

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2017

Michal Látal, DiS.



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ OPTICKÝCH PASIVNÍCH PRVKŮ V OBLASTI KRÁTKÝCH VLNOVÝCH DÉLEK

VERIFICATION OF PARAMETERS OF PASSIVE OPTICAL COMPONENTS ON SHORT WAVELENGTHS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michal Látal, DiS.

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Josef Vojtěch, Ph.D.

BRNO 2017

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Teleinformatika**
Ústav telekomunikací

Student: Michal Látal, DiS.

ID: 174225

Ročník: 3

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Ověření vlastností optických pasivních prvků v oblasti krátkých vlnových délek

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je teoretický rozbor problematiky pasivních vláknových prvků a jejich parametrů. Důraz bude kladen na problematiku použití pasivních prvků na nestandardních vlnových délkách. Na základě teoretického rozboru bude proveden návrh a ověření ve vhodném simulačním SW (např. VPIphotonics, Optiwave) a měřením. Výstupem práce pak bude charakterizace základních typů pasivních komponent pro použití na krátkých vlnových délkách.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] FILKA, Miloslav. Optoelektronika : Pro telekomunikace a informatiku. Vyd. 1. Brno : Centa, 2009. 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.

[2] DUTTA, Achyut K. Active and passive optical components for communications VI: 3-4 October, 2006, Boston, Massachusetts, USA. Bellingham, Wash.: SPIE, c2006. Proceedings of SPIE--the International Society for Optical Engineering, v. 6389. ISBN 0819464872.

Termín zadání: 1.2.2017

Termín odevzdání: 8.6.2017

Vedoucí práce: Ing. Josef Vojtěch, Ph.D.

Konzultant: Ing. Petr Münster, Ph.D.

doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá základními teoretickými poznatky z oboru optiky, šíření světla a optických vláken. Podrobněji popisuje optický přenosový systém a problematiku s ním spojenou, jako je útlum optických vláken nebo různě vzniklé disperze. Hlavní částí této práce je především popis jednotlivých pasivních optických prvků, jejich technologie výroby a využití v optických spojích. V rámci optického spoje jsou probrány zdroje optického záření a detektory optického záření. Poslední, praktická část práce je zaměřena na ověření vlastností pasivních optických prvků v oblasti krátkých vlnových délek, měření vložného útlumu vybraných pasivních optických prvků.

KLÍČOVÁ SLOVA

cirkulátor, dělicí poměr, disperze, měření, optika, rozbočovač, světlo, útlum, vazební člen, vlákno

ABSTRACT

Bachelor thesis deals with the basic theoretical knowledge in the field of optics, light propagation and optical fibers. It describes in detail the optical transmission system and its associated issues, such as the attenuation of optical fibers or differently caused dispersion. The main part of this work is a description of each passive optical elements, their production technologies and applications in optical communications. Within the optical connection its radiation sources and detectors of optical radiation are explained. The last practical part is focused on the verification of parameters of passive optical components on short wavelengths and the measurement of the insertion loss of selected passive optical elements.

KEYWORDS

circulator, splitting ratio, dispersion, measurement, optics, splitter, light, attenuation, coupler, fiber

LÁTAL, Michal *Ověření vlastností optických pasivních prvků v oblasti krátkých vlnových délek*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, Rok 2017. 54 s. Vedoucí práce byl Ing. Josef Vojtěch, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Ověření vlastností optických pasivních prvků v oblasti krátkých vlnových délek“ jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor(ka) uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Josefu Vojtěchovi, Ph.D. a zároveň panu Ing. Petru Münsterovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora(-ky)



Faculty of Electrical Engineering
and Communication
Brno University of Technology
Purkynova 118, CZ-61200 Brno
Czech Republic
<http://www.six.feec.vutbr.cz>

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsany v této bakalářské práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno

.....

podpis autora(-ky)



EVROPSKÁ UNIE
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



OBSAH

Úvod	11
1 Úvod do optiky	12
1.1 Optika	12
1.2 Světlo	12
2 Optická vlákna	14
2.1 Úvod do optických vláken	14
2.1.1 Vlákná jednovidová	14
2.1.2 Vlákná mnohovidová	15
2.1.3 Standard G.652	16
2.1.4 Standard G.655	17
3 Optický přenosový systém	19
3.1 Přenos po optickém vlákně	19
3.2 Optický spoj	20
3.3 Přenosové vlastnosti optických vláken	21
3.3.1 Útlum optických vláken	21
3.3.2 Disperze v optických vláknech	23
4 Pasivní optické prvky	27
4.1 Pasivní prvky	27
4.1.1 Optický coupler	27
4.1.2 Optický splitter	28
4.1.3 Optický cirkulátor	29
4.1.4 Optický izolátor	30
4.2 Technologie výroby	30
4.2.1 FBT	30
4.2.2 PLC	31
5 Zdroje a detektory optického záření	33
5.1 Zdroje optického záření	33
5.1.1 Luminiscenční diody	33
5.1.2 Laserové diody	35
5.2 Detektory optického záření	36
5.2.1 Fotodioda PIN	37
5.2.2 Lavinová fotodioda	38

6 Praktické měření	39
6.1 Praktické měření – laboratorní	40
6.1.1 Metoda měření	40
6.1.2 Postup měření	41
6.1.3 Výsledky měření	41
6.2 Simulace – VPIphotonics	49
6.2.1 Metodika	49
6.2.2 Pracovní postup	49
6.2.3 Výsledky simulace	50
7 Závěr	52
Literatura	53
Seznam symbolů, veličin a zkratk	54

SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1	Schéma jednovidového vlákna	15
2.2	Schéma mnohovidového vlákna	16
3.1	Profil optického vlákna	20
3.2	Zjednodušené blokové schéma optického spoje	21
3.3	Spektrální útlumová charakteristika	22
3.4	Útlumové ztráty a) vznik absorpce, b) vznik rozptylu	23
3.5	Vznik polarizační vidové disperze	26
4.1	Optický coupler	28
4.2	Optický splitter	29
4.3	Obousměrný přenos po jednom vlákně pomocí cirkulátorů	29
4.4	Optický izolátor	30
4.5	Y-článek	31
5.1	Zjednodušené schéma a) čelně emitující dioda b) hranově emitující dioda	35
5.2	Spektrální vyzařovací charakteristiky	36
6.1	Schéma nastavení reference pro měření	40
6.2	Schéma pro měření útlumu	40

SEZNAM TABULEK

2.1	Přehled základních vlastností standardů G.652.C,D a G.655	18
4.1	Přehled základních vlastností technologii FBT a PLC	32
6.1	Pasivní optické prvky vybrané pro ověření vlastností	39
6.2	Naměřené hodnoty útlumu pro coupler 99:1 1550 nm	42
6.3	Hodnoty dělicího poměru pro coupler 99:1 1550 nm	42
6.4	Naměřené hodnoty útlumu pro coupler 90:10 1550 nm	43
6.5	Hodnoty dělicího poměru pro coupler 90:10 1550 nm	44
6.6	Naměřené hodnoty útlumu pro coupler 50:50 1550 nm	44
6.7	Hodnoty dělicího poměru pro coupler 50:50 1550 nm	45
6.8	Naměřené hodnoty útlumu pro coupler 50:50 850 nm	45
6.9	Hodnoty dělicího poměru pro coupler 50:50 850 nm	46
6.10	Naměřené hodnoty útlumu pro coupler 33:33:33 1550 nm	46
6.11	Hodnoty dělicího poměru pro coupler 33:33:33 1550 nm	47
6.12	Naměřené hodnoty útlumu pro izolátor 1550 nm	47
6.13	Naměřené hodnoty útlumu pro izolátor 1480 nm	48
6.14	Naměřené hodnoty útlumu pro cirkulátor 1470–1610 nm	48
6.15	Naměřené hodnoty útlumu simulovaného měření	50

ÚVOD

Pasivní prvky patří mezi nejběžnější prvky v telekomunikačních sítích, z důvodů své nenáročnosti na napájení a jednoduchosti spravování. Mezi nejdůležitější vlastnosti těchto prvků patří hodnota útlumu, kterou do optické trasy vkládají svou přítomností. Každý prvek je proto konstruován na svou pracovní vlnovou délku, při které je jeho vložný útlum co možná nejmenší. Jelikož je hodnota vložného útlumu pasivních prvků závislá na vlnové délce, je cílem této práce ověřit vlastnosti vybraných pasivních prvků jak na pracovní vlnové délce, tak v oblasti krátkých vlnových délek.

Bakalářská práce je členěna do dvou hlavních částí. První část je převážně teoretická, členěná do šesti kapitol. Druhá je praktická část práce zaměřená na vlastní měření pasivních optických prvků. Tato část je rozdělena na dvě podkapitoly, praktické měření v laboratoři a simulační měření v simulačním softwaru.

První kapitola se věnuje základům optiky, vlastnostem optických prostředí a šíření světla. Popisuje světlo jako viditelné spektrum elektromagnetického záření, rozděluje optická prostředí v závislosti na optických vlastnostech vůči šíření světla.

Druhá kapitola popisuje optická vlákna a jejich využití v telekomunikačních systémech dnešní doby. Jednotlivě popisuje vlákna jednovidová a mnohovidová, jejich základní charakteristiky, výhody a nevýhody a využití v telekomunikacích. Dále popisuje standard G.652 a G.655, jako základní standard telekomunikačních vláken a porovnává jejich doporučené vlastnosti.

Třetí kapitola se zabývá optickým přenosovým systémem, přenosem optického signálu po optickém vlákně a problematikou s ním spojenou. Jsou zde zmíněny hlavní přenosové vlastnosti optických vláken, jako je útlum optických vláken způsobený absorpcí nebo rozptylem a vznik disperze chromatické, vidové a polarizační.

Čtvrtá kapitola je zaměřena na popis jednotlivých pasivních optických prvků, vybraných pro praktické měření. Kapitola se dále věnuje technologiím výroby těchto pasivních prvků a přináší stručný přehled rozdílů těchto technologií.

Pátá kapitola se věnuje popisu zdrojů a detektorů optického záření, podrobněji probírá a porovnává luminiscenční a laserové diody jako zdroje optického záření. Dále se kapitola věnuje zejména fotodiodám PIN a fotodiodám lavinovým ve funkci detektorů optického záření.

Šestá kapitola obsahuje praktickou část práce, tedy vlastní měření a simulaci měření ověřující vlastnosti vybraných pasivních optických prvků. Kapitola popisuje návrh, zvolenou metodu měření, postup měření a hodnocení výsledků měření.

1 ÚVOD DO OPTIKY

1.1 Optika

Optika patří mezi nejstarší části fyziky, kdy její počátky lze vysledovat už ve starověkém Řecku. Termín optika pochází tedy z řeckého slova „optikós“, což znamená „týkající se vidění“. V původním významu optika představuje část fyziky, která se zabývá světlem, jeho šířením v různých prostředích a na jejich rozhraních. Zabývá se vzájemným působením světla a látky, zkoumá podstatu světla a další jevy, které se světlem souvisejí. Vlivem dokonalejších přístrojů se postupně optika začala rozšiřovat o další části jako například o vlnovou a kvantovou optiku. Optika se dále zabývá popisem a vlastnostmi ostatních druhů elektromagnetického záření jako je infračervené, ultrafialové, rentgenové záření. Optiku lze chápat jako nauku o záření. [1]

Optiku můžeme rozdělit na tři větší části:

1. Geometrická optika – historicky nejstarší část optiky. Zabývá se studiem šíření světla, odrazem a lomem světla, kdy se neuvažuje vlnová povaha záření. Základem je světelný paprsek, který splňuje tři zákony: zákon přímočarého šíření světla, zákon odrazu a zákon lomu.
2. Vlnová optika – část optiky, která na základě vlnové povahy světla, zkoumá a popisuje chování při průchodu nebo dopadu světla na různá rozhraní, překážky. Zabývá se především jevy jako: interference, disperze, ohyb světla, polarizace, holografie.
3. Kvantová optika – Zabývající se mikroskopickými fyzikálními jevy při vyzařování, pohlcování, šíření elektromagnetického záření a při vzájemném působení záření a látky. Důležité jevy dokazující kvantovou povahu světla jsou hlavně: Einsteinův fotoelektrický jev a Comptonův jev. [2]

1.2 Světlo

Světlo, tak jak ho běžně chápeme, je jen pouhá část z celého spektra elektromagnetického záření, různých vlnových délek, na které je lidské oko citlivé. Důležité je si uvědomit, že více než 80 % informací získaných o okolním světě je právě zrakem, díky světlu. Toto „viditelné záření“ se označuje jako světelné spektrum, ve spektru elektromagnetického záření se nachází v rozmezí vlnových délek 390–790 nm, celé spektrum dosahuje rozmezí od setin nanometru po jednotky kilometrů. Světelné spektrum obsahuje jednotlivé spektrální barvy o určitých vlnových délkách (např. zelená 520–565 nm). Světelné spektrum je obklopeno dvěma dalšími zářeními. Pro nižší vlnové délky je to infračervené záření a pro vyšší vlnové délky ultrafialové

záření. Další druhy elektromagnetického záření jsou např. rádiové vlny, mikrovlny, rentgenové a gama záření.

Světlo, jako kterékoliv jiné elektromagnetické záření (vlnění), má svou rychlost šíření. Tato rychlost (ve vakuu) je stanovena na hodnotu 299 792 458 m/s. Rychlost světla je ve fyzikálním světě považována za největší dosažitelnou rychlost, kterou se mohou hmotné objekty pohybovat. Pro svou významnost se stala důležitou fyzikální konstantou, nese označení c . Z rychlosti světla je definovaná základní fyzikální jednotka jeden metr jako: Vzdálenost, kterou světlo ve vakuu urazí za $1/299\,792\,458$ sekundy.

Pro různá prostředí platí různé rychlosti světla, např. rychlost šíření světla ve skle je okolo 200 000 km/s, nepatrně nižší rychlost bude i v atmosféře (vzduchu). Na rozhraní dvou prostředí dochází ke změně rychlosti šíření světla a k jeho lomu. Podle indexu lomu lze rozlišit dvě optická prostředí: opticky hustší prostředí s větším indexem lomu a opticky řidší prostředí s menším indexem lomu. Platí, že v opticky hustším prostředí je rychlost šíření světla nižší (voda), než v prostředí řidším (vzduch). Optickým prostředím nazýváme každé prostředí, ve kterém se šíří světlo. Tato prostředí můžeme rozdělit podle jejich optických vlastností na:

1. průhledné – prostředí, ve kterém nedochází k rozptylu světla při jeho průchodu. Příkladem mohou být čirá skla v oknech, čirá voda, vakuum, průhledná barevná skla.
2. průsvitné – prostředí, kterým světlo částečně prochází a částečně se rozptyluje. Při průchodu např. mléčným nebo matným sklem nebo přes tenký list papíru.
3. neprůhledné – prostředí, kterým světlo vůbec neprochází. Světlo je silně pohlceno, nebo se odráží od povrchu prostředí zpět. Například zdi, zrcadla, dřevo.

Optická prostředí lze dále dělit na homogenní (stejnorodé) prostředí, které má ve všech bodech stejné optické vlastnosti a naopak prostředí nehomogenní (nestejnorodé), které má v různých bodech prostředí různé optické vlastnosti. Příkladem homogenního prostředí je vakuum nebo číré sklo, nehomogenní prostředí je například kouř, mlha nebo prach ve vzduchu.

Podle barvy dělíme prostředí na optický číré a opticky barevné. Čirým optickým prostředím mohou procházet všechny vlnové délky spektra záření, například světlo. Barevné optické prostředí určité vlnové délky (barvy světla) pohlcuje a jiné prostředím procházejí. Příkladem mohou být různě barevně tónovaná sklička.

Pokud je rychlost šíření světla v optickém prostředí závislá na směru šíření, jde o prostředí anizotropní (krystaly). Prostředí ve kterém rychlost šíření světla není závislá na směru se nazývá izotropní prostředí, například plyny, kapaliny, sklo. [2]

2 OPTICKÁ VLÁKNA

Optické záření umožňuje přenos informace optickým vláknem, nosičem informace je optické záření. Změnou jeho amplitudy, kmitočtu, fáze, polarizace, trvání se mohou zobrazovat každá samostatně nebo ve vhodné kombinaci s přenášenou informací. Pro optický přenos informace má význam oblast vlnových délek mezi 0,5 až 1,6 μm .

2.1 Úvod do optických vláken

Příchod optických vodičů dal základ vysokokapacitnímu přenosu signálu v první fázi především na páteřních sítích, ale stále častěji se objevuje i jako fyzické prostředí přístupových sítí (FTTH - Fiber To The Home apod.). Přenosová kapacita optického vedení je významně vyšší než u metalického vedení (s využitím DWDM - Dense wavelength division multiplexing - Vlnový multiplex, v řádech Tb/s) a výhodou je mimo jiné i skutečnost, že optické vlákno není elektrickým vodičem, což při propojování zařízení s rozdílným a variabilním zemním potenciálem přináší významné výhody. Nevýhodou může být vyšší pořizovací cena optického kabelu, generátoru záření a detektorů, nutnost znalosti problematiky optických tras a větší důraz na opatrnost při pokládce a instalaci. [3]

Světelný paprsek může sledovat jednu z možných cest v jádru. Světelná cesta se označuje jako vid. V případě, že průměr vlákna dovoluje vést více vidů, označuje se jako vlákno mnohovidové. V případě, že vlákno dovoluje vést pouze jeden vid, označuje se jako jednovidové.

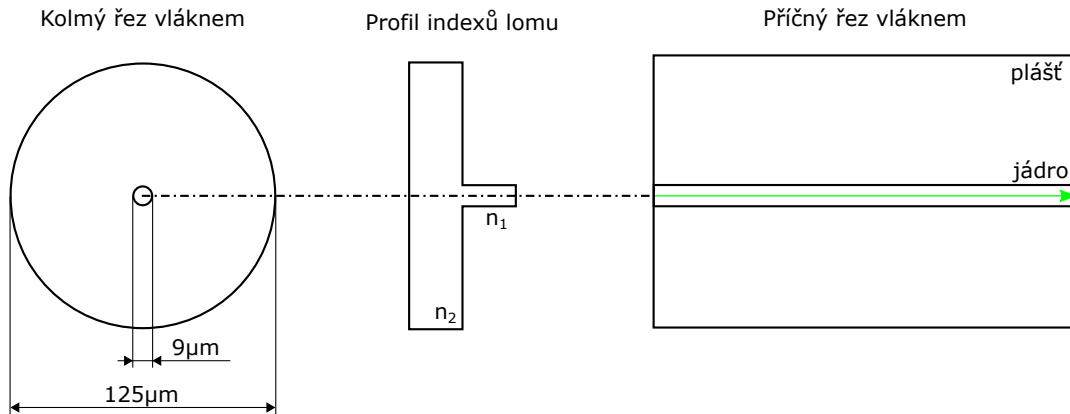
2.1.1 Vlákna jednovidová

Jednovidové optické vlákno (Singlemode, SM) je varianta optického vlákna o průměru jádra vlákna jen 9 mikronů (7-10 mikronů) a průměru pláště 125 mikronů. Takto malý průměr jádra umožňuje šířit jen jeden vid světelného signálu, na vlnové délce 1310 nm nebo 1550 nm, avšak na velmi velké vzdálenosti. Pro takovýto úzký světelný signál je zapotřebí precizní zdroj světla úzkého spektra, který dokáže vyzařovat v úzkém svazku, typicky laser. Zdrojem záření je tedy laser nebo laserová dioda (1310 nebo 1550 nm). Průřez jednovidového vlákna je na obrázku 2.1.

Dosahovaný útlum 0,3 dB/km na vlnové délce 1310 nm a 0,2 dB/km na vlnové délce 1510 nm, se téměř rovná teoreticky dosažitelné fyzikální mezi útlumu, která je vymezená Rayleighovým rozptylem. V praxi pak hodnotu útlumu ovlivňuje pokládka kabelu (ohyby), spoje a konektory, vyvedení do rozvaděčů apod.

Jednovidové optické vlákno najde své uplatnění při vysokorychlostních přenosech dat na větší vzdálenosti (páteřní, mezistátní, kontinentální spoje). Obecně našla tato

optická vlákna uplatnění v telekomunikacích, telekomunikačních sítích a pro vysokorychlostní přenosy v internetu. Na kratší vzdálenosti se používají cenově srovnatelná mnohovidová i jednovidová vlákna. [4]



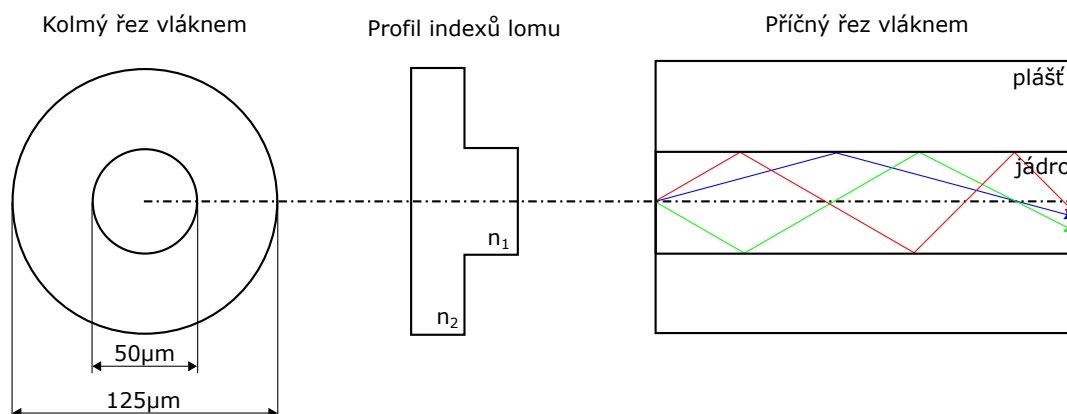
Obr. 2.1: Schéma jednovidového vlákna

2.1.2 Vlákna mnohovidová

Mnohovidové optické vlákno (Multimode, MM) má nejčastěji průměr jádra 50 mikronů (50-200 mikronů), průměr pláště 125 mikronů. Dokáže pracovat s levnějšími koncovými zařízeními za cenu možnosti přenášet informace jen na krátkou a střední vzdálenost (max. jednotky km). Jádrem mnohovidového vlákna se šíří více vidů záření na vlnové délce např. 850 nm a 1310 nm. Vlákno přenáší více paprsků, které do jádra vstupují každý pod jiným úhlem. Jako zdroj záření se používají luminiscenční diody. Průřez mnohovidovým vláknem je na obrázku 2.2.

Monohovidová optická vlákna se nejčastěji používají pro komunikaci na krátké vzdálenosti, jako například uvnitř budovy nebo areálu. Používají se především v lokálních sítích malého rozsahu s menšími přenosovými rychlostmi, LAN. Problémem může být vidová disperze, paprsky mají jinou rychlost šíření vláknem, každý paprsek dorazí v jinou dobu, tím dochází ke ztrátám.

Mnohovidová vlákna mají skokový, nebo gradientní profil indexu lomu. Skoková změna indexu lomu s sebou nese nevýhodu většího útlumu, disperze a malé přenosové kapacity. Dosahovaný útlum 5 – 20 dB/km. Gradientní neboli proměnný index lomu se vyznačuje menším útlumem, nižší disperzí ovšem složitější výrobou. Dosahovaný útlum 2,5 – 5 dB/km pro vlnovou délku 850 nm. [4]



Obr. 2.2: Schéma mnohovidového vlákna

2.1.3 Standard G.652

Standard ITU-T G.652 je základní standard popisující geometrické, mechanické a přenosové vlastnosti jednovidového optického vlákna $9/125\mu\text{m}$ a kabelu. Vláknem typu G.652 má nulovou hodnotu disperze pro vlnovou délku 1310nm , pro kterou je optimalizováno. Vláknem mohou být použita i v oblasti 1550nm , kde nejsou optimalizována. Vláknem jsou typická skokovou změnou indexu lomu na rozhraní jádra a pláště vlákna. Tato vlákna podporují digitální i analogový přenos.

Standard G.652 definuje čtyři různé verze tohoto vlákna (A, B, C, D). Vláknem typu A, B jsou staršího typu, na vlnové délce 1383nm se nachází lokální maximum útlumu v podobě přítomnosti OH- iontů vody, způsobených při výrobě vlákna. Jde o tzv. „water peak“. Vláknem typu C a D jsou již modernější bez tohoto maxima.

Vláknem typu G.652.A je standardní telekomunikační vlákno původně určené pro přenosové systémy SDH (Synchronous Digital Hierarchy) s přenosovou rychlostí až $2,5\text{Gb/s}$.

Vláknem typu G.652.B je vylepšená varianta vlákna typu A. Vylepšená je hodnota měrného útlumu a koeficient PMD (Polarization Mode Dispersion), což umožňuje přenosy s přenosovou rychlostí až 10Gb/s .

Vláknem typu G.652.C je varianta využívající zredukovanou hodnotu vloženého útlumu v oblasti tzv. „water peak“, což umožňuje tento typ optického vlákna provozovat v celém rozsahu vlnových délek a využít všechna dostupná pásma.

Vláknem typu G.652.D je standardní jednovidové vlákno se sníženou hodnotou polarizační vidové disperze, podporující vysokorychlostní přenosy (desítky Gb). Někdy též nazýváno jako All Wave vlákno, vlákno podporující provoz v celém rozsahu vlnových délek. V dnešních systémech je jedním z nejoblíbenějších a nejpoužívanějších typů optických vláken, hlavně díky své univerzálnosti (zpětná kompatibilita s verzemi G.625) a ceně.

Doporučení ITU-T G.652 jsou aktualizována od roku 1984, kdy byla vytvořena. Tato aktualizovaná doporučení jsou určena k udržení pokračujícího obchodního úspěchu tohoto vlákna pro potřeby vysoce výkonných optických přenosových systémů.[5]

2.1.4 Standard G.655

Toto doporučení popisuje jednojádrové vlákno s posunutou nenulovou chromatickou disperzí (NZ-DSF, Non Zero-Dispersion Shifted Fiber). Vlákna jsou navržena pro přenosovou oblast v pásmu 1550 nm. Materiálová disperze těchto vláken byla upravena tak, aby v daném pásmu vlákna dosahovala velmi malé hodnoty chromatické disperze. Malá nenulová hodnota chromatické disperze snižuje riziko projevu vedlejších nelineárních efektů.

Tato vlákna se dnes používají především v dálkových optických telekomunikačních sítích, k provozu technologie DWDM a pro vysoké přenosové rychlosti.[6]

Pro vzájemné porovnání je v tabulce 2.1 přehled základních vlastností standardů G.652 a G.655.

Tab. 2.1: Přehled základních vlastností standardů G.652.C,D a G.655

Typ vlákna		G.652.C	G.652.D	G.655
Vlastnost	Detail	Hodnota		
Průměr vidového pole	Vlnová délka	1310 nm		1550 nm
	Rozsah hodnot	8,6 – 9,5 μm		8 – 11 μm
	Tolerance	$\pm 0,6 \mu\text{m}$		$\pm 0,7 \mu\text{m}$
Průměr pláště	Tolerance	125,0 μm $\pm 1 \mu\text{m}$		
Nesoustřednost jádra	Maximálně	0,6 μm		0,8 μm
Nekruhovitost pláště	Maximálně	1,0 %		2,0 %
Mezní vlnová délka	Maximálně	1260 nm		1450 nm
Měrný útlum α max. hodnoty	1310 – 1625 nm	0,4 dB/km		-
	1383 \pm 3 nm	0,4 dB/km		-
	1550 nm	0,3 dB/km		-
	1625 nm	-		0,4 dB/km
Útlum makroohyby	Poloměr ohybu	30 mm		
	Počet ohybů	100		
	Pro $\lambda = 1625 \text{ nm}$	0,1 dB		
Pevnost v tahu	Minimálně	0,69 GPa		
Koeficient chromatické disperze	λ_{0min}	1300 nm		-
	λ_{0max}	1324 nm		-
	S_{0max}	0,092 ps/nm ² \times km		-
Koeficient polarizační vidové disperze PMD	Výrobních délek	20		
	Q	0,01 %		
	Max PMD _Q	0,5		0,2

3 OPTICKÝ PŘENOSOVÝ SYSTÉM

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, optické záření umožňuje přenos informace optickým vláknem kdy nositelem informace je modulované optické záření, elektricky neutrální fotony. Optická vlákna, podobně jako metalická vedení nebo vlnovody, slouží pro přenos elektromagnetických vln. Elektromagnetické vlny o velmi vysokých kmitočtech řádově stovky THz (10^{13} až 10^{15} Hz) se nazývají světelnými. Z hlediska vlnové délky, jde o délky od desítek nanometrů po jednotky milimetrů.

3.1 Přenos po optickém vlákně

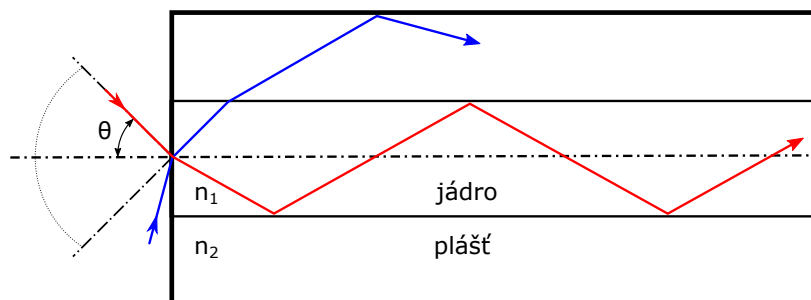
Zásadním rozdílem mezi přenosem elektrického signálu a optického signálu jsou především nositelé tohoto signálu. U galvanické vazby to jsou elektricky nabitě elektrony působící vzájemně jeden na druhého, tak i na okolí vazby. U optické vazby tvoří světelný paprsek neutrální fotony, které na sebe vzájemně nepůsobí. Fotony prochází dielektrickým přenosovým mediem, ve kterém neexistují žádné galvanické vazby. Při přenosu nevznikají elektrická ani magnetická pole, která bývají v elektronických obvodech příčinou různých parazitních vazeb. Optický spoj je proto tak odolný proti vnějším rušivým signálům a obtížně odposlouchatelný. Avšak optické vlákno vykazuje velmi rozdílný útlum pro různé vlnové délky. Proto pro optický přenos informace nejsou vhodné všechny vlnové délky elektromagnetického spektra záření. Výhodný nízký útlum lze docílit právě na vlnových délkách v oblasti 0,5 až 1,6 μm . Především hlavně v oblasti vlnových délek 1,3 až 1,6 μm .

Optická vlákna používají pro vedení signálu světelné paprsky. Princip vedení signálu využívá lomu světelných paprsků, které putují optickým vláknem tak, že se odráží od rozhraní dvou různých prostředí s různým indexem lomu. Pro vedení optického záření světlovodem je podmínkou úplný odraz na rozhraní jádro – plášť, tedy podmínka indexů lomů, kdy index lomu jádra musí být o něco větší než index lomu pláště $n_1 > n_2$. Překročí-li se mezní velikosti úhlu paprsku vzhledem k ose vlákna, paprsek se na místě styku jádra s pláštěm lomí a neodráží se zpět do jádra. Paprsek projde do pláště a dojde k jeho vyvázání ven z vlákna, viz obr. 3.1.

Optické vlákno dokáže do svého jádra navázat jen určité množství světelných paprsků v určitém rozsahu vstupních úhlů. Tuto schopnost optického vlákna definuje tzv. numerická apertura,

$$NA = \sin \theta \quad (3.1)$$

jako sinus největšího úhlu, pod kterým může být světelný paprsek navázán z okolního prostředí do jádra vlákna. Čím je hodnota numerické apertury větší, tím je i schopnost optického vlákna navázat určitý optický výkon větší. [1] [4]



Obr. 3.1: Profil optického vlákna

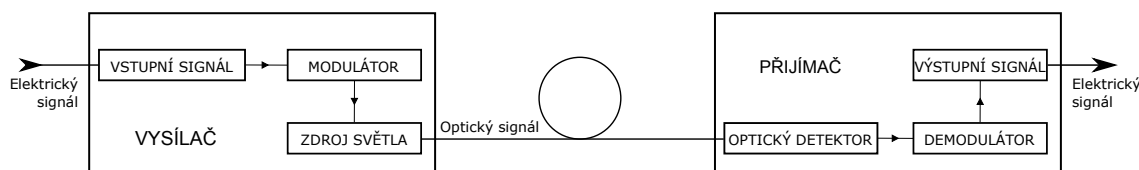
3.2 Optický spoj

Jelikož současná úroveň technologií neumožňuje, abychom byli schopni realizovat veškeré přípravy a zpracování signálu čistě na optickém základě, je vstupní a výstupní signál optického spoje elektrický. Elektrický signál určený k přenosu se na straně vysílače v optickém modulátoru moduluje pomocí zdroje záření, tím se přemění na signál světelný, který se naváže do optického vlákna. Světelné signály jsou imunní proti elektromagnetickému záření. Po průchodu optickým spojem je modulovaný optický signál na straně přijímače pomocí fotodetektoru demodulován na signál elektrický, který je dále zpracován jako u přenosu metalickým vedením. Výhodou těchto přeměn signálu je snadné zpracování elektrického signálu na straně vstupu i výstupu a bezproblémový přenos optického signálu.

Hlavním důvodem těchto přeměn je jednoduchá realizace většiny elektrických obvodů a funkčních bloků pomocí integrovaných obvodů. Vysílací část a přijímací část tak obsahuje mimo optoelektronických prvků a optických soustav, také elektronické obvody pro zpracování vstupního a výstupního signálu např. synchronizační obvody, detekční obvody, paměťové členy nebo třeba řídicí procesory. V blízké budoucnosti lze však očekávat realizace i těchto obvodů pomocí optických prvků (optické integrované obvody).

Současný obousměrný (duplexní) provoz v optických sítích lze řešit použitím dvojice oddělených vláken, kde na jednom vlákně probíhá komunikace jen ve směru vzestupném (upstream) a na druhém vlákně pak ve směru sestupném (downstream). To ovšem znamená použití dvojnásobného množství optických vláken, optických prvků nutných pro přenos, rozbočovačů a optických konektorů pro každý směr zvlášť. Toto řešení není ale často velmi praktické, výhodnější a používanější je vlnové oddělení směrů přenosu tzv. WDD (Wavelength Division Duplex). Kde pro směr sestupný se obvykle využívá relativně úzké pásmo vlnových délek a naopak, pro směr vzestupný je vyhrazeno širší pásmo vlnových délek.

Zjednodušený princip přenosu optickým spojem je na obr.3.2.



Obr. 3.2: Zjednodušené blokové schéma optického spoje

3.3 Přenosové vlastnosti optických vláken

3.3.1 Útlum optických vláken

V optickém vlákne dochází při přenosu světelného signálu ke ztrátám energie signálu neboli útlumu. Výkon signálu postupně klesá se vzdáleností od zdroje signálu. Útlum optického vlákna se udává v jednotkách dB. Je definován jako poměr vstupního světelného výkonu P_1 a výstupního světelného výkonu P_2 pro danou vlnovou délku λ podle vztahu:

$$A(\lambda) = 10 \cdot \log \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \quad (dB) \quad (3.2)$$

Příčinou útlumu světelného signálu v optických vláknech je především absorpce a rozptyl světelných paprsků v materiálu jádra. Útlum může vznikat přímo v materiálu vlákna, na rozhraní prostředí vlákna, při spojování dvou vláken nebo na mikroohybech a makroohybech způsobených pokládkou optického vlákna. Součtem těchto jednotlivých útlumů je pak celkový měrný útlum. Všechny tyto ztráty jsou závislé na vlnové délce šířícího se světelného signálu.

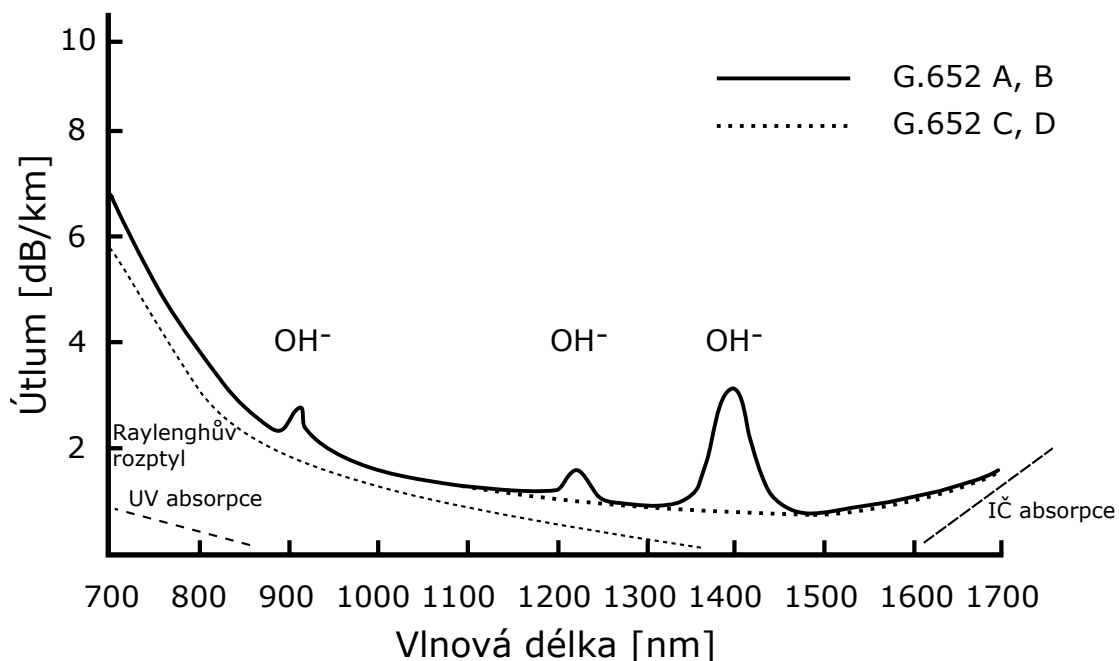
Ztráty absorbcí mají největší podíl na celkovém útlumu vláknových vlnodů, jsou způsobeny absorpcí optického výkonu na molekulárních nečistotách a příměsích v materiálu jádra vlákna (viz obr. 3.4.a). Z nichž největší vliv mají ionty kovů železa, mědi, chromu a ionty vody. Přítomnost těchto iontů je ovlivněna „čistotou“ výroby a provedení vnější ochrany. Při výrobě optického vlákna dochází k tepelným chemickým reakcím, na kterých se významně podílí voda. Po těchto úpravách ve vláknu zůstávají ionty OH^- , které na některých vlnových délkách způsobují absorpci optického záření.

Pásmo vlnových délek $2,8 \mu\text{m}$ a $4,8 \mu\text{m}$ nevyužíváme pro optický přenos vlákem. Další harmonická pásma OH^- iontů pak spadají do oblasti vlnových délek $0,94 \mu\text{m}$, $1,24 \mu\text{m}$ a $1,38 \mu\text{m}$, což už jsou vlnové délky využívané pro optický přenos. Tato harmonická pásma jsou zřetelná na útlumové křivce (obr. 3.3) jako lokální maxima útlumu pro danou oblast vlnových délek. Nejvýznamnější útlumová špička je v oblasti vlnových délek $1,36\text{--}1,46 \mu\text{m}$ se středem v okolí 1383nm , kvůli příčině jejího

vzniku při výrobě se v praxi často označuje jako tzv. „water peak“.

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, vlákna podle doporučení standardu ITU-T G.652 varianty A a B, která jsou technologicky staršího typu, trpí právě přítomností OH^- iontů tedy vyšším měrným útlumem již z výroby. U novějších vláken typu C a D se podařilo přítomnost OH^- iontů při výrobě zredukovat nebo z podstatné části odstranit. To zpřístupnilo celé pásmo vlnových délek 1260–1625 nm. Tyto typy vláken proto netrpí výrazným nárůstem měrného útlumu v daných oblastech vlnových délek.

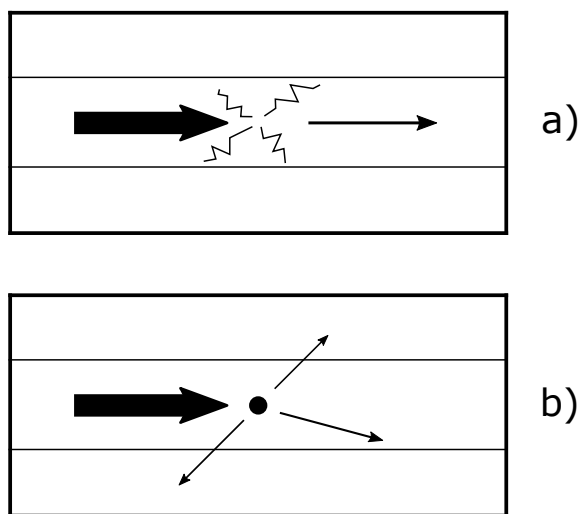
Při výrobě vlákna o požadované nízké hodnotě měrného útlumu, je nutné zajistit a dbát na nízkou koncentraci iontů kovů a OH^- iontů. V technologické praxi je za určitých podmínek možné dosáhnout koncentrace OH^- iontů na hranici čistoty $1 \text{ z } 10^9$ i méně. Přídavný útlum je pak pouze jen několik desetin decibelů na kilometr. U vláken s malými absorpčními ztrátami se uplatňují ještě další typy ztrát, z nichž jedny z nejdůležitějších jsou rozptylové ztráty, dále ztráty způsobené mikroohyby (mikrodeformace), změnou indexu lomu, prasklinami jádra, excentricitou jádra, fluktuacemi složení jádra a podobně. [4] [3]



Obr. 3.3: Spektrální útlumová charakteristika

Ztráty rozptylem vznikají na molekulárních nehomogenitách v amorfních materiálech. Amorfni látka (sklo, plyn, kapaliny) nemá pravidelně uspořádanou svou krystalickou mřížku, tudíž molekuly materiálu jsou náhodně rozloženy a tvoří mikronehomogenity indexu lomu materiálu. Velikost rozptylových ztrát závisí na velikosti těchto nehomogenit. Rozptyl vznikající na nehomogenitách a drobných nečistotách rozměrově menších než je ve srovnání vlnová délka optického záření (viz obr. 3.4.b), nazýváme Rayleighův rozptyl. Velikost ztrát Rayleighovým rozptylem je nepřímo úměrná čtvrté mocnině vlnové délky šířeného optického signálu. Ztráty způsobené Rayleighovým rozptylem lze považovat za teoretickou minimální hodnotu útlumu pro danou vlnovou délku. Vliv a velikost útlumu těchto ztrát roste velmi rychle pro krátké vlnové délky blízké ultrafialové oblasti.

Ztráty rozptylem jsou přítomny vždy a v každém optickém prostředí, nelze je nijak odstranit. Následkem toho vznikají lomy a odrazy paprsků, které mají všesměrový charakter rozptylu, tříští se do všech směrů a tím je ztracena část optického výkonu. Optické záření, které takto změnilo svůj směr šíření, je odkloněno tak, že pronikne do pláště vlákna, vyváže se z jádra vlákna ven a zanikne. [3]



Obr. 3.4: Útlumové ztráty a) vznik absorpce, b) vznik rozptylu

3.3.2 Disperze v optických vláknech

Disperze vln optického záření v optických vláknech je hlavní příčinou zkreslení přenášeného signálu. Disperze je definována jako rozdíl šířky impulsu v polovině jeho výšky na začátku a na konci vlákna. Disperze světla je jev, kdy rychlost šíření světla

(světelného signálu) v optickém prostředí závisí na frekvenci světla. Frekvenční závislost indexu lomu, která vyvolá frekvenční závislost skupinové a fázové rychlosti šíření vlny v materiálu vlákna, je příčinou materiálové disperze. Materiálová disperze se projevuje i u vln šířících se prostředím, které není nijak ohraničené.

V optickém vlákně (vlnovodu) se materiálová disperze každého vidu kombinuje s disperzí vlnovodovou, která je způsobena geometrickými změnami vidu a tím i změnami podélné skupinové i fázové rychlosti šíření při změně frekvence. Výsledná kombinace materiálové a vlnovodové disperze se označuje jako chromatická disperze. Rozdělíme-li šířící se energii světelného paprsku do více vidů, připojuje se k chromatické disperzi ještě disperze vidová. Vidová disperze je způsobena rozdílnou rychlostí šíření jednotlivých vidů vláknem. [1]

Chromatická disperze je jev, který nastává při použití zdroje záření, který není ideálně monochromatický. Vyzařované optické záření z takového zdroje obsahuje určité spektrum vlnových délek. Jednotlivé spektrální složky (barvy) spektra přenášeného signálu se vláknem šíří rozdílnou rychlostí. Jelikož je přenášený signál vždy složen z více spektrálních složek, některé složky se zpožďují oproti jiným, což má za následek časové rozšíření signálu při průchodu vláknem. Takto rozšířený signál pak zasahuje i do sousedních bitových registrů a způsobuje zkreslení přenášené informace, zároveň tím klesá jeho energie a tím se snižuje odstup signálu od šumu.

Koeficient chromatické disperze udává velikost chromatické disperze vlákna. Koeficient udává hodnotu změny skupinového zpoždění signálu při průchodu vláknem v závislosti na vlnové délce šířícího se signálu. Velikost koeficientu chromatické disperze vlákna se mění v závislosti na šířce pásma, šířka pásma vlnovodu je nepřímo úměrná šířce pásma zdroje záření a délce optické trasy.

Jak již bylo zmíněno, chromatická disperze je složena z disperze materiálové a disperze vlnovodové. Podstata materiálové disperze je v závislosti indexu lomu materiálu použitého při výrobě vlákna na vlnové délce optického záření. Jednotlivé vlnové délky spektra se šíří materiálem vlákna různě rychle. Vlnovodová disperze je důsledek geometrických vlastností vlákna ovlivňujících přenášený signál. Vhodnou volbou profilu indexu lomu v jádře lze ovlivnit vlnovodovou disperzi.

Pro optický vlnovod je vhodné volit takový pracovní kmitočet, pro který je chromatická disperze ve středu přenášeného pásma nulová. Příkladem mohou být standardní jednovidová křemičitá vlákna, u kterých přesunutím pracovního režimu z vlnové délky 1280 nm, kde je materiálová disperze nulová, na vlnovou délku 1330 nm, kde je nulová chromatická disperze, dochází ke zvýšení kvality přenosu. Tímto způsobem lze rozšířit přenášené pásmo u jednovidových vlnovodů, které trpí pouze chromatickou disperzí. [1] [7]

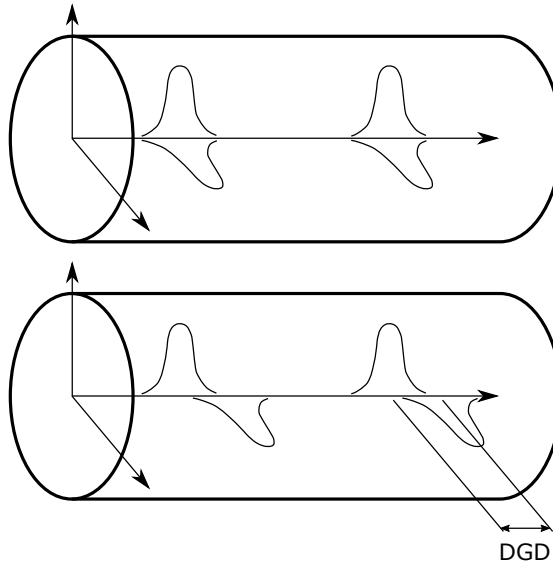
Vidová disperze je u mnohovidových vlnovodů s homogenním jádrem hlavním z faktorů, které omezují šířku přenášeného pásma, přenosovou rychlost nebo vzdálenost přenosu. Vidová disperze je způsobena rozdílnou skupinovou rychlostí šíření jednotlivých vidů. Za pomoci geometrické optiky lze tento jev jednoduše vysvětlit. Světelný paprsek s osou vlnovodu svírá určitý úhel, čím je úhel mezi dráhou paprsku a osou vlnovodu větší (čím vyšší vid), tím je delší jeho dráha mezi vstupní a výstupní stranou vlnovodu. Podélná rychlost ve směru osy vlnovodu je menší. Následkem toho se vyšší vidy, vidy bližší svému meznímu kmitočtu, šíří pomaleji než vidy nižší. Mezi jednotlivými vidy bude na stejné vzdálenosti od počátku vlnovodu časový rozestup daný rozdílem jejich skupinových zpoždění.

Vliv vidové disperze, zpoždění jednotlivých vidů, můžeme ovlivnit zmenšením počtu šířících se vidů vláknem např. volbou vhodnějších konstrukčních parametrů. Zredukovat počet šířících se vidů můžeme až na jeden vid. Pro jednovidový vlnovod vidová disperze zcela odpadá, trpí pouze chromatickou disperzí. Dalším způsobem jak snížit vliv vidové disperze je vyrovnání skupinových rychlostí šíření jednotlivých vidů. Toho lze dosáhnout vhodně zvoleným profilem indexu lomu, např. pro gradientní vlnovody (vlnovody s nehomogenním jádrem) platí, že s rostoucí vzdáleností světelného paprsku od osy vlnovodu roste, vlivem zmenšujícího se indexu lomu, rychlost šíření paprsku. Dochází ke srovnání rychlostí šíření vyšších vidů s vidy nižšími. [3]

Polarizační vidová disperze nastává u jednovidových vláken, kdy jediný vid, procházející optickým vláknem, se šíří ve dvou vzájemně kolmých polarizačních rovinách, různou rychlostí. Vlivem kruhové nesymetrie optického vlákna způsobené například výrobní nedokonalostí, mikroohyby, nevhodnou instalací, mechanickým namáháním nebo nevhodně zvoleným uložením optického vlnovodu na místě, kde působí další vnější vlivy (tlak, vítr, vlhkost, otřesy), dochází k šíření obou polarizačních rovin jinou rychlostí a tím i k rozšíření impulzu v čase a jeho zkreslení, viz obrázek 3.5.

Problematika tohoto jevu začala narůstat v souvislosti s růstem přenosových rychlostí v jednovidových optických vláknech nad 2,5 Gbit/s. Do roku 1990 nebyla tato disperze ani známa. Základním měřítkem polarizační vidové disperze je zpoždění (DGD - Differential Group Delay) měřené v pikosekundách. Vzniklé zpoždění optického pulzu nemusí přijímač v určité vzdálenosti od zdroje již přesně dekodovat, a tím dochází ke vzniku chyby. Polarizační vidová disperze je vyjádřena koeficientem PMD jako podíl zpoždění signálu $\Delta\tau$ a délky trasy l , viz rovnice 3.3. Pro krátké vzdálenosti je polarizační vidová disperze přibližně lineární.

$$PMD = \frac{\Delta\tau}{l} \quad (ps \cdot km^{-1}) \quad (3.3)$$



Obr. 3.5: Vznik polarizační vidové disperze

Pro vzdálenosti větší než 10 km se polarizační vidová disperze nešíří lineárně, ale s odmocninou vzdálenosti.

$$PMD = \frac{\Delta\tau}{\sqrt{l}} \quad (ps \cdot km^{-1}) \quad (3.4)$$

V porovnání s ostatními druhy disperze, je vliv polarizační vidové disperze menší, i přesto ale omezuje rychlost přenášeného signálu a také odstup signál-šum. Vhodnou volbou kvalitního vlákna s garantovanou hodnotou koeficientu PMD je možné vliv polarizační vidové disperze omezit. [4] [7]

4 PASIVNÍ OPTICKÉ PRVKY

4.1 Pasivní prvky

Při optických přenosech je, v závislosti na konfiguraci optické sítě, v mnoha případech zapotřebí přenášený signál upravit. Nejčastější úpravou signálu je jeho zesílení při přenosech na větší vzdálenosti, kdy s uvažovanou vzdáleností klesá hodnota přenášeného výkonu. Z tohoto důvodu se do trasy zapojují optické zesilovače, které zesilují přenášený signál. Tato úprava signálu z nich ale činí aktivní prvky optické sítě, kterými se zabývat nebudeme.

Další nejčastější úpravou signálu je vydělení optického výkonu z hlavního směru šíření, nebo naopak sloučení více optických záření do jednoho. V dalších případech může jít o potřeby rozpojení, přepojení nebo přesměrování apod. Většinu těchto úprav lze realizovat za pomoci pasivních prvků, vazebních členů.

U vazebních členů je kladen důraz především na nízké vložné ztráty ve směru šíření přenosu a naopak, vysoké ztráty v závěrném směru. Dále na nezávislé rozdělení vidů do jednotlivých směrů, uživatelsky jednoduché nastavování, snadná technologie výroby a nízká cena.

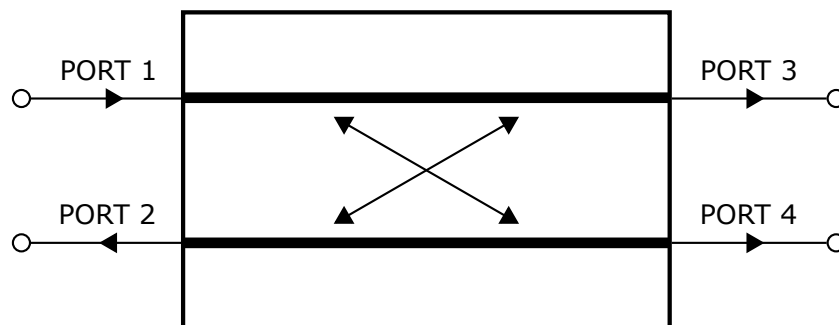
Pro výrobu pasivních vazebních prvků, především tedy rozbočovačů, v dnešní době existují dvě výrobní technologie o kterých je více v kapitole 4.2.

Nejběžnější pasivní prvek pro úpravu přenosu signálu je vláknová odbočnice také jinak coupler nebo splitter. Ve většině případů není rozdíl mezi couplerem a splitterem, funkce mají stejné. Teoreticky jde jen o to, které porty se zvolí za vstupní a které za výstupní. Coupler, z anglického „couple“ – spojovat, by označoval pasivní prvek, který více vstupních optických signálů sloučí do jednoho výstupního. Splitter, z anglického „split“ – rozdělit, je naopak prvek, který jeden vstupní optický signál rozdělí na více výstupních signálů. V praxi se ovšem takovéto označení nepoužívá. Názvy pasivních součástek tohoto typu se volí dle potřeby.

4.1.1 Optický coupler

Vláknová odbočnice neboli coupler, je pasivní optický prvek, který slouží ke sloučení optických signálů z N vstupních vláken do M výstupních optických vláken (2×2). Coupler není závislý na napájení, na přenášeném protokolu ani na přenosových rychlostech. Pro připojení se používají jednovidová i mnohovidová vlákna.

Coupler lze zapojit jako rozbočovač, provádí pak tedy pasivní rozdělení optického signálu do více vláken, typicky z jednoho vstupu na dva výstupy. Poměr rozdělení je možné nastavit dle potřeby, nejčastěji se volí poměry 50:50, 70:30, 90:10 ale lze se setkat i s poměrem 99:1. S poměrem dělení roste i hodnota vloženého útlumu,



Obr. 4.1: Optický coupler

kteřá má za následek zeslabení procházejícího optického signálu. Před zapojením těchto pasivních prvků do optické trasy je proto důležité dbát na výkonovou rezervu přenosové soustavy. Různý může být i počet vstupů a výstupů, standardní je 1×2 jeden vstup a dva výstupy, pro měřicí účely je vhodnější konfigurace 2×2 dva vstupy a dva výstupy, viz obr. 4.1. Couplery jsou vyráběny převážně fúzní technologií, spojování jader vláken za vysoké teploty a tlaku, více v kapitole 4.2.1.

Coupler s dělicím poměrem 50:50, v konfiguraci 1×2 našel své využití například pro potřeby plně duplexní komunikace na jednom optickém vlákně. Dále na jednovidových vláknech, pro připojení protokolového analyzátoru, propojení telefonních ústředěn a v průmyslových přenosech po sběrnici. [8]

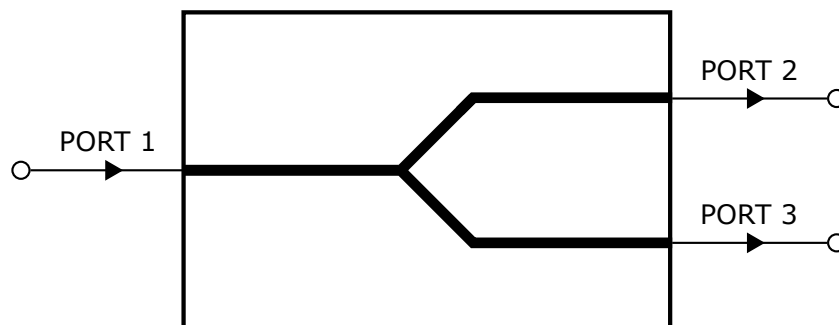
4.1.2 Optický splitter

Optický rozbočovač neboli splitter je pasivní prvek, který umožňuje rozdělit přenášený optický signál z jednoho vstupního vlákna do N výstupních vláken. N je obvykle mocnina čísla 2 (2, 4, 8, 16, ...). Tudíž nejběžnější dělicí poměry jsou 1:2, 1:4, 1:8, 1:16 a 1:32. Díky těmto dělicím poměrům je optický splitter využíván především v pasivních optických sítích PON (Passive Optical Network), např. FTTx.

Důležitým parametrem u optických rozbočovačů je celková hodnota vloženého útlumu. S rostoucím počtem výstupů, tedy i dělicím poměrem, roste velikost vloženého útlumu a tím i celková hodnota vloženého útlumu rozbočovače.

Pasivní optický rozbočovač je základním prvkem v pasivních optických sítích, kde realizuje v sestupném směru rozbočování optického signálu k jednotlivým koncovým jednotkám. Naopak v opačném, vzestupném směru jednotlivé optické signály slučuje do společného vlákna směrem k centrálnímu uzlu. [9]

Zjednodušené schéma optického rozbočovače, splitteru je na obrázku 4.2

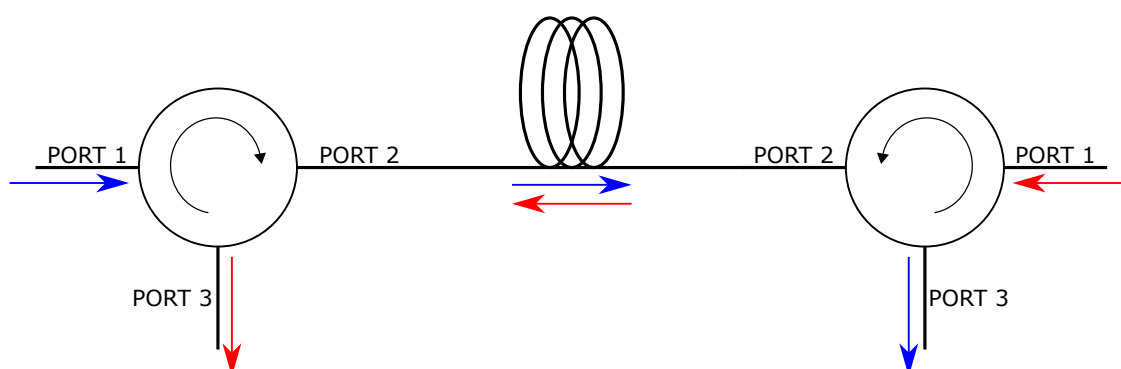


Obr. 4.2: Optický splitter

4.1.3 Optický cirkulátor

Cirkulátor je pasivní optický prvek, který slouží k sloučení nebo dělení optického signálu. Standardně je optický cirkulátor vybaven třemi porty přes které umožňuje bezpečný obousměrný provoz po jednom vlákně, na jedné vlnové délce, viz obr. 4.3. Vstupní optický signál je navázán do portu 1 a s minimálním útlumem přenášen na port 2, vstup z portu 2 je s minimálním útlumem přenášen na port 3. Optický signál směřovaný z portu 2 nebude možné detekovat na portu 1. Optický cirkulátor zabraňuje těmto průchodům signálu z portu 2 na port 1, z portu 3 na port 1 a z portu 3 na port 2, vlivem vysoké izolace tedy vysokým vloženým útlumem (desítky dB) v těchto směrech šíření. Celkově optický cirkulátor vkládá do optické trasy útlum kolem 1 dB.

Právě díky těmto vlastnostem, vysoké hodnotě izolace, nízkým přeslechům a malým vloženým ztrátám jsou optické cirkulátory široce používány v moderních komunikačních systémech, například jako doplněk multiplexerů nebo ke kompenzaci chromatické disperze.

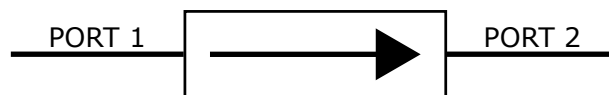


Obr. 4.3: Obousměrný přenos po jednom vlákně pomocí cirkulátorů

Technologie optických cirkulátorů je téměř shodná s technologií vláknových odbočnic. Výhodou může být menší vstupní útlum, není tedy pak zapotřebí velká výkonová rezerva na pokrytí útlumových ztrát. Ovlivněna je však výše ceny prvku. [11]

4.1.4 Optický izolátor

Optický izolátor (obr. 4.4) je pasivní prvek, který umožňuje průchod optického signálu jen v jednom směru šíření. Izolátory se používají k ochraně optického zdroje před zpětnými odrazy, aby se zabránilo nežádoucím účinkům zpětné vazby do optického zdroje. Zpětné odrazy mohou poškodit zdroj, způsobit změnu modulace nebo frekvenční posun přenášeného optického signálu. Ve výkonově náročných aplikacích mohou zpětné odrazy způsobit nestabilitu a výkonové špičky.



Obr. 4.4: Optický izolátor

4.2 Technologie výroby

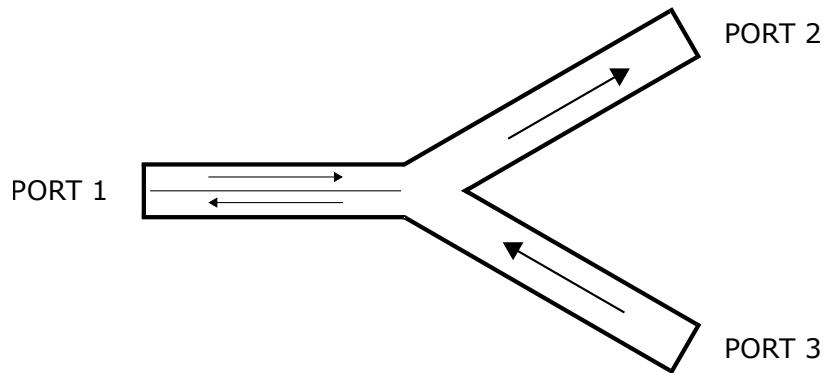
V zásadě existují dvě výrobní technologie optických rozbočovačů (vazebních prvků). Starší z nich je technologie FBT (Fused Biconic Taper), tzv. fúzní metoda založená na spojování jader optických vláken. Modernější PLC (Planar Lightwave Circuit), tzv. planární metoda založená na optických integrovaných obvodech. Obě metody mají své výhody a nevýhody a záleží na potřebě uživatele, pro který typ technologie se rozhodne.

Pro obě technologie je základním stavebním prvkem tzv. Y-článek, viz obr. 4.5, který je sám považován za nejjednodušší typ rozbočovače s jedním vstupem a dvěma výstupy. Rozbočovací poměr Y-článu je tedy 1:2.

4.2.1 FBT

Tradiční, starší výrobní technologii FBT vznikají například tzv. fúzní rozbočovače.

Výrobní metoda fúzních rozbočovačů spočívá v spojování jednotlivých jader optických vláken. Dvě paralelní optická vlákna se k sobě za působení vysokých teplot a tlaků svaří tak, že jejich jádra se dostanou velmi blízko k sobě. Takto k sobě blízka jádra optických vláken umožňují navázat určitou část optického svazku z jednoho



Obr. 4.5: Y-článek

vlákna do druhého, sousedního, vlákna. Část takto spojených jader se nazývá spojovací oblast, délka této spojovací oblasti (sváru) pak ovlivňuje dělicí poměr, v jakém se optický výkon na vstupu rozloží do jader obou vláken. Vzniklý vazební člen, rozbočovač, je v podstatě jedno optické vlákno se dvěma jádry, které jsou velmi blízko sobě. Způsob výroby je velmi náročný na přesnost. [9]

Kaskádním spojováním několika základních Y-článeků lze získat rozbočovač s požadovaným počtem výstupů.

Vyrobené rozbočovače mají vyšší hodnotu vloženého útlumu závisujícího na vlnové délce a zvoleném dělicím poměru. Dále jsou velmi citlivé na teplotu, provoz mimo rozsah doporučených provozních teplot vede k jejich poruše. Náročnost výroby pak vede k menšímu počtu výstupů rozbočovače. Tato omezení staví FBT prvky do nevýhodné pozice než PLC alternativy.

4.2.2 PLC

Vyspělejší výroba optických součástek pomocí planární technologie tzv. PLC. Výroba se velmi podobá výrobě polovodičů nebo mikroprocesorů, což vede k větší stabilitě a funkčnosti systému, ale ke zvýšení výrobních nákladů. Technologie v procesu výroby využívá pro leptání obvodů litografických metod. To umožňuje vyšší dělicí poměr a vynikající funkčnost při výrobě např. optických rozdělovačů. Zařízení vyrobená touto technologií pracují v širším rozsahu teplot než zařízení vyrobená technologií FBT, dále pracují s širokým spektrem vlnových délek, což umožňuje individuální nastavení v případě potřeby.

Výroba optického rozdělovače planární metodou začíná tenkými destičkami křemenného skla. Tyto destičky se litograficky pokryjí tak, že na nich zůstane mapa požadovaných optických tras pro přenos. Destičky dále projdou řadou chemických úprav, při kterých se vytvoří jádro vlnovodu. Plášť vlnovodu tvoří sklo destičky.

V další části výroby se připojí vstupní a výstupní optická vlákna tak, že se svými jádry navážou do tzv. V-drážky vláknového pole rozbočovače. Celý rozbočovač se pak sestaví dohromady a zalije do pevného pouzdra pro zajištění dostatečné ochrany. Výroba a sestavení PLC rozbočovačů je velmi náročný proces na přesnost. Náročnost těchto výrobních procesů se projevuje na výrobních nákladech PLC rozbočovačů. Za pomoci dnešní techniky je výroba PLC rozbočovačů s vysokým počtem výstupních portů (68, 128) zvládnuta. [3]

Mezi výhody PLC rozbočovačů určitě patří kompaktní konstrukce, která umožňuje jednoduše zvýšit hustotu zapojení, rovné dělicí poměry mezi výstupy, zvýšená stabilita ve všech dělicích poměrech, kvalitní design a nízká míra poruchovosti.

Nevýhodou je pak složitější a náročnější výrobní proces. Dražší zavádění v menších poměrech než srovnatelné FBT prvky.

Tab. 4.1: Přehled základních vlastností technologií FBT a PLC

	FBT	PLC
Vlnové délky	850 nm 1310 nm 1550 nm	1260 nm - 1650 nm
Počet vstupů	jeden nebo dva	jeden nebo dva
Počet výstupů	max. 32	max. 64
Dělicí poměr	nastavitelný	rovnoměrný
Ostatní	vyšší poruchovost nižší cena	nižší poruchovost vyšší cena

5 ZDROJE A DETEKTORY OPTICKÉHO ZÁŘENÍ

5.1 Zdroje optického záření

Zdrojem záření je nejčastěji optoelektronická součástka nebo obvod. Jeho hlavním úkolem je převod elektrické energie na optické záření. Zároveň může provádět požadovanou modulaci optického signálu, anebo je původní optický signál modulován až v modulátoru záření. Bez zdroje optického záření by se optický přenosový systém neobešel. Z důvodů vysokých nároků na zdroje záření se velmi intenzivně studují například polovodičové zdroje, které generují záření na bázi pevné fáze při pokojové teplotě. Mezi nepoužívanější polovodičové optické zdroje patří luminiscenční diody a laserové diody.

Nároky kladené na optické zdroje záření vycházejí především z požadavků na rychlost přenosu. Pozornost je kladena hlavně na tyto požadavky: nejvýznamnější je co největší účinnost přeměny elektrické energie na energii zářivou, generace optického záření při pokojových teplotách a na takových vlnových délkách, kde je útlum používaných optických vláken co možná nejmenší. Dále vysoká spolehlivost a životnost, snadná modulovatelnost v širokém rozsahu, vysoká monochromaticnost (koherence generovaného záření) a úzká směrová charakteristika výstupního záření. Snadnost navázání generovaného záření do optického vlákna, nízká cena, malé rozměry a váha.

Snadné navázání generovaného záření do optického vlákna a velkou účinnost této vazby lze zajistit již při výrobě, přímým napojením zdroje záření na optické vlákno s požadovanou délkou a typem konektoru. Uživatelé tímto odpadají problémy spojené s navazováním optického záření do vlákna.

Optické informační a telekomunikační systémy a systémy optoelektronického zpracování informace používají tyto druhy zdrojů:

- nekoherentní - luminiscenční polovodičové diody (LED, Light Emitting Diode)
- koherentní - polovodičové lasery (LD, Laser Diode)

5.1.1 Luminiscenční diody

Luminiscenční diody, někdy též nazývané elektroluminiscenční, jsou levným zdrojem nekoherentního záření. Pro svou snadnou modulovatelnost, lehkou dostupnost a dlouhou životnost jsou častou volbou zdroje záření. Modulují se snadno, avšak směrová charakteristika výstupního svazku je velmi široká a tím i vyzářený výkon je menší v porovnání s laserovými diodami.

Používají se v méně náročných systémech, v optických přenosových systémech při nižších rychlostech přenosu a na kratší vzdálenosti.

Fyzikální princip luminiscenčních diod je založen na rekombinaci elektronů. Při průchodu elektrického proudu přechodem polovodičové diody v propustném směru, vzniká optické záření. Tato energie, která vzniká při průchodu elektrického proudu diodou, vytváří páry elektron-díra v aktivní oblasti. Rekombinací elektronu s dírou, odevzdá elektron energii, která je rovna přibližně šířce zakázaného pásu. Pravděpodobnost rekombinace lze zvýšit připojením diody v propustném směru ke zdroji napětí. Část energie vzniklé rekombinací se může vyzářit do okolí mimo krystal diody nebo může být část energie absorbována v mřížce materiálu krystalu. Absorbovaná energie se projeví zvýšením teploty krystalu diody. Energie, která se vyzářila mimo krystal, je vyzařována ve formě fotonů na různé vlnové délce. Vlnová délka, barva vyzařovaného světla, je dána chemickým složením použitého polovodiče. Polovodičové luminiscenční diody jsou vyráběny v mnoha různých barvách viditelného, infračerveného a ultrafialového spektra. [7]

Jako základní materiál optického zdroje záření se hodně používá galium arzenid (GaAs), vlnová délka vyzařovaného optického záření je 0,89 μm , což je ještě oblast neviditelného infračerveného záření. Vhodnou kombinací základního materiálu a dalších přidaných složek je možné ovlivňovat generovanou vlnovou délku a šířku pásma. Kombinací základního materiálu například s fosforem, získáme tzv. galium arzenid fosfid (GaAsP), materiál ze kterého vyrobený PN přechod, vyzařuje červené viditelné záření. Použitím vhodných kombinací materiálu o různých šířkách zakázaného pásu, můžeme získat polovodičové diody svítící zeleným, žlutým nebo oranžovým světlem, v propustném směru. [4]

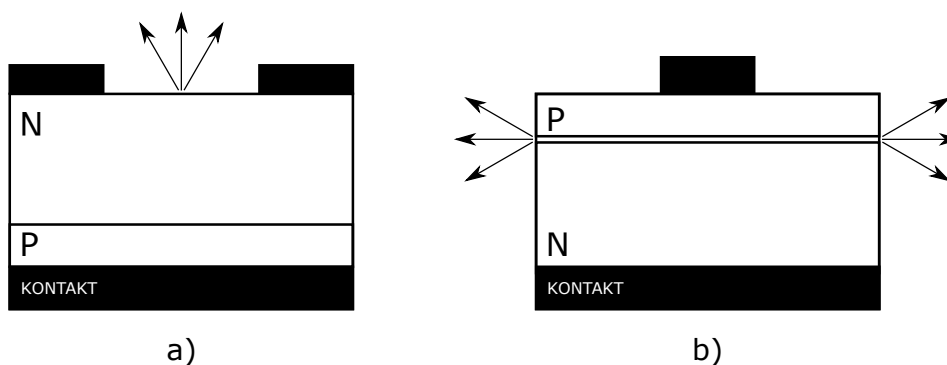
Pro zdroje optického záření se z hlediska připojení optického vlákna, používají dva typy luminiscenčních diod, čelně emitující dioda a hranově emitující dioda.

Čelně emitující dioda

Nejjednodušší a nejpoužívanější typ luminiscenčních diod používaný jako zdroj záření v optoelektronice. Emitující záření vychází z plochy součástky, viz obr. 5.1.a. Výhodou je mechanická odolnost, spolehlivost, jednoduchá výroba, dlouhá živostnost a nízká cena. Potenciálně má nejvyšší přenosovou rychlost, ale při vychýlení spoje s osou vlákna jen o několik stupňů, způsobí více než poloviční ztráty. Modulační rychlosti kolem stovek MBd/s umožňují dosáhnout maximální emitovaný výkon. Nevýhodou je velká šířka spektra generovaného záření, která znemožňuje jejich využití v některých přenosových systémech. Pro vyšší modulační rychlosti je třeba snížit emitovaný výkon.

Hranově emitující dioda

Tento druh diody emituje záření z hrany oblasti přechodu, viz obr. 5.1.b. Takováto struktura se běžně používá pro laserové diody. Hranově emitující dioda produkuje méně světla, než čelně emitující dioda, ale díky své technologii dokáže větší emitovaný výkon s užším spektrem lépe soustředit do optického vlákna. Ale ani tento typ diody není pro některé systémy schopný dosáhnout požadovaných vlastností.



Obr. 5.1: Zjednodušené schéma a) čelně emitující dioda b) hranově emitující dioda

5.1.2 Laserové diody

U polovodičových luminiscenčních diod se světlo generuje prostřednictvím spontánní emise, fotony se generují nezávisle na sobě. U laserových diod se světlo generuje stimulovanou emisí, kdy jeden elektron budí druhý a vzniká tzv. řetězová reakce. Tímto jevem se emitovaná energie násobí.

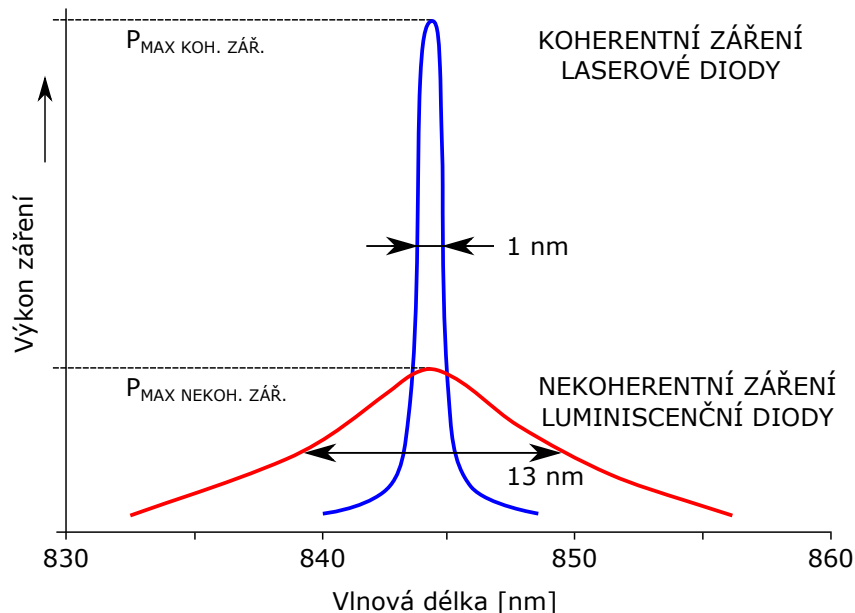
Laserové diody fungují při nízkých proudech v propustném směru velmi podobně jako hranově emitující luminiscenční diody. Po dosažení prahového proudu se výkon stimulovaného záření prudce zvýší a je emitováno koherentní záření. Závislost vyzářeného výkonu na velikosti proudu je po překročení prahového proudu lineární. Laserová dioda při překročení prahového proudu přechází z režimu nekoherentního záření do režimu stimulované emise a začíná emitovat záření koherentní. Polovodičové diody a polovodičové lasery jsou citlivé na okolní teplotu, hodnota prahového proudu roste s rostoucí teplotou. S rostoucí teplotou tak klesá hodnota výstupního výkonu.

Vyzařované spektrum laserových diod je velmi úzké (desetiny až jednotky nm), díky tomu jsou schopny přenášet signál optickým vláknem na velké vzdálenosti bez zkreslení vysílaného signálu. Spektrum laserových diod je závislé na teplotě, s rostoucí teplotou se spektrum posouvá k vyšším hodnotám vlnových délek. Dále

se vyzařované spektrum mění s rostoucím proudem diody, tedy se zvyšujícím se výkonem emitovaného záření. [7]

Laserové diody se vyrábějí o různých vlnových délkách, pro vhodné použití v různých systémech. Mezi nejpoužívanější vlnové délky patří 850 nm, 1310 nm a 1550 nm, což jsou vlnové délky, na kterých mají používaná optická vlákna minimální útlum (pro 1550 nm), minimální materiálovou disperzi (oblast kolem 1310 nm) nebo jsou pro danou vlnovou délku levné materiály pro výrobu zdrojů záření (pro 850 nm). Laserové diody mohou být dvojího typu podobně jako luminiscenční diody, čelně nebo hranově emitující. Zástupcem čelně emitujících mohou být laserové diody typu VCSEL (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser), hranově emitující jsou laserové diody typu DFB (Distributed FeedBack).

Pro srovnání je na obr. 5.2 porovnána vyzařovací charakteristika luminiscenční diody a laserové diody.



Obr. 5.2: Spektrální vyzařovací charakteristiky

Důležitým požadavkem je vzájemná kompatibilita parametrů zdrojů a detektorů záření s vlastnostmi přenosových prostředí, optických vláken.

5.2 Detektory optického záření

Při vysílání optického záření optickým vláknem je, na druhé straně od zdroje, zapotřebí toto záření detekovat, pro potřeby zpracování vysílaného signálu.

Detektory optického záření se používají pro detekci záření, které dopadá na jejich povrch. Záření, které dopadne na povrch detektoru je absorbováno ve formě fotonů a transformováno na elektrický proud. Původní optický signál je nyní signál elektrický. Jedním z nejdůležitějších parametrů optických detektorů je právě účinnost tohoto převodu.

Takovéto fotoelektrické detektory (fotodetektory, fotodiody) jsou založeny na vnějším nebo vnitřním fotoelektrickém jevu. V závislosti na velikosti energie dopadajících fotonů vzrůstá elektrická vodivost. Dopadající foton je absorbován polovodičovým přechodem, což má za následek generování volného páru elektron a díra. Po přiložení elektrického napětí do obvodu detektoru, začne tímto obvodem protékat elektrický proud, závislý na míře osvětlení detektoru. [1]

Detektory optického záření musí podobně jako zdroje optického záření splňovat určité požadavky z hlediska svých parametrů a kompatibility s ostatními prvky, které se na optickém přenosu podílí. Jak již bylo zmíněno, největší důraz je kladen na účinnost převodu záření, vysokou citlivost pro vlnové délky optických zdrojů záření (850 nm až 1550 nm) a krátkou dobu odezvy. Dále musí být zaručena dostatečná šířka přenášeného kmitočtového pásma, minimální vlastní šum, snížená teplotní citlivost, citlivost na změny napájecího napětí, malé rozměry a nízká cena. [4]

V optických spojích pro telekomunikační účely se nejčastěji používají polovodičové detektory, např. fototranzistor, fotodioda PIN nebo lavinová fotodioda APD (Avalanche – Photodiode).

5.2.1 Fotodioda PIN

Polovodičová dioda PIN používána jako detektor je tvořena přechodem PN s velkou vodivostí, který má mezi vrstvami P a N vrstvu se slabě dotovanou vlastní vodivostí. Měrný odpor této oblasti je mnohonásobně větší než měrný odpor dotované oblasti. Lze ji tedy chápat jako určitý druh izolace, odtud označení I, a název diody PIN. V této oblasti je rovnoměrně rozložené silné elektrické pole, které zvyšuje rychlost nosičů náboje, elektronů a děr vzniklých fotoelektrickým jevem, a tím i mezní kmitočet diody. Díky tomu jsou PIN diody velmi rychlé. Časové odezvy dosažené u PIN diod jsou v řádech $10^{-12} - 10^{-15}$ s, což odpovídá frekvenční šířce pásma větší než 100 GHz. [4]

Výhodou PIN diod je schopnost detekovat velmi malé hodnoty výkonu signálu čímž se hodí do kombinace s LED zdroji záření, tedy pro optické přenosy na kratší vzdálenosti, zejména pak v lokálních sítích a sítích do velikosti několika kilometrů s přenosovou rychlostí stovek Mbit/s. Jako detektory pro optický přenos na velké vzdálenost nebo v rozsáhlých sítích jsou nevhodné.

5.2.2 Lavinová fotodioda

Lavinové fotodiody (APD) jsou založeny na principu tzv. lavinového efektu. Fotony světla, které dopadají do oblasti N a projdou jí do oblasti P, dopadají na páry elektron-díra a rozdělí je. Přítomné silné elektrické pole dodává elektronům velkou kinetickou energii a tyto elektrony pak procházejí oblastí P a narážejí na další páry elektron-díra a opět je rozdělují. Vlivem nárazové ionizace, nově vzniklé páry opět narážejí a vytvářejí další páry. Každý detekovaný foton je přeměněn na kaskádu pohybujících se párů. Takto vzniká lavinový efekt narůstání počtu nosičů náboje, který se stále opakuje.

Proces násobení nosičů náboje (multiplikace) je náhodný jev, při kterém současně vzniká přídavný šum. Lavinový efekt se vyjadřuje multiplikačním činitelem, který vyjadřuje průměrný počet rozdělených párů elektron-díra, po dopadu jednoho fotonu. Multiplikační čítel je závislý na přiloženém napětí, velikosti elektrického pole a teplotě. Velikost multiplikačního činitele se pohybuje v mezích několika desítek až několika set. [7]

Lavinové fotodiody dosahují v porovnání s předchozími PIN fotodiodami větší citlivosti, dokáží tak lépe detekovat slabý signál a vytvořit dostatečný proud, který lze poté snadno zpracovat elektronickými obvody přijímače.

Nevýhodu může být složitější výroba, vzniklý šum zapříčiněný lavinovým narůstáním počtu nosičů náboje, větší závěrné napětí 50 – 500 V a teplotní závislost zisku převodu.

6 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ

Praktická část této práce se zaměřuje na ověření vlastností optických pasivních prvků v oblasti krátkých vlnových délek.

Jak již bylo zmíněno v kapitole o pasivních prvcích, důležitým faktorem pro kvalitní pasivní prvky je nízký vložný útlum v propustném směru a dostatečně vysoký vložný útlum v závěrném směru tak aby nedocházelo k přeslechům, dále je důležitou hodnotou například dělicí poměr, který definuje procentuální poměr rozdělení vstupního výkonu na výstupu.

Ověřování vlastností vybraných pasivních optických prvků probíhalo formou měření útlumu přímou metodou pro zdroje záření o různých vlnových délkách a následným přepočtem a vyjádřením poměrů útlumů na procentuální dělicí poměr.

Součástí praktického měření bylo provedení návrhu měření v simulačním programu VPIphotonics a ověření vlastností vybraných pasivních prvků.

Praktická měření probíhala v laboratoři ústavu telekomunikací na Vysokém učení technickém v Brně.

Tab. 6.1: Pasivní optické prvky vybrané pro ověření vlastností

Název prvku	Pracovní vlnová délka	Dělicí poměr	Vložný útlum [dB]	Sériové číslo
Coupler	1550 nm	99:1	0,23 – 20,18	A150193685
Coupler	1550 nm	90:10	0,65 – 10,50	A150193723
Coupler	1550 nm	50:50	3,26 – 3,30	A150210700
Coupler	850 nm	50:50	3,94 – 4,14	2096
Coupler	1550 nm	33:33:33	4,65 – 5,36	A150210652
Isolator	1550 nm	–	0,19; ≥ 65	A14014349
Isolator	1480 nm	–	0,61; ≥ 65	A14014435
Circulator	1470 – 1610 nm	–	0,89 – 1,12	A15069358

Pro ověření vlastností pasivních optických prvků v oblasti krátkých vlnových délek bylo vybráno celkem osm pasivních prvků, které jsou dohledatelné pomocí sériových čísel v laboratoři přenosových médií na ústavu telekomunikací.

6.1 Praktické měření – laboratorní

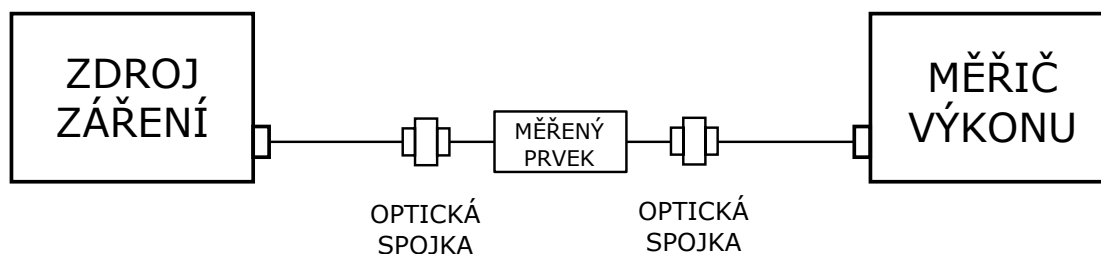
6.1.1 Metoda měření

Všechna měření probíhala upravenou metodou vložného útlumu. Metoda vložného útlumu je nedestruktivní porovnávací metoda.

Metoda měření vložného útlumu se vždy skládá ze dvou kroků. V prvním kroku bylo zapotřebí provést kalibraci měřící soustavy, přímým propojením zdroje záření s detektorem záření (měřič optického výkonu). V našem případě se zdroj s detektorem propojil pomocí dvou jednovidových optických kabelů a jedné optické spojky, podle schématu na obr. 6.1. Hodnota optického výkonu detekována na vstupu detektoru záření byla nastavena jako referenční hodnota pro měření. V druhém kroku se měřený pasivní optický prvek zapojil pomocí druhé optické spojky mezi dva optické kabely připojené na zdroj a detektor záření (viz obr. 6.2). Stejným způsobem, jako v kroku jedna, byl změřen optický výkon na vstupu detektoru záření. Následně se provedl rozdíl obou detekovaných optických výkonů. Optický výkon z kroku dva se odečetl od referenční hodnoty optického výkonu, čímž jsme získaly hodnotu vložného útlumu měřeného pasivního optického prvku v jednotkách dB.



Obr. 6.1: Schéma nastavení reference pro měření



Obr. 6.2: Schéma pro měření útlumu

6.1.2 Postup měření

Měření bylo provedeno v několika etapách, jelikož ne vždy byly k dispozici všechny vybrané pasivní optické prvky nebo všechny typy optických zdrojů záření. Měření probíhala v místnosti laboratoře přenosových medií na ústavu telekomunikací, za normálních podmínek prostředí.

Pro první etapu měření byla, jako zdroj optického záření, použita DFB úzkopásmová laserová dioda s rozprostřenou zpětnou vazbou o vlnové délce 1550 nm.

V druhé etapě měření byl, jako zdroj optického záření, použit Light Source FLS-600 od firmy EXFO. Zdroj optického záření FLS-600 umožňuje volbu z nabídky vlnových délek optického záření na svém výstupu. Pro ověření vlastností pasivních optických prvků byly vybrány vlnové délky 850 nm, 1310 nm, 1550 nm.

Pro třetí etapu měření byla zvolena singlemodová laserová dioda typu VCSEL o vlnové délce 850 nm.

Pro detekci přijímaného záření (měření výkonu) byl ve všech etapách měření použit Power Meter FPM-600 od firmy EXFO. Použitý měřič optického výkonu bylo nutné nastavit na vlnovou délku shodnou s vlnovou délkou zdroje optického záření.

Měřený pasivní optický prvek byl vždy připojen mezi dvě optické spojky typu FC, které byly ke zdroji a detektoru připojeny jednovidovým optickým kabelem 9/125 G.652D s konektory SC-FC (Standard Connector-Ferrule Connector) o délce jeden metr. Vložný útlum způsobený útlumem optických spojek a kabelů byl zanedbatelný. Měřený pasivní optický prvek byl vždy proměřen na všech vstupních i výstupních portech, změřeny byly i přeslechy a útlum odrazu.

Naměřené hodnoty jednotlivých pasivních optických prvků byly zaznamenány do tabulek a porovnány s hodnotami katalogových listů jednotlivých pasivních optických prvků.

6.1.3 Výsledky měření

Jak již bylo zmíněno, měření probíhalo ve třech etapách ve kterých byly ověřeny vlastnosti osmi vybraných pasivních optických prvků pro různé typy zdrojů o různých vlnových délkách.

První z měřených optických pasivní prvků byl optický coupler s dělicím poměrem 99:1, navržený pro vlnovou délku 1550 nm. Tento optický coupler je typu 2×2 , tedy dva vstupní porty a dva výstupní porty.

Naměřené hodnoty pro první měřený coupler jsou zaznamenány v tabulce 6.2, jsou zde také, pro porovnání, uvedeny hodnoty vložného útlumu z katalogového listu (data sheet) optického coupleru pro hlavní směry šíření optického signálu.

Naměřené hodnoty vložného útlumu optického coupleru, pro zdroje optického záření o stejné vlnové délce jako je pracovní vlnová délka coupleru, vycházely téměř rovny hodnotám udávaným v katalogovém listě. Pro zdroj optického záření FLS-600 byly naměřené hodnoty vložného útlumu v rámci tolerance 5% vyhovující hodnotám v katalogovém listě. Pro DFB diodu však naměřené hodnoty útlumu tuto toleranci již mírně převyšovaly ale i přesto nešlo o odchylky větší než 0,4 dB. Na rozdíl od ostatních naměřených hodnot, vložného útlumu pro ostatní zdroje optického záření, kde naměřené hodnoty vložného útlumu dosahovaly velmi rozdílných hodnot.

Po vyjádření útlumů v procentuální míře, byly vidět menší nesrovnalosti s deklarovanou hodnotou dělicího poměru (tab. 6.3). Hodnoty útlumu dané katalogovým listem téměř odpovídaly dělicímu poměru 99:1, tomuto poměru pak nejlépe odpovídalo měření pro optický zdroj záření FLS-600 o vlnové délce 1550 nm. Pro ostatní zdroje optického záření se dělicí poměr jen vzdáleně přibližoval hodnotám uvedeným v katalogovém listě optického coupleru.

Vybraný optický coupler je tedy vhodné používat pro vlnové délky shodné s pracovní vlnovou délkou coupleru.

Tab. 6.2: Naměřené hodnoty útlumu pro coupler 99:1 1550 nm

Název prvku	COUPLER 99:1 1550 nm					
Směr	Útlum [dB]					Data Sheet
	1550 nm DFB	1550 nm EXFO	1310 nm EXFO	850 nm EXFO	850 nm RACK	
Port 1 → Port 3	0,69	0,22	0,08	4,22	3,45	0,23
Port 1 → Port 4	20,63	19,39	26,56	24,00	21,36	20,15
Port 2 → Port 3	20,98	20,05	26,64	23,00	19,90	20,18
Port 2 → Port 4	0,62	0,25	0,94	3,05	2,39	0,26

Tab. 6.3: Hodnoty dělicího poměru pro coupler 99:1 1550 nm

Název prvku	COUPLER 99:1 1550 nm					
Směr	Dělicí poměr z naměřených hodnot útlumu [%]					Data Sheet
	1550 nm DFB	1550 nm EXFO	1310 nm EXFO	850 nm EXFO	850 nm RACK	
Port 1 → Port 3	85,31	95,06	98,17	37,84	45,19	94,84
Port 1 → Port 4	0,87	1,15	0,22	0,39	0,73	0,97
Port 2 → Port 3	0,80	0,99	0,22	0,50	1,02	0,96
Port 2 → Port 4	86,69	94,41	80,54	49,55	57,68	94,19

U druhého měřeného optického coupleru s dělicím poměrem 90:10, typu 2×2 , navrženého pro vlnovou délku 1550 nm se naměřené hodnoty vložného útlumu nejvíce blížily k hodnotám udávaným v katalogovém listu coupleru, pro zdroje optického záření odpovídající pracovní vlnové délce měřeného coupleru. Tedy pro zdroje FLS-600 a DFB diodu 1550 nm, i když naměřené hodnoty vložného útlumu nebyly v toleranci, dopadly podstatně lépe než hodnoty pro ostatní zdroje optického záření. Naměřené hodnoty vložného útlumu byly pro oba vstupní porty rozdílné maximálně o 0,9 dB od hodnot katalogových, viz tabulka 6.4.

Tab. 6.4: Naměřené hodnoty útlumu pro coupler 90:10 1550 nm

Název prvku	COUPLER 90:10 1550 nm					
Směr	Útlum [dB]					
	1550 nm DFB	1550 nm EXFO	1310 nm EXFO	850 nm EXFO	850 nm RACK	Data Sheet
Port 1 → Port 3	1,55	0,65	0,65	2,87	2,88	0,65
Port 1 → Port 4	11,53	9,98	11,02	19,90	20,56	10,46
Port 2 → Port 3	10,33	9,71	22,02	18,50	17,65	10,50
Port 2 → Port 4	0,83	0,52	1,43	3,14	7,25	0,71

Dělicí poměr, vycházející z katalogových hodnot útlumu pro druhý coupler, se jen nepatrně lišil od hodnoty 90:10. Dělení optických svazků pro první vstupní port bylo v poměru přibližně 86:9, pro druhý vstupní port byl dělicí poměr 85:9. Oba dělicí poměry vycházely se zhruba 5% odchylkou, která mohla být způsobena vlastním útlumem měřeného coupleru (viz tabulka 6.5).

Pro optický zdroj záření DFB diodu byly naměřené hodnoty útlumu prvního vstupního portu pravděpodobně zatíženy některou z měřících chyb, jelikož procentuální vyjádření dělicího poměru bylo velmi rozdílné od hodnoty katalogové. Hodnoty naměřeného útlumu vyjadřovaly dělicí poměr přibližně 70:7, což už je velmi velký rozdíl oproti poměru 90:10. Dělicí poměr druhého vstupního portu, 82:9 se katalogovému dělicímu poměru blížil více.

Pro optický zdroj záření FLS-600 vycházely naměřené hodnoty vložného útlumu, tak i vyjádřené procentuální dělicí poměry, jen s minimální nebo žádnou odchylkou od hodnot katalogových.

Při použití zdrojů optického záření o vlnové délce jiné, než je pracovní vlnová délka coupleru, docházelo k naměření hodnot vložného útlumu dvakrát a více větších než udává katalogový list. Pro dosažení deklarovaných vlastností je zapotřebí použití optických zdrojů záření o vlnové délce odpovídající pracovní vlnové délce měřeného coupleru.

Tab. 6.5: Hodnoty dělicího poměru pro coupler 90:10 1550 nm

Název prvku	COUPLER 90:10 1550 nm					
Směr	Dělicí poměr z naměřených hodnot útlumu [%]					Data Sheet
	1550 nm DFB	1550 nm EXFO	1310 nm EXFO	850 nm EXFO	850 nm RACK	
Port 1 → Port 3	69,98	86,10	86,10	51,64	51,52	86,10
Port 1 → Port 4	7,03	10,05	7,91	1,02	0,88	8,99
Port 2 → Port 3	9,27	10,69	0,63	1,41	1,72	8,91
Port 2 → Port 4	82,60	88,72	71,95	48,53	18,84	84,92

Třetí měřený optický coupler byl typu 2×2 , s dělicím poměrem 50:50 a pracovní vlnovou délkou 1550 nm. Měřený optický coupler, pro laserovou diodu DFB a zdroj záření FLS-600 o vlnové délce 1550 nm, dopadl stejně jako couplery u předchozích dvou měření, naměřené hodnoty vložného útlumu byly téměř totožné s hodnotami katalogovými. Dostatečně dobré hodnoty vložného útlumu byly také naměřeny pro optický zdroj FLS-600 ovšem o vlnové délce 1310 nm, viz tabulka 6.6. Pro oba zdroje optického záření o vlnové délce 850 nm naměřené hodnoty dosahovaly, vždy na jednom z párů portů, několikanásobně vyšší hodnotu vložného útlumu.

Pro optické couplery s dělicím poměrem 50:50 je výrobcem povolena vyšší tolerance rozdílných reálných hodnot od hodnot katalogových, než tomu bylo pro couplery s dělicími poměry 99:1 a 90:10.

Z naměřených hodnot vložného útlumu a procentuálního vyjádření dělicího poměru (tab. 6.7) vyplývá, že třetí měřený optický coupler je vhodný pro použití na vlnových délkách 1550 nm a 1310 nm optických laserových zdrojů záření.

Tab. 6.6: Naměřené hodnoty útlumu pro coupler 50:50 1550 nm

Název prvku	COUPLER 50:50 1550 nm					
Směr	Útlum [dB]					Data Sheet
	1550 nm DFB	1550 nm EXFO	1310 nm EXFO	850 nm EXFO	850 nm RACK	
Port 1 → Port 3	3,08	2,97	3,76	4,45	3,11	3,26
Port 1 → Port 4	3,12	3,12	2,83	15,56	16,26	3,30
Port 2 → Port 3	3,23	3,14	2,98	16,08	17,83	3,30
Port 2 → Port 4	2,91	3,22	3,67	3,31	3,96	3,28

Tab. 6.7: Hodnoty dělicího poměru pro coupler 50:50 1550 nm

Název prvku	COUPLER 50:50 1550 nm					
Směr	Dělicí poměr z naměřených hodnot útlumu [%]					
	1550 nm DFB	1550 nm EXFO	1310 nm EXFO	850 nm EXFO	850 nm RACK	Data Sheet
Port 1 → Port 3	49,20	50,47	42,07	35,89	48,87	47,21
Port 1 → Port 4	48,75	48,75	52,12	2,78	2,37	46,77
Port 2 → Port 3	47,53	48,53	50,35	2,47	1,65	46,77
Port 2 → Port 4	51,17	47,64	42,95	46,67	40,18	46,99

Čtvrtým měřeným pasivním optickým prvkem byl optický coupler typu 1×2 , byl tedy vybaven jedním vstupním a dvěma výstupními porty, s dělicím poměrem 50:50 a pracovní vlnovou délkou 850 nm. Pro zdroje optického záření o vlnové délce 1550 nm byly naměřené hodnoty vložného útlumu, na rozdíl od předchozích měření, zcela mimo toleranci optického coupleru, naměřené hodnoty se ani zdaleka nepřiblížily hodnotám udávaným v katalogovém listu. Podobně tomu bylo i pro dělicí poměr, který rozhodně neodpovídal hodnotě 50:50, viz tabulka 6.8.

Naměřené hodnoty vložného útlumu nejvíce se blížící hodnotám katalogovým, byly naměřeny při použití zdroje záření FLS-600 na vlnových délkách 1310 nm a 850 nm.

Hodnoty dělicího poměru deklarované katalogovým listem téměř neodpovídají označení pasivního prvku. Podle katalogového listu by měl optický coupler dosahovat dělicího poměru přibližně 39:40, ale jak již bylo zmíněno, pro optické couplery s dělicím poměrem 50:50 je výrobcem povolena vyšší tolerance rozdílných reálných hodnot od hodnot katalogových, než tomu bylo pro couplery s dělicími poměry 99:1 a 90:10. Dělicímu poměru 39:40 se neblížily žádné z naměřených hodnot.

Měřený optický coupler je tedy vhodný primárně pro použití na vlnové délce 850 nm, z naměřených hodnot vložného útlumu pak vyplývá, že by tento coupler mohl být použit i pro vlnovou délku 1310 nm, kde dosahoval téměř shodných hodnot.

Tab. 6.8: Naměřené hodnoty útlumu pro coupler 50:50 850 nm

Název prvku	COUPLER 50:50 850 nm					
Směr	Útlum [dB]					
	1550 nm DFB	1550 nm EXFO	1310 nm EXFO	850 nm EXFO	850 nm RACK	Data Sheet
Port 1 → Port 3	30,59	29,68	5,63	5,79	8,09	4,14
Port 1 → Port 4	33,08	32,16	3,61	3,35	7,53	3,94

Tab. 6.9: Hodnoty dělicího poměru pro coupler 50:50 850 nm

Název prvku	COUPLER 50:50 850 nm					
Směr	Dělicí poměr z naměřených hodnot útlumu [%]					
	1550 nm DFB	1550 nm EXFO	1310 nm EXFO	850 nm EXFO	850 nm RACK	Data Sheet
Port 1 → Port 3	0,09	0,11	27,35	26,36	15,52	38,55
Port 1 → Port 4	0,05	0,06	43,55	46,24	17,66	40,36

Pátý měřený optický coupler byl typu 3×3 , s dělicím poměrem 33:33:33 a pracovní vlnovou délkou 1550 nm.

Hodnoty vložného útlumu nejbližší hodnotám katalogovým byly naměřeny pro laserovou diodu DFB o vlnové délce 1550 nm, naměřené hodnoty se lišily jen výjimečně, maximálně o 0,3 dB. Velmi blízké hodnoty vložného útlumu byly také naměřeny pro laserový zdroj optického záření FLS-600 o vlnové délce 1550 nm, viz tabulka 6.10. Pro optické zdroje záření o jiné vlnové délce než je pracovní vlnová délka optického coupleru, vycházely naměřené hodnoty vložného útlumu několikanásobně vyšší než udává katalogový list.

Jelikož naměřené hodnoty vložného útlumu, pro zdroje záření o vlnové délce 1550 nm, se projeví jako odpovídající hodnotám uvedeným v katalogovém listě coupleru, jsou i hodnoty dělicích poměrů pro všechny porty přibližně shodné.

Měřený optický coupler je tedy vyhovující pro laserové optické zdroje záření o vlnové délce 1550 nm, která odpovídá pracovní délce měřeného coupleru.

Tab. 6.10: Naměřené hodnoty útlumu pro coupler 33:33:33 1550 nm

Název prvku	COUPLER 33:33:33 1550 nm					
Směr	Útlum [dB]					
	1550 nm DFB	1550 nm EXFO	1310 nm EXFO	850 nm EXFO	850 nm RACK	Data Sheet
Port 1 → Port 4	5,04	4,45	8,75	16,12	18,14	5,06
Port 1 → Port 5	4,55	4,02	7,38	14,02	15,71	4,67
Port 1 → Port 6	5,08	4,80	4,61	2,89	2,61	5,18
Port 2 → Port 4	4,99	4,60	4,46	2,79	3,58	5,36
Port 2 → Port 5	5,22	4,73	8,58	14,92	16,31	5,18
Port 2 → Port 6	4,76	4,22	8,15	15,23	13,62	4,65
Port 3 → Port 4	4,98	4,36	8,12	14,16	13,71	4,76
Port 3 → Port 5	5,33	5,07	3,61	2,41	3,13	5,28
Port 3 → Port 6	5,15	4,83	7,96	14,51	14,30	5,26

Tab. 6.11: Hodnoty dělicího poměru pro coupler 33:33:33 1550 nm

Název prvku	COUPLER 33:33:33 1550 nm					
Směr	Dělicí poměr z naměřených hodnot útlumu [%]					Data Sheet
	1550 nm DFB	1550 nm EXFO	1310 nm EXFO	850 nm EXFO	850 nm RACK	
Port 1 → Port 4	31,33	35,90	13,34	2,44	1,54	31,19
Port 1 → Port 5	35,08	39,63	18,28	3,96	2,69	34,12
Port 1 → Port 6	31,05	33,11	34,59	51,40	54,83	30,34
Port 2 → Port 4	31,70	34,67	35,81	52,60	43,85	29,11
Port 2 → Port 5	30,06	33,65	13,87	3,22	2,34	30,34
Port 2 → Port 6	33,42	37,84	15,31	2,99	4,35	34,28
Port 3 → Port 4	31,77	36,64	15,42	3,84	4,26	33,42
Port 3 → Port 5	29,31	31,12	43,55	57,41	48,64	29,65
Port 3 → Port 6	30,55	32,89	15,99	3,54	3,72	29,79

Další měřený pasivní optický prvek byl optický izolátor navržený pro vlnovou délku 1550 nm.

Optický izolátor přenáší světelné signály jen v jednom, dopředném směru, v opačném je naopak pohlcuje, izoluje. Z toho plyne základní vlastnost izolátoru, co nejnižší vložný útlum ve směru dopředném a co nejvyšší izolační útlum v závěrném směru.

Měřený izolátor podle katalogového listu udával vložný útlum, ve směru šíření záření, 0,19 dB a minimální izolační útlum ≥ 30 dB. Pro zdroje optického záření o vlnové délce 1550 nm naměřené hodnoty vložného a izolačního útlumu odpovídaly hodnotám uvedeným v katalogovém listu izolátoru. Vložný útlum byl o něco větší, než je uvedeno v katalogovém listu, konkrétně 0,78 dB a 0,62 dB. Izolační útlum byl naopak změřen dostatečně vysoký, jak ukazuje tabulka 6.12. Pro ostatní zdroje optického záření byly naměřené hodnoty až příliš vysoké, izolátor je tedy možné řádně použít jen pro jeho pracovní vlnovou délku 1550 nm.

Tab. 6.12: Naměřené hodnoty útlumu pro izolátor 1550 nm

Název prvku	ISOLATOR 1550 nm					
Směr	Útlum [dB]					Data Sheet
	1550 nm DFB	1550 nm EXFO	1310 nm EXFO	850 nm EXFO	850 nm RACK	
→	0,78	0,62	2,07	–	50,00	0,19
←	37,8	40,54	–	–	–	30,00

Druhý měřený optický izolátor byl navržen pro vlnovou délku 1480 nm.

Podle katalogového listu by měl měřený izolátor dosahovat vložného útlumu 0,61 dB a minimální izolační útlum ≥ 30 dB. Těmto hodnotám nejlépe odpovídaly naměřené hodnoty pro zdroj záření FLS-600 o vlnové délce 1550 nm. Naměřená hodnota vložného útlumu byla jen o 0,07 dB vyšší než udává katalogový list. Naměřený izolační útlum splňoval podmínku danou v katalogovém listu, viz tabulka 6.13. Pro ostatní zdroje záření byly naměřené hodnoty velmi rozdílné od hodnot katalogových nebo byly příliš vysoké a nebylo je možné změřit ani zaznamenat.

Tento optický izolátor je možné využít pro laserové optické zdroje o vlnové délce 1550 nm.

Tab. 6.13: Naměřené hodnoty útlumu pro izolátor 1480 nm

Název prvku	ISOLATOR 1480 nm					
Směr	Útlum [dB]					
	1550 nm DFB	1550 nm EXFO	1310 nm EXFO	850 nm EXFO	850 nm RACK	Data Sheet
→	0,35	0,68	2,36	–	–	0,61
←	62,3	61,95	18,49	–	–	30,00

Poslední měřený pasivní optický prvek byl optický cirkulátor s pracovní vlnovou délkou 1470–1610 nm.

Úspěšné proměření všech portů se zdařilo jen pro zdroj záření FLS-600 o vlnové délce 1550 nm. Naměřené hodnoty vložného útlumu pro tento zdroj záření přibližně odpovídaly hodnotám katalogovým, také hodnota přeslechu byla přibližně stejná. Naměřený izolační útlum byl podstatně vyšší než udává katalogový list.

Tab. 6.14: Naměřené hodnoty útlumu pro cirkulátor 1470–1610 nm

Název prvku	CIRCULATOR 1470–1610 nm					
Směr	Útlum [dB]					
	1550 nm DFB	1550 nm EXFO	1310 nm EXFO	850 nm EXFO	850 nm RACK	Data Sheet
Port 1 → Port 2	1,07	0,77	4,05	–	–	0,89
Port 2 → Port 3	1,48	0,93	3,44	–	–	1,12
Port 1 → Port 3	–	59,00	49,77	–	–	53
Port 2 → Port 1	–	56,60	16,17	–	–	35
Port 3 → Port 2	–	57,10	16,89	–	–	35

Proměřit všechny porty se podařilo i pro zdroj záření o vlnové délce 1310 nm, ovšem tyto naměřené hodnoty byly zcela mimo hodnoty udávané v katalogovém listu cirkulátoru, viz tabulka 6.14.

Naměřené hodnoty vložného útlumu, izolačního útlumu a přeslechu nebylo možné zaznamenat pro všechny použité zdroje záření, které byly k dispozici, jelikož do oblasti pracovní vlnové délky cirkulátoru, spadají jen zdroje záření o vlnové délce 1550 nm.

Z naměřených hodnot je zřejmé, že pro správné fungování vybraného optického cirkulátoru je zapotřebí zdroj optického záření, který odpovídá pracovnímu rozsahu vlnových délek cirkulátoru.

6.2 Simulace – VPIphotonics

VPIphotonics poskytuje profesionální simulační software podporující požadavky pro aktivní či pasivní integrované fotonické a optické aplikace, optické přenosové systémy a síťové aplikace. V simulačním softwaru VPIphotonics představuje standard zahrnující návrh, analýzu a optimalizaci komponent optických (fotonových) systémů a sítí.

Pro návrh a ověření vlastností vybraných pasivních optických prvků byly z nabídky programu VPIphotonics zvoleny dva moduly, VPItransmissionMaker a VPIcomponentMaker. VPItransmissionMaker umožňuje urychlení návrhu a vytváření nových fotonických systémů a subsystémů s krátkým dosahem i dálkových optických přenosových systémů. VPIcomponentMaker poskytuje profesionální prostředky pro modelování, optimalizaci a návrh optických zařízení na bázi optických vláken pro zpracování optických signálů pro telekomunikační, vysokovýkonné a vysokorychlostní aplikace.

6.2.1 Metodika

V simulačním programu bylo možné, pro ověření vlastností vybraných pasivních optických prvků, zvolit stejnou metodu měření jako pro praktické měření v laboratoři, tedy upravenou metodu vložného útlumu. Více o této metodě viz kapitola 6.1.1.

6.2.2 Pracovní postup

Postup měření v simulačním programu se příliš nelišil od postupu při praktickém měření v laboratoři, viz 6.1.2.

Simulované měření ovšem probíhalo rychleji, jelikož spojení mezi zdrojem záření a detektorem záření tvořili dvě paralelní trasy, nebylo tak zapotřebí nic fyzicky přepojovat. První trasa simulovala stav, kdy v trase není zapojen pasivní optický prvek, tedy trasu bez vloženého útlumu (referenční hodnota). Druhá trasa simulovala stav, kdy je v trase zapojen pasivní optický prvek a tedy i vložený útlum. Detektory umístěné na koncích obou tras následně vyhodnotily velikost výkonu šířeného signálu. Výstupy obou detektorů byly připojeny na vstup numerického analyzátoru, který rozdílem hodnot velikosti výkonu šířeného na konci první a druhé trasy určil velikost útlumu vloženého do druhé trasy, tedy velikost útlumu způsobenou vložením pasivního optického prvku.

Simulační program umožňoval jednoduché nastavení základních parametrů vybraných pasivních optických prvků. Jednotlivé pasivní optické prvky byly proměřeny na všech vstupních i výstupních portech, z obou směrů.

Při simulovaném měření byly použity optické zdroje záření pro vlnové délky 850 nm, 1310 nm, 1550 nm (VCSEL a DFB). Vlnové délky zdrojů záření musely být pro potřeby simulačního programu vyjádřeny jako vyzařovací frekvence. Detektory záření byly vždy nastaveny na stejnou vyzařovací frekvenci. Pro simulovanou trasu byla zvolena jednovidová vlákna o délce jeden metr a hodnotě vloženého útlumu 0,12 – 0,19 dB/km.

6.2.3 Výsledky simulace

Po provedení několika sérií měření byly naměřené hodnoty, pro zadané parametry prvků simulujících vybrané pasivní optické prvky, totožné s hodnotami udávanými v katalogových listech jednotlivých prvků, nezávisle na volbě zdroje záření. Simulace proběhly pro čtyři různé typy zdroje záření, různé vlnové délky.

Tab. 6.15: Naměřené hodnoty útlumu simulovaného měření

Zdroj záření	850 nm, 1310 nm, 1550 nm			
	Název prvku	Směr	Útlum [dB]	Data Sheet
Coupler 99:1	Port 1 → Port 3		0,04	0,23
	Port 1 → Port 4		20,00	20,15
Coupler 90:10	Port 1 → Port 3		0,46	0,65
	Port 1 → Port 4		10,00	10,46
Isolator 1550	→		0,19	0,19
	←		65,00	65,00
Isolator 1480	→		0,61	0,61
	←		65,00	65,00

Výsledky měření tedy navozují dojem, že měřené pasivní optické prvky si zachovávají své vlastnosti, nezávisle na zdroji záření (vlnové délce zdroje). K tom však ve skutečnosti nedochází, jak potvrzuje praktické měření z laboratoře.

Všechny výsledky měření byly zaznamenány do přehledných tabulek, jelikož všechny naměřené výsledné hodnoty vložného útlumu