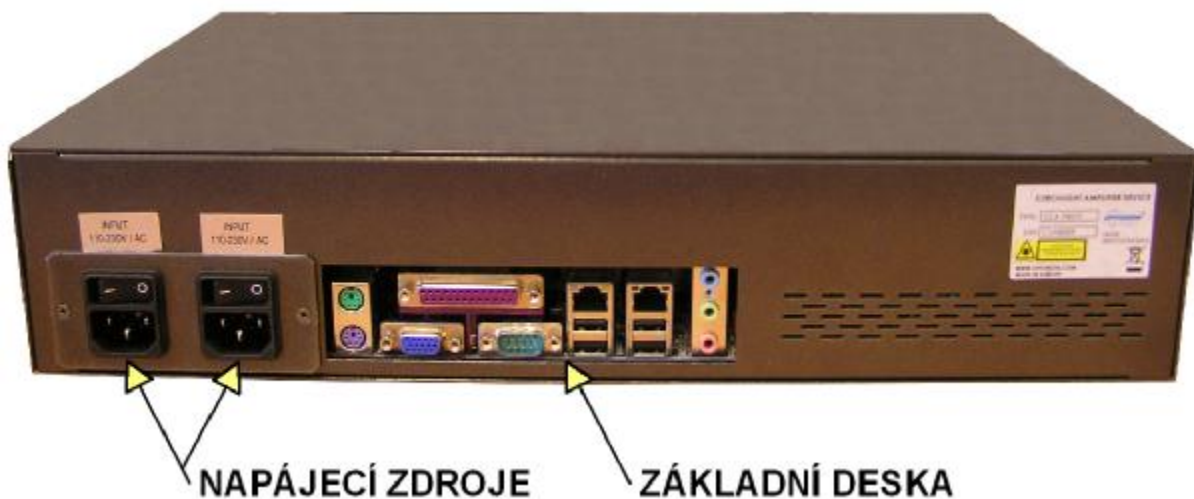
Připojení je realizováno v rámci ethernetové sítě (rychlost 10/100 Mbit.s<sup>-1</sup>), konektorem RJ-45. V případě, že není ethernetová síť dostupná, je možno využít bezdrátového spojení pomocí GPS/GPRS, nebo Wi-Fi sítě. Varovné e-maily v případě poruch na zesilovači jsou zaslány prostřednictvím e-mailu.



Obr. 6.1: Optický zesilovač EDFA CLA-PB01F – čelní strana

Signalizace pomocí LED diod na čelním panelu zesilovače slouží pro indikaci případných poplachových stavů na modulech zesilovače.

- § Červená LED – kritická signalizace– teplota čerpacích diod nebo modulu překračuje přípustné meze, čerpací proud překročil limit.
- § Žlutá LED – signalizace ztráty vstupního/výstupního výkonu – vstupní a/nebo výstupní výkon je mimo příslušné meze.
- § Modrá LED – signalizace čerpání – proudy čerpacích diod jsou vyšší než úroveň proudu a na výstupu zařízení může být zesílený optický signál.



Obr. 6.2: Optický zesilovač EDFA CLA-PB01F – zadní strana

### Spuštění zesilovače

Napájecí kabel se zapojuje do jednoho napájecího konektoru na zadní straně zesilovače. Druhý napájecí konektor slouží pro připojení záložního napájení ze zařízení UPS.

Pro změnu nastavení optického zesilovače, je třeba připojit monitor a klávesnici do příslušných konektorů na zadní straně přístroje.

Pro spuštění je třeba zapnout aspoň jeden napájecí zdroj, po jeho spuštění se roztočí ventilátory chlazení. Zabudovaný počítač se spustí zeleným vypínačem na čelním panelu. Jeho činnost po spuštění systému indikuje zelená LED dioda. Jakmile je počítač spuštěn a systém běží, jsou inicializovány moduly zesilovače a zaváděcí proces je ukončen. Nyní je zesilovač připraven k použití a pomocí řídicích příkazů je možné měnit jeho nastavení nebo zesilovací režimy.

## **Nastavení OS zesilovače**

Síťové vlastnosti zesilovače, jako je IP adresa, výchozí brána, DNS server a hostname zesilovače, jsou nastaveny v příslušných souborech a pomocí skriptů uložených v počítači zesilovače a inicializovány po startu systému.

Konfigurace firewallu je řízena skriptem */etc/rc.d/rc.iptables*, ve kterém je definováno, se kterými IP adresami může zesilovač komunikovat. Při vypnutí firewallu je zařízení dostupné z celé sítě. Změnu povoleného rozsahu adres je třeba provést přímo úpravou příslušného skriptu.

Pro odchozí emailové zprávy informující o případných problémech je třeba správně nakonfigurovat emailový server. SMTP server běží na lokálním portu 25, prostřednictvím SSH tunelu umožňuje bezpečný přenos emailů přes SSH a je přístupný těm klientům, kteří SSH právě nepodporují. Konfigurační soubor se nachází v */usr/local/etc/stunnel/stunnel.conf*. Pro správnou funkčnost přístupu ke vzdálenému serveru musí být správně nastavený firewall.

Flash disk mikropočítače je chráněn proti zápisu a je z něj možné pouze číst. Pokud chceme na disk ukládat data, je nutné povolit zápis příkazem

```
mount -o remount,rw,noatime /dev/hda1
```

Pro zakázání zápisu a povolení pouze čtení použijeme naopak příkaz

```
mount -o remount,ro /dev/hda1
```

Pro běžné operace je zapotřebí, aby byl disk chráněn proti zápisu, neboť časté zapisování by mohlo flash disk poničit.

## **Skripty pro ovládání zesilovače**

Pro daný typ zesilovače jsou napsány různé skripty usnadňující práci se zařízením. Všechny skripty jsou uloženy v adresáři */usr/local/edfa/*. Jedná se například o skript pro konfiguraci a nastavení zesilovače, skript spuštěný po startu, který spouští programy umožňující komunikaci s moduly zesilovače, skript vypisující parametry zařízení (napájecí napětí, rychlost otáček větráků a teplotu uvnitř zařízení) a například skript pro periodickou kontrolu funkčnosti modulů zesilovače.

## Příkazy pro ovládání zesilovače

Ovládání zesilovače pomocí sběrnice RS-232 lze provádět speciálními příkazy. Lze jimi nastavovat vlastnosti zařízení nebo zjišťovat informace na jednotlivých zesilovačích v modulu. V modulu se nachází dva zesilovače (předzesilovač a výkonový zesilovač), proto je třeba rozlišovat, který příkaz platí pro který zesilovač.

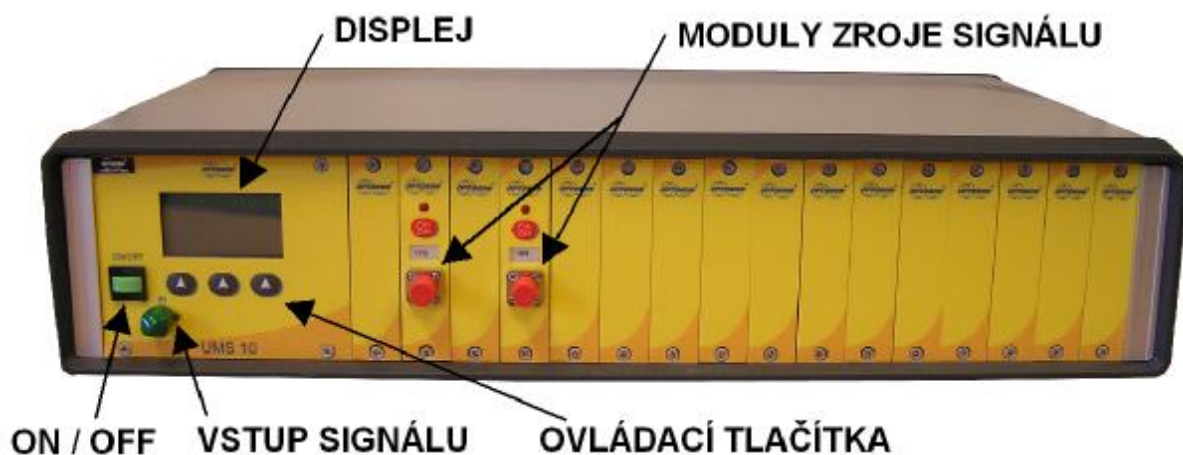
Příkazy se musí zadávat s patřičnou syntaxí. Důraz je kladen na použití vždy jen jedné mezery a každý příkaz musí být ukončen klávesou enter.

### 6.1.2 Univerzální jednotka pro testovací moduly UMS-10

Modulární systém UMS-10 představuje univerzální šasi pro testovací moduly a slouží pro měření absolutního a relativního optického výkonu v optických sítích. Jeho využití je široké jak při výrobě optických vláken a komponentů tak při budování optických sítí a jejich údržbě. Hodí se také do laboratoří, výzkumných a vývojových ústavů [18].

#### Vlastnosti UMS-10

Jednotka UMS-10 může být vybavena mnoha typy zásuvných modulů. Řídící jednotka obsahuje modul pro měření optického výkonu s vysokokapacitní pamětí, která umožňuje uložit naměřená data i s informacemi o čísle měřeného vlákna, vlnové délce a absolutní nebo relativní hodnotě měření. Data uložená v paměti přístroje mohou být jednoduše přes USB rozhraní exportována do počítače a mohou být zpracována tabulkovým kalkulátorem, nebo jinou aplikací.



Obr. 6.3: Univerzální jednotka pro testovací moduly UMS-10

Až 16 modulů světelných zdrojů může být použito v jednotce UMS-10. Těmito různými zdroji lze pokrýt celé spektrum vlnových délek používaných v optických přenosech. Kromě těchto standardních zdrojů záření mohou být použity i další pomocné jednotky –

útlumové moduly, moduly sdružovačů, či rozdělovačů signálu, moduly optických přepínačů atd.

Při práci s tímto zařízením je nutno řídit se bezpečnostními pravidly pro práci s lasery třídy 1. Laser třídy 1 je bezpečný při normálním použití, to znamená že nemůže být překročena hranice dovoleného maximálního záření.

## Technické parametry

### Modul měření výkonu

vlnové délky: 850, 1300, 1310, 1490, 1550, 1625 nm

neurčitost: +/- 5%

rozlišení: 0,01

dynamický rozsah: -60 dBm - +10 dBm (pro 1300, 1310, 1490, 1550, 1625 nm)  
-53 dBm - +17 dBm (pro 850 nm)

### Modul světelného zdroje

výstupní výkon:

LD 850, LED 850, 1300 nm: -20 dBm

LD 1310, 1490, 1550, 1625 nm: -9 dBm (Standard), 0 dBm (Premium)

stabilita:

LD 850, LED 850, 1300 nm: +/-0,03 dB

LD 1310, 1490, 1550, 1625 nm: +/-0,05 dB

Korekce výstupního výkonu: +/-1 dB

### Šasi

provozní teplota: -10 - +50 °C

rozměry: 471x103x271 mm (š x v x h)

Pro naše měření byla k dispozici universální jednotka se dvěma moduly světelného zdroje o vlnové délce 1310 nm a 1550 nm. Byl využit světelný zdroj o vlnové délce 1550 nm a zabudovaný měřicí přístroj pro odečítání výstupního výkonu ze zesilovače.

## Ovládání

Po připojení napájecího kabelu a zapnutí hlavního vypínače řídicí jednotky na čelní straně přístroje se na displeji zobrazí typ, verze firmwaru a sériové číslo přístroje.

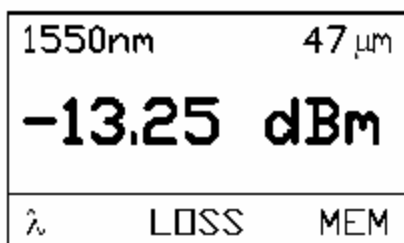
Modul pro měření výkonu se spustí v režimu měření absolutního výkonu a s nastavenou vlnovou délkou dle posledního měření.

Jednotlivé moduly světelných zdrojů můžeme zapnout až po řídicí jednotce. Zapínány a vypínány mohou být libovolně dle potřeby. Vypnutím řídicí jednotky dojde také k vypnutí všech modulů zdrojů světla i jiných doplňkových modulů.



## Režim měření absolutního výkonu

V režimu pro měření absolutního výkonu se na displeji zobrazuje absolutní hodnota optického signálu v dBm.



Obr. 6.4: Režim měření absolutního výkonu

### Funkční tlačítka

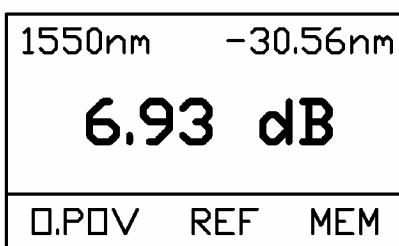
λ - zvolí jednu z dostupných vlnových délek

LOSS – přepne do režimu měření relativního výkonu

MEM – spustí menu paměti

## Režim měření relativního výkonu

V režimu pro měření relativního výkonu se na displeji zobrazuje relativní hodnota optického výkonu v dB, vztažená k referenční hodnotě výkonu optického signálu, zobrazené v pravém horním rohu displeje.



Obr. 6.5: Režim měření relativního výkonu

### Funkční tlačítka

O.POV - přepne zpět do režimu měření absolutního výkonu

REF – nastaví a uloží novou referenční hodnotu pro vybranou vlnovou délku

MEM – spustí menu paměti

## Paměť měřicího modulu

Paměť měřicího modulu nabízí dvouúrovňovou organizační strukturu, kde jsou hodnoty ukládány do adresářů reprezentující měřené kabely a v nich dále číslovány dle jednotlivých měření. Paměť umožňuje uložit až 512 záznamů měření.

Při práci s pamětí jsou umožněny běžné operace, jako je ukládání výsledků měření do paměti, zobrazování záznamů, jejich mazání a také možnost exportu naměřených hodnot do počítače. Propojení měřicího přístroje a počítače je přes rozhraní USB. V PC musí být nainstalovány ovladače k zařízení a spojení musí být řádně nakonfigurováno (lze nastavit v programu Hyper Terminal).

### 6.1.3 Optický útlumový článek OFA-420

Optický útlumový článek představuje zařízení, které umožňuje digitálně nastavit úbytek výkonu optického signálu na optickém vlákně. Jedná se o kompaktní přenosné zařízení, vhodné pro certifikaci opto-vláknových tras, jejich běžnou údržbu a vhodné je také pro laboratorní účely [19].



Obr. 6.6: Optický útlumový článek OFA-420

#### Vlastnosti

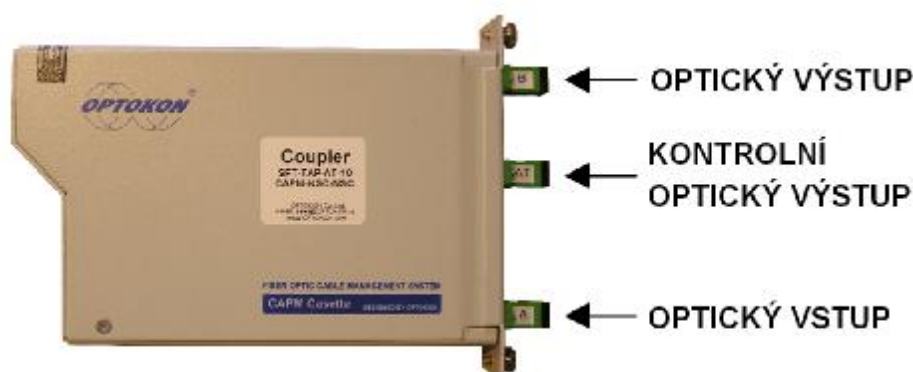
- nízký vložený útlum
- široký rozsah útlumu
- tři útlumové kroky: 10 dB, 1,0 dB, 0,1 dB

## Technické parametry

|                               |                          |
|-------------------------------|--------------------------|
| kalibrováno pro vlnové délky: | 1310, 1550 nm            |
| typ vlákna:                   | 9/125 $\mu\text{m}$      |
| rozsah útlumu                 | 2 – 60 dB                |
| maximální vstupní výkon:      | 24 dBm                   |
| vložný útlum:                 | < 2 dB                   |
| typy konektorů:               | FC/PC, SC/PC, ST/PC      |
| provozní teplota:             | -10 - +50 °C             |
| rozměry:                      | 160x76x45 mm (v x š x h) |

### 6.1.4 Splitter SFT-TAP-AT-10

Optický rozdělovač kanálů SFT-TAP-AT-10 (Test Access Point splitter) slouží pro sledování činnosti optických sítí. Procházející signál je rozdělen v určitém poměru do výstupního konektoru a do konektoru sledovacího [20]. Dle požadavků může splitter monitorovat optické vlákno jednosměrně, či obousměrně v rozsahu vlnových délek celého CWDM spektra. Dělicí poměr sledovacích portů je nastaven na 1:10.



Obr. 6.7: Splitter SFT-TAP-AT-10

Splittery se vyrábí v různých provedeních, s různými počty konektorů, což zvyšuje možnosti jejich uplatnění v optických sítích. Mohou být instalovány do šasi, nebo dodávány zvlášť v samostatném provedení.

### Vlastnosti

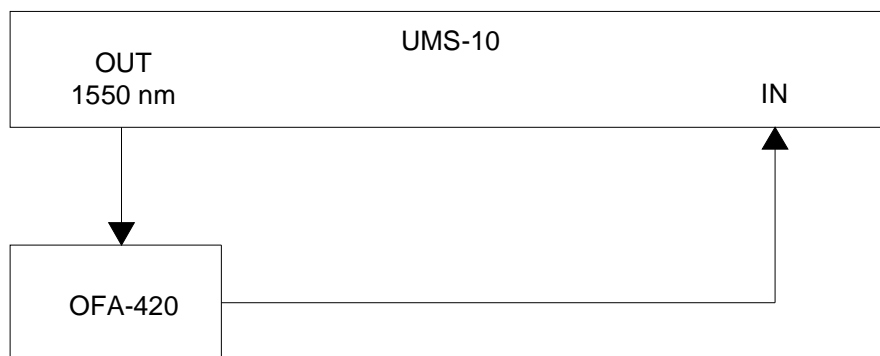
- Nezávislé na přenosových rychlostech a protokolech
- Vysoká separace portů
- Uživatelsky definovatelné požadavky
- Nezávislé na vlnové délce – přes celé CDWM spektrum

## Technické parametry

|                        |                |
|------------------------|----------------|
| provozní vlnové délky: | 1270 – 1630 nm |
| teplotní stabilita:    | < 0.2 dB       |
| uspořádání portů:      | 2 x 1          |
| dělicí poměr:          | 10:90          |
| vložný útlum:          | -10,4 dB       |
| provozní teplota:      | -40 - +85 °C   |

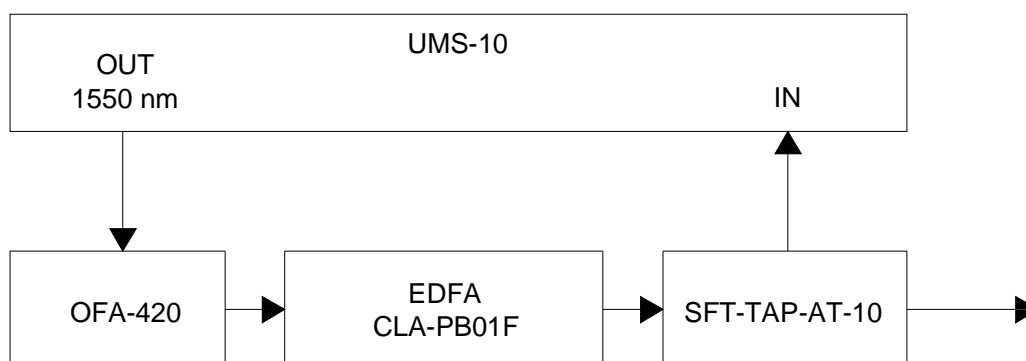
## 6.2 Pracovní postup měření

Přístroje použité při měření (viz kapitola 6.1), byly nejprve zapojeny dle obrázku 6.8 single-módovými optickými propojovacími kabely s konektory ST/ST, ST/SC a SC/SC.



Obr. 6.8: Schéma zapojení univerzální jednotky a útlumového článku

Jako zdroj světelného signálu byl použit modul s vlnovou délkou světla 1550 nm, umístěného v univerzální jednotce UMS-10. Výstupní výkon signálu -9,1 dBm byl následně snižován na optickém útlumovém článku OFA-420. Hodnoty utlumeného výkonu byly měřeny měřícím modulem univerzální jednotky a reprezentují výkon signálu přiváděného na vstup zesilovače  $P_{\text{vst}}$ .



Obr. 6.9: Schéma zapojení přenosové soustavy včetně optického zesilovače

Následně byl do sestavy zapojen i zesilovač CLA-PB01F (viz obr. 6.9). Vstupní signál byl zesilován s konstantním ziskem 20 dB. Zesílený signál byl následně přiveden do splitteru SFT-TAP-AT-10 a rozdělen v poměru 1 ku 9. 10 % výkonu signálu bylo přivedeno na měřicí přístroj a zbylý výkon zůstal nevyužit. V reálném použití by byl signál doveden na přijímač optického signálu a dále zpracován. Z měřeného signálu  $P_{Svyst}$  (dBm) musel být výstupní výkon zesilovače  $P_{vyst}$  (dBm) dopočítán dle vzorečku

$$P_{vyst} = (P_{Svyst} - IL_S) \cdot 10, \quad (6.1)$$

kde  $IL_S$  (dB) je hodnota vložného útlumu. Vložený útlum pro použitý výstup splitteru byl -10,4 dB.



Obr. 6.10: Fotografie měřicího pracoviště

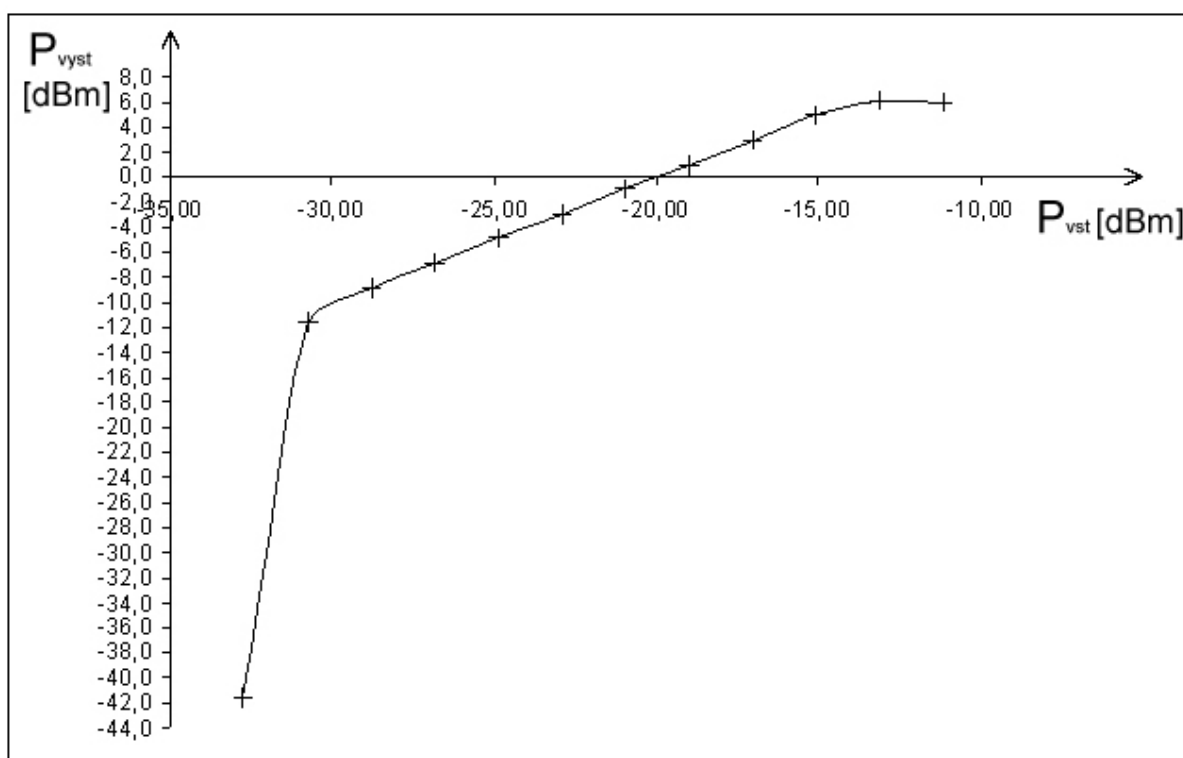
### 6.3 Výsledky měření

Naměřené hodnoty vstupního a výstupního výkonu jsou zaznamenány v přehledné tabulce 6.1 a jsou doplněny dopočítanými hodnotami výkonu signálu přímo na výstupu zesilovače.

Tabulka 6.1: Naměřené a vypočtené hodnoty vstupního a výstupního výkonu zesilovače.

| vložený útlum<br>IL [dB] | vstupní výkon<br>signálu do zesilovače<br>$P_{vst}$ [dBm] | výstupní výkon<br>signálu ze splitteru<br>$P_{Svyst}$ [dBm] | výstupní výkon<br>signálu ze zesilovače<br>$P_{vyst}$ [dBm] |
|--------------------------|---|---|---|
| -2                       | -11,16  | -9,87   | 5,9   |
| -4                       | -13,12  | -9,83   | 6,1   |
| -6                       | -15,08  | -9,91   | 4,9   |
| -8                       | -17,02  | -10,10  | 3,0   |
| -10                      | -18,98  | -10,30  | 1,0   |
| -12                      | -20,94  | -10,49  | -0,9  |
| -14                      | -22,90  | -10,69  | -2,9  |
| -16                      | -24,86  | -10,89  | -4,9  |
| -18                      | -26,82  | -11,08  | -6,8  |
| -20                      | -28,78  | -11,28  | -8,8  |
| -22                      | -30,74  | -11,47  | -11,6   |
| -24                      | -32,74  | -11,47  | -41,6   |

Na obrázku 6.11 je zobrazen graf závislosti vstupního a výstupního výkonu optického signálu procházejícího optickým zesilovačem EDFA CLA-PB01F.



Obr. 6.11: Graf závislosti vstupního a výstupního výkonu optického signálu.

Z grafu je zřejmé, že v rozmezí vstupního výkonu přibližně -30 dBm až -10 dBm roste zesílení lineárně, což odpovídá správné činnosti zesilovače. Pokud byl vstupní výkon nižší jak -30 dBm, zesilovač indikoval nízkou úroveň vstupního signálu, nezesiloval a došlo k výraznému poklesu výstupního signálu.

Saturační výkon, který byl výrobcem stanoven na 5 dBm, byl při měření o 1 dB větší a po dosažení úrovně 6,1 dBm začal výstupní výkon lehce klesat. Zesilovač již dosáhl svého zesilovacího maxima.

Naměřené výsledky odpovídají teoretickým předpokladům, v celém přenosovém systému ovšem došlo k dílčím poklesům signálu, způsobeným pravděpodobně útlumy na konektorových přípojkách. Nepatrně byl také překročen maximální výkon zesilovače uváděný výrobcem.

## 7 Laboratorní úloha

Navržená laboratorní úloha pro předmět Optické sítě je zaměřena na seznámení se studentů se zesilovacími vlastnostmi optických zesilovačů v optovláknových přenosových systémech a využitím optických zesilovačů v optických přenosech.

V teoretickém úvodu k laboratorní úloze je uvedena teorie k problematice optických zesilovačů se zaměřením na zesilovače EDFA. Je zde také uveden stručný popis použitých přístrojů a jejich základního ovládání.

Studenti se prakticky seznámí s optickým EDFA zesilovačem CzechLight Amplifier PB01F a v zapojení simulující přenosovou soustavu změří jeho zesilovací vlastnosti. Výstupem z této úlohy bude přehledný protokol o měření závislosti vstupní a výstupní úrovně optického signálu a zobrazení jejich závislosti v grafu.

Studenti by po absolvování této laboratorní úlohy měli mít základní teoretické znalosti o vlastnostech optických zesilovačů a praktické zkušenosti s průběhem zesílení optického signálu.

### 7.1 Zadání

Sestavte dle zadání optický přenosový systém. Vloženým útlumem simulujte pokles světelného výkonu v přenosové trase. Měřte vstupní a výstupní výkon EDFA zesilovače. Porovnejte vstupní a výstupní hodnoty výkonu na zesilovači a určete jejich závislost. Výsledky zpracujte do přehledné zprávy.

### 7.2 Teoretický úvod

#### 7.2.1 Optické zesilovače

Optické zesilovače jsou zařízení, které zesilují přímo optický signál bez nutnosti převádět ho na signál elektrický. Princip, na kterém fungují, je založen na existenci stimulované emise záření v optickém vlákne. Přejít soustavy elektronů do stavu s nižší energií vyvolaný stimulujícím fotonem je doprovázen vyzářením fotonu, který má stejnou energii, stejný směr šíření a stejnou fázi i polarizační vlnění jako foton stimulující. Stimulující foton se uvažovanou soustavou nepohlí, pouze soustavou projde a přidá se k němu foton stimulovaný. Tento jev se nazývá stimulovaná emise záření.

K zesilování je nutné dodat jistou energii, kterou poskytuje čerpací zdroj. Rozlišujeme dva základní druhy dodané energie:

- § optická energie – dodaná ve formě záření s koherentní vlnovou délkou (laserové čerpací zdroje). Využívá se ve vláknových zesilovačích s dotací.



§ elektrická energie – dodaná ve formě proudu. Využívá se v polovodičových zesilovačích.

Ani vláknový ani polovodičový zesilovač přichozí signál jiným způsobem neupravují, pouze ho zesílí. Ale oba přináší do přenosové trasy přídatný šum – ASE (Amplified Spontaneous Emission). Tento šum je v podstatě světlo vytvořené samovolnou emisí, které je opticky zesíleno procesem stimulované emise záření ve vlákne. ASE negativně ovlivňuje maximální zisk, kterého lze dosáhnout. Velikost zisku zesilovače je funkcí vlnové délky vstupního světla a vstupní signálové úrovně (bodu saturace). Všechny optické zesilovače jsou omezeny svým maximálním výkonem na výstupu – saturačním výkonem.

### **7.2.2 Rozdělení zesilovačů dle umístění na trase**

Zesilovače můžeme do optického přenosového systému umístit několika způsoby podle jejich zesilovacích vlastností. Podle umístění na trase dělíme zesilovače na:

#### **§ Výkonové zesilovače (Booster)**

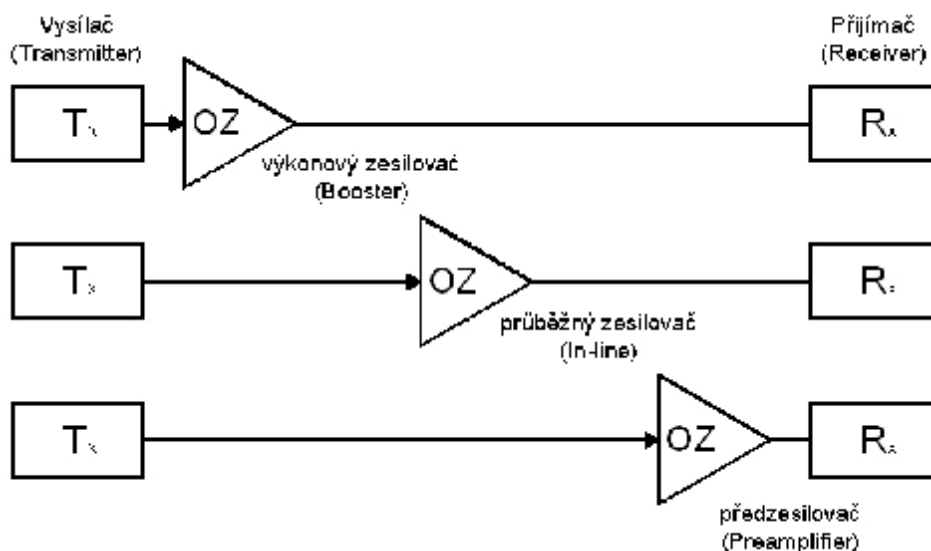
Umístujeme je na začátek optické trasy hned za vysílač. Zesilují signál na maximální úroveň, kterou lze do vlákna navázat, zároveň musí být uzpůsobeny k tomu, aby byly schopné přijmout velký vstupní signál z vysílače. Dosahují velkého výstupního saturačního výkonu a malého šumu.

#### **§ Průběžné zesilovače (In-line)**

Průběžné zesilovače umísťujeme do optické trasy. Jejich úkolem je zesilovat utlumený vstupní signál a zesilovat ho na co nejvyšší možný výstupní signál. Dochází ke kompenzaci útlumu způsobeného předchozím úsekem trasy. Zesilovače dosahují velkého zisku popřípadě velkého výstupního saturačního výkonu.

#### **§ Předzesilovače (Preamplicifier)**

Zesilují velice nízké úrovně signálu na konci přenosové trasy tak, aby je byl koncový detektor schopný zpracovat. Je důležité aby předzesilovače měli co nejmenší úroveň vnitřního šumu.



Obr. 7.1: Rozmístění zesilovačů v přenosovém systému.

### 7.2.3 Optické vláknové zesilovače s dotací

Jedná se o zesilovače, které využívají dotovaného optického vlákna jako média, které umožňuje zesílení optického signálu. Toto vlákno je rozměrově podobné normálnímu single módovému vláknu, a proto, aby bylo schopné zesilovat signál, musí být při výrobě dotováno některými vzácnými prvky. Spektrální závislosti zisku zesilovače jsou výrazně ovlivňovány volbou dopantu.

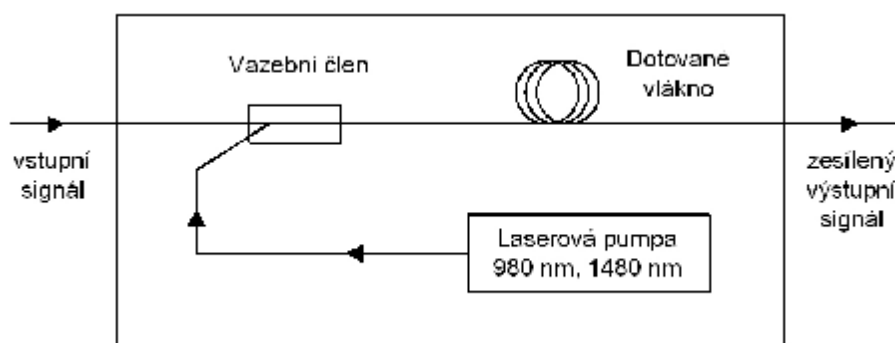
Optická vlákna mohou být dopována prvky:

- § Erbium (Er)
- § Neodymium (Nd)
- § Praseodymium (Pr)
- § Thulium (Tm)
- § Ytterbium (Yb)

Od názvu chemického prvku, který je přidán do vlákna, se odvozuje i první písmeno z označení zesilovače. Např. EDFA, PDFA, YDFA, kde DFA znamená Doped Fibre Amplifier (dotovaný vláknový zesilovač). Nejběžnějším prvkem, který se pro dopování vláken používá, je Erbium. Při výrobě vláken je třeba dbát na správnou volbu množství dopovaného prvku, protože při velké koncentraci dotace dochází ke zhoršení účinnosti zesilovače nebo ke snížení zisku, což je způsobeno ovlivňováním atomů dopantu mezi sebou.

Princip funkce optických zesilovačů s dotací je vesměs stejný. Zesílení je dosaženo pomocí stimulované emise fotonů z iontů, které byly přidány do optického vlákna. Energie čerpacího zdroje přesune atomy dopantu do vyšší energetické hladiny. Při přechodu z vyšší hladiny do nižší dochází k zářivému přechodu a dochází k uvolnění fotonu s jistou energií.

Přechod může být buď stimulovaný, nebo spontánní. Spontánní emise a absorpce elektronů snižují účinnost světelného zesilovače.



Obr. 7.2: Optický zesilovač s dotovaným vláknem.

#### 7.2.4 EDFA optický zesilovač CLA-PB01F

Použitý erbiem dotovaný optický zesilovač CLA-PB01F od českého výrobce firmy Optonon patří do rodiny výkonných zesilovačů s nízkým šumem, umožňuje nastavení zesílení i jiných parametrů dle potřeby přenosového systému. Je určený pro zesílení velkého počtu kanálů s plochou charakteristikou zisku.

Dostupné řídicí módy:

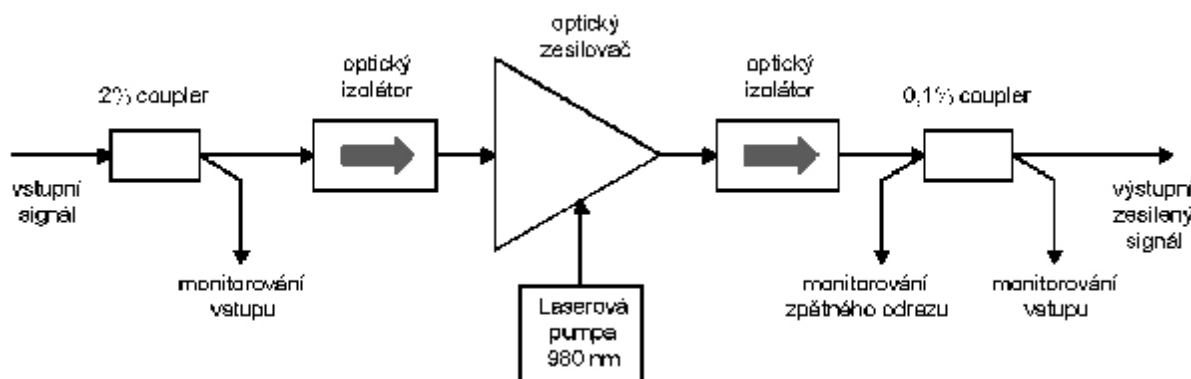
AGC (automatic gain control) – automatické řízení zisku.

APC (automatic power control) – automatické řízení výkonu.

ACC (automatic current control) – automatické řízení proudu.

#### Vlastnosti CLA-PB01F

Zesilovač vykazuje velmi nízký útlum a je schopný pokrýt široké spektrum vlnových délek. Zařízení obsahuje dva EDFA zesilovací moduly – výkonový zesilovač o výkonu 20 dBm a předzesilovač.



Obr. 7.3: Schéma EDFA zesilovače.

Součástí zesilovače je také mikropočítač s operačním systémem LINUX, který zesilovač řídí. Přes RS-232, Ethernet a USB rozhraní je umožněna vzdálené správa a komunikace se zesilovačem. Na přání je možno doplnit bezdrátové rozhraní GSM, Wi-Fi nebo Bluetooth. Pro vzdálený přístup a správu slouží příkazový řádek přes SSH. Varovné zprávy v případě problémů mohou být uživateli zasílány prostřednictvím e-mailů a všechny důležité provozní stavy jsou indikovány LED-diodami na čelním panelu zesilovače.

Při zacházení se zesilovačem je třeba se řídit bezpečnostními pravidly pro práci s lasery třídy 3B. Laser třídy 3B může poškodit zrak při přímém pohledu do světelného paprsku, ale odraz od papíru, nebo podobného matného materiálu je neškodný. V prostředí v němž se může vyskytnout přímé vyzařování laserových paprsků třídy 3B je nutné používat prostředky k ochraně zraku. Lasery třídy 3B musí být vybaveny zámkem s bezpečnostním klíčem.

Napájení je řešeno dvěma jednotkami, kdy jedna je hlavní a druhá slouží pro připojení UPS a je záložní. Napájecí napětí 100-230 V AC nebo 48 V DC. Spotřeba 50-150 W.

Rozměry: 430x300x88 mm (š x h x v)

## Ovládání zesilovače

Z ovládacích prvků je na čelním panelu zesilovače pouze vypínač mikropočítače. Pro nastavení, ovládání a komunikaci se zařízením musí být k mikropočítači, připojen monitor a klávesnice. Komunikace probíhá pomocí speciálních příkazů na příkazové řádce. Další možností je spojení přes rozhraní sériového portu RS-232 a nebo vzdálená správa přes internet.

Signalizace pomocí LED diod na čelním panelu zesilovače slouží pro indikaci případných poplachových stavů na modulech zesilovače.

- § Červená LED – kritická signalizace– teplota čerpacích diod nebo modulu překračuje přípustné meze, čerpací proud překročil limit.
- § Žlutá LED – signalizace ztráty vstupního/výstupního výkonu – vstupní a/nebo výstupní výkon je mimo příslušné meze.
- § Modrá LED – signalizace čerpání – proudy čerpacích diod jsou vyšší než úroveň proudu a na výstupu zařízení může být zesílený optický signál.

Pro spuštění zesilovače musí být napájecí kabel zapojen do jednoho napájecího konektoru na zadní straně zesilovače. Druhý napájecí konektor slouží pro připojení záložního napájení ze zařízení UPS. Pro spuštění je třeba zapnout alespoň jeden napájecí zdroj, po jeho spuštění se roztočí ventilátory chlazení. Zabudovaný počítač se spustí zeleným vypínačem na čelním panelu. Jeho činnost po spuštění systému indikuje zelená LED dioda. Jakmile je počítač spuštěn a systém běží, tak jsou inicializovány moduly zesilovače a zaváděcí proces je ukončen. Nyní je zesilovač připraven k použití a pomocí řídicích příkazů je možné měnit jeho nastavení nebo zesilovací režimy.

## 7.2.5 Univerzální jednotka pro testovací moduly UMS-10

Modulární systém UMS-10 představuje univerzální šasi pro testovací moduly a slouží pro měření absolutního a relativního optického výkonu v optických sítích. Jeho využití je široké, jak při výrobě optických vláken a komponentů, tak při budování optických sítí a jejich údržbě. Hodí se také do laboratoří, výzkumných a vývojových ústavů.

### Vlastnosti UMS-10

Jednotka UMS-10 může být vybavena mnoha typy zásuvných modulů. Řídící jednotka obsahuje modul pro měření optického výkonu s vysokokapacitní pamětí, která umožňuje uložit naměřená data i s informacemi o čísle měřeného vlákna, vlnové délce a absolutní nebo relativní hodnotě měření. Data uložená v paměti přístroje mohou být jednoduše přes USB rozhraní exportována do počítače a mohou být zpracována tabulkovým kalkulátorem, nebo jinou aplikací.

Při měření máme k dispozici univerzální jednotku se dvěma moduly světelného zdroje o vlnové délce 1310 nm a 1550 nm. Využijeme světelný zdroj o vlnové délce 1550 nm a zabudovaného měřicího přístroje pro odečítání výstupního výkonu ze zesilovače.

Při práci s tímto zařízením je nutno řídit se bezpečnostními pravidly pro práci s lasery třídy 1. Laser třídy 1 je bezpečný při normálním použití, to znamená že nemůže být překročena hranice dovoleného maximálního záření.

### Ovládání

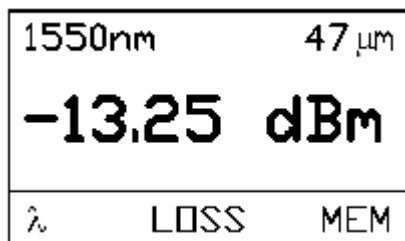
Po připojení napájecího kabelu a zapnutí hlavního vypínače řídicí jednotky na čelní straně přístroje se na displeji zobrazí typ, verze firmwaru a sériové číslo přístroje.

Modul pro měření výkonu se spustí v režimu měření absolutního výkonu a s nastavenou vlnovou délkou dle posledního měření.

Jednotlivé moduly světelných zdrojů můžeme zapnout až po řídicí jednotce. Zapínány a vypínány mohou být libovolně dle potřeby. Vypnutím řídicí jednotky dojde také k vypnutí všech modulů zdrojů světla i jiných doplňkových modulů.

### Režim měření absolutního výkonu

V režimu pro měření absolutního výkonu se na displeji zobrazuje absolutní hodnota optického signálu v dBm.



Obr. 7.4: Režim měření absolutního výkonu

#### Funkční tlačítka

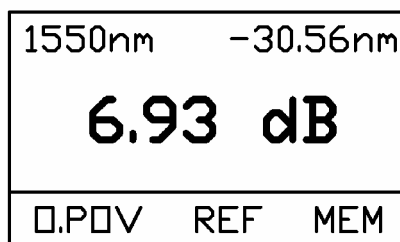
$\lambda$  - zvolí jednu z dostupných vlnových délek

LOSS – přepne do režimu měření relativního výkonu

MEM – spustí menu paměti

#### Režim měření relativního výkonu

V režimu pro měření relativního výkonu se na displeji zobrazuje relativní hodnota optického výkonu v dB, vztažená k referenční hodnotě výkonu optického signálu, zobrazené v pravém horním rohu displeje.



Obr. 7.5: Režim měření relativního výkonu

#### Funkční tlačítka

O.POV - přepne zpět do režimu měření absolutního výkonu

REF – nastaví a uloží novou referenční hodnotu pro vybranou vlnovou délku

MEM – spustí menu paměti

### 7.2.6 Optický útlumový článek OFA-420

Optický útlumový článek představuje zařízení, které umožňuje digitálně nastavit úbytek výkonu optického signálu na optickém vlákně. Jedná se o kompaktní přenosné zařízení, vhodné pro certifikaci opto-vláknových tras, jejich běžnou údržbu a vhodné je také pro laboratorní účely.

## Vlastnosti

nízký vložný útlum  
široký rozsah útlumu  
tři útlumové kroky: 10 dB, 1,0 dB, 0,1 dB

## Ovládání

Po zapnutí útlumového článku tlačítkem ON/OFF, lze vybrat potřebnou vlnovou délku pomocí tlačítka se symbolem  $\lambda$ . Hodnota útlumu v decibelech se nastavuje pomocí šipek. Pro připojení optických vláken s různými typy konektorů slouží přiložené konektorové redukce.

### 7.2.7 Splitter SFT-TAP-AT-10

Optický rozdělovač kanálů SFT-TAP-AT-10 (Test Access Point splitter) slouží pro sledování činnosti optických sítí. Procházející signál je rozdělen v určitém poměru do výstupního konektoru a do konektoru sledovacího. Dle požadavků může splitter monitorovat optické vlákno jednosměrně, či obousměrně v rozsahu vlnových délek celého CWDM spektra. Dělicí poměr sledovacích portů může být nastaven od 1 do 10%.

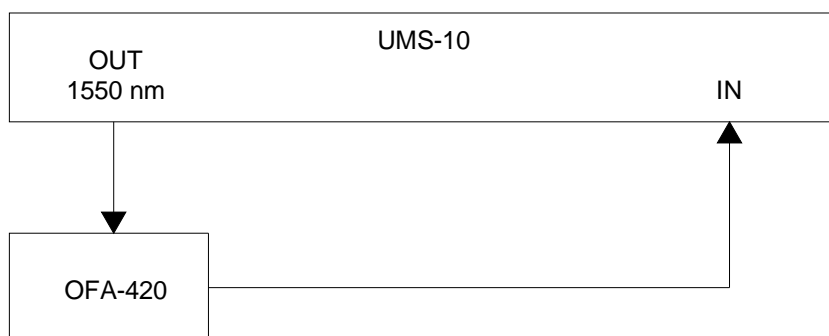
Použitý splitter má nastaven dělicí poměr mezi sledovacím výstupním portem na 1:10. Při tomto poměru je vložný útlum na sledovacím konektoru  $IL_S = -10,4$  dB.

Hodnoty výstupního výkonu  $P_{Svyst}$  (dBm), zaznamenané měřicím přístrojem, jsou tedy pouze částí celkového signálu zesíleného zesilovačem a jsou ovlivněny vložným útlumem splitteru  $IL_S$  (dB). Výstupní výkon zesilovače  $P_{vyst}$  (dBm) musí být z naměřených hodnot dopočítán dle vzorečku

$$P_{vyst} = (P_{Svyst} - IL_S) \cdot 10. \quad (7.1)$$

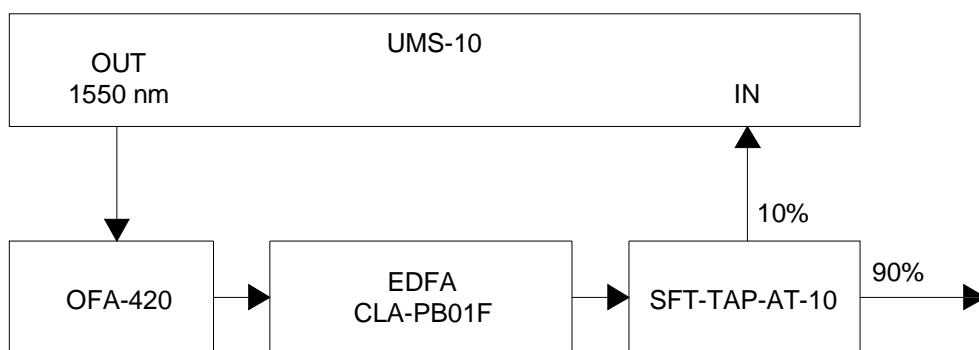
## 7.3 Pracovní postup

- 1) Seznamte se, se základními ovládacími prvky optického zesilovače, měřicího přístroje a útlumového článku (viz přiložené manuály).
- 2) Zapojte přenosový systém dle obrázku 7.6.



Obr. 7.6: Schéma zapojení universální jednotky a útlumového článku

- 3) Zapněte řídicí jednotku měřícího přístroje UMT-10, zapněte zdroj světelného signálu o vlnové délce 1550 nm, zapněte útlumový článek OFA-420 a nastavte na něm co nejnižší útlum.  
POZOR: Nikdy se v případě zapnutého zdroje světelného záření nedívejte do paprsku laseru.
- 4) Zvyšujte útlum s pravidelným krokem až na úroveň -25 dB, zaznamenávejte útlum a výkon signálu (úroveň signálu přiváděná vstup zesilovače).
- 5) Přenosový systém zapojte dle obrázku 7.7 a na útlumovém článku nastavte nejnižší útlum.



Obr. 7.7: Schéma zapojení přenosové soustavy včetně optického zesilovače

- 6) Zapněte hlavní vypínač na optickém zesilovači CzechLight Amplifier a zapněte zabudovaný mikropočítač.
- 7) Po nastartování systému (indikace zelenou LED), zvyšujte vložný útlum na stejné hodnoty jako při prvním měření a zaznamenávejte hodnoty zesíleného signálu (10 % výstupního signálu utlumeného vložným útlumem splitteru).
- 8) Vypněte přístroje a uveďte pracoviště do původního stavu.



## **7.4 Zpracování**

Zpracujte protokol z měření. Naměřené a vypočtené hodnoty vstupního a výstupního výkonu zanepte do přehledné tabulky a jejich závislost vyneste do grafu. Porovnejte naměřené hodnoty s údaji uváděnými výrobcem a krátce se rozepište o případných odchylkách.

## **7.5 Závěr**

Zhodnoťte průběh laboratorního cvičení

## 8 Závěr

Ve své diplomové práci jsem se seznámil s optickými zesilovači, jejich vlastnostmi, funkcemi a uplatněním v optických přenosových systémech. Seznámil jsem se také s parametry optického signálu, které tyto zesilovače ovlivňují. Uvedl jsem základní dělení optických zesilovačů a popsal jsem několik konkrétních výrobků.

Základní dělení optických zesilovačů podle činnosti spočívá v jejich umístění v přenosovém systému, kdy mohou být umístěny na začátku optické trasy (výkonové zesilovače), uprostřed trasy (průběžné zesilovače) a nebo těsně před detektorem signálu (předzesilovače). Zesilovače také můžeme dělit podle toho, odkud získávají energii pro zesílení signálu. Mluvíme tedy o optických zesilovačích s dotací (EDFA, YDFA,..), u kterých k zesílení dochází ve speciálním optickém vlákne, a nebo o polovodičových optických zesilovačích, kde je zesílení signálu způsobeno polovodičovými prvky.

V práci jsou popsány optické zesilovače a jejich parametry od dvou různých výrobců. Od firem Optokon a Keopsys. Produkty se od sebe liší svými funkcemi, zesilovacími parametry i způsobem využití v praxi.

Jako nejvhodnější optický zesilovač jsem zvolil zesilovač CzechLight od firmy Optokon, který se pro množství funkcí a možností různých nastavení hodí pro využití jak v praxi, tak také v laboratořích, kde se s jeho činností a funkcemi mohou seznámit studenti.

S vybraným zesilovačem jsem provedl praktické měření. Zapojil jsem optický přenosový systém s regulovatelným vložným útlumem a měřil výkon signálu bez zesílení a výkon signálu po zesílení zesilovačem CLA-PB01F. Pokud byla intenzita vstupního signálu v rámci rozsahu hodnot, které je zesilovač schopen na vstupu detekovat a zesílit, byl signál zesilován lineárně a zesilovač tak splnil svoji funkci. Výstupem měření byla výkonová závislost výstupního výkonu signálu na vstupním výkonu.

Tento zesilovač a výše uvedené měření jsem využil pro vytvoření laboratorní úlohy pro předmět Optické sítě. Studenti se při ní seznámí s problematikou optických zesilovačů, prakticky si ověří zesilovací vlastnosti a proměří závislost vstupního a výstupního výkonu signálu zesíleného optickým EDFA zesilovačem.

Tato práce popisuje pouze základní funkce a vlastnosti optických zesilovačů. Detailnější popis dané problematiky by byl možný rozebrat v rozsáhlejší práci, ve které by mimo jiné mohly být popsány další měření a testy na zesilovači.

## 9 Seznam literatury a použitých zdrojů

- [1] GUO. Y., KAO, K.C., LI, H.E., CHINAG, K. S. *Nonlinear Photonics*. Springer, New York 2002.
- [2] HASEGAWA, A., MATSUMOTO, M. *Optical Solitons in Fibers*. Springer, New York 2002.
- [3] FILKA M. *Optické sítě – přednášky*. Skripta. VUT FEKT, Brno 2007.
- [4] LUKÁŠ, Michal. *Laserové diody : Část 1 - Princip funkce laserových diod* [online]. 2001 [cit. 2008-12-04]. Dostupný z WWW: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01034/index.html>.
- [5] BOHÁČ L. *Optické zesilovače v telekomunikační technice* [online]. [cit. 2008-12-04]. Dostupný z WWW: <http://www.comtel.cz/files/download.php?id=3559>.
- [6] *Population inversion* [online]. 2006 , 2008-11-23 [cit. 2008-12-08]. Dostupný z WWW: [http://en.wikipedia.org/wiki/Population\\_inversion](http://en.wikipedia.org/wiki/Population_inversion).
- [7] *Optical amplifier* [online]. 2007 , 2008-11-18 [cit. 2008-12-10]. Dostupný z WWW: [http://en.wikipedia.org/wiki/Optical\\_amplifier](http://en.wikipedia.org/wiki/Optical_amplifier).
- [8] CONNELLY, Michael. *Semiconductor Optical Amplifiers and their Applications* [online]. 1998 [cit. 2008-12-10]. Dostupný z WWW: [www.uc3m.es/uc3m/dpto/IN/dpin08/Semiconductor\\_optical\\_amplifiers.pdf](http://www.uc3m.es/uc3m/dpto/IN/dpin08/Semiconductor_optical_amplifiers.pdf).
- [9] *Safibra, s.r.o. - OPTOVĚKNOVÉ ZESILOVAČE* [online]. 1999-2008 [cit. 2008-12-11]. Dostupný z WWW: <http://www.safibra.cz/cesky/produkty/zesilovace/edfa.html>.
- [10] *Optokon EDFA : CLA - CzechLight Amplifier devices* [online]. [2001] [cit. 2008-12-11]. Dostupný z WWW: <http://www.optokon.cz/>.
- [11] *C-Band WDM Benchtop Fiber Amplifiers* [online]. 1999-2008 [cit. 2008-12-13]. Dostupný z WWW: [http://www.safibra.cz/download/Keopsys\\_BT2\\_WDM\\_C.pdf](http://www.safibra.cz/download/Keopsys_BT2_WDM_C.pdf).
- [12] *1.0μm CW Ytterbium Fiber Amplifier* [online]. 1999-2008 [cit. 2008-12-13]. Dostupný z WWW: [http://www.safibra.cz/download/Keopsys\\_YFA.pdf](http://www.safibra.cz/download/Keopsys_YFA.pdf).
- [13] *Raman Benchtop Fiber Lasers* [online]. 1999-2008 [cit. 2008-12-13]. Dostupný z WWW: [http://www.safibra.cz/download/Keopsys\\_BT2\\_Raman.pdf](http://www.safibra.cz/download/Keopsys_BT2_Raman.pdf).
- [14] SÝKORA, J. *Princip WDM* [online]. 2002-2009 [cit. 2009-05-20]. Dostupný z WWW: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2004072805>.
- [15] FILKA, Miloslav. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. 1. vyd. Brno: [s.n.], 2009. 369 s. ISBN 978-80-86785.
- [16] *EDFA Optical Amplifier : CLA - CzechLight Amplifier devices*. [s.l.] : [s.n.], 2008. 24 s. User manual.
- [17] HONSÁREK, Martin. *Optický zesilovač – měření* [online]. 18.května 2009 8:49; [cit. 2009-05-21]. Osobní komunikace.
- [18] *UMS-10 : Universal Mainframe for testing modules*. [s.l.] : [s.n.], 2008. 30 s. User manual.
- [19] *OFA-420 series : Optical Fiber Attenuator*. [s.l.] : [s.n.], 2008. 1 s.
- [20] *SFT-TAP : Test Access Point splitter*. [s.l.] : [s.n.], 2007. 2 s.

## 10 Seznam použitých zkratk, veličin a symbolů

- AC (alternating current) – střídavý proud  
ACC (automatic current control) – automatické řízení proudu  
AGC (automatic gain control) – automatické řízení zisku  
APC (automatic power control) – automatické řízení výkonu  
ASE (Amplified Spontaneous Emission) – přídavný šum  
CATV (Cable television) – kabelová televize  
CLA (CzechLight Amplifier) – optické zesilovače od firmy Optokon  
CWDM (Coarse WDM) – obyčejný vlnový multiplex  
DC (direct current) – stejnosměrný proud  
DNS (Domain Name System) - hierarchický systém doménových jmen  
DWDM (Dense WDM) – hustý vlnový multiplex  
EDFA (Erbium doped fiber amplifier) - Erbiem dotovaný optický zesilovač  
EDWA (Erbium doped waveguide amplifier) - Erbiem dotovaný vlnovodový zesilovač  
ETDFA (Telluride based erbium doped fiber amplifier) - Telluridový erbiem dotovaný OZ  
FTTH (Fibre To The Home) – optické vlákno až do domu  
GC-SOA (Gain clamped semiconductor optical amplifier) - polovodičový OZ  
GPRS (General Packet Radio Service) - mobilní datová služba  
GPS (Global Positioning System) – globální polohový družicový systém  
GS-EDFA (Gain shifted EDFA) - EDFA s posunutým ziskem  
IP (Internet Protokol) – datový protokol používaný pro přenos dat přes paketové sítě  
ITU-T (International Telecommunication Union) – Mezinárodní telekomunikační unie  
LED (light-emitting diode) - světlo vyzařující dioda  
OFA-420 - optický útlumový článek  
OZ – optický zesilovač  
PC (Personál Computer) – osobní počítač  
PDFFA (Praseodymium-doped fluoride fiber amplifier) - praseodymiem dotovaný fluoritový OZ  
RFA (Raman fiber amplifier) - Ramanovský OZ  
RJ-45 – konektor ethernetových kabelů  
RS-232 – standard sériové linky  
SFT-TAP (Test Access Point splitter) – splitter neboli rozdělovač kanálů  
SMTP (Simple Mail Transfer Protocol) – internetový protokol určený pro přenos zpráv elektronické pošty  
SSH (Secure Shell) – zabezpečený komunikační protokol  
TDFA (Thulium doped fluoride based fiber amplifier) - Thuliem dopovaný fluoritový OZ  
UMS-10 - univerzální jednotka pro testovací moduly  
UPS (Uninterruptible Power Supply) – záložní bateriový zdroj energie  
USB (Universal Serial Bus) – univerzální sériová sběrnice  
WDM (Wavelength Division Multiplex) - vlnový multiplex  
WDM (Wavelength Division Multiplexing) – vlnový multiplex  
Wi-Fi - Standard pro lokální bezdrátové sítě
- $I_{L_S}$  – vložený útlum [dB]  
 $P_{vst}$  – vstupní výkon signálu [dBm]  
 $P_{výst}$  – výstupní výkon signálu [dBm]  
 $\lambda$  - vlnová délka [nm]

## 11 Seznam příloh

Příloha č. 1: Laboratorní úloha do předmětu Optické sítě

Příložené CD obsahující:

- diplomová práce ve formátu .pdf
- příloha č. 1 ve formátu .pdf
- uživatelské manuály k produktům fy. Optokon ve formátu .pdf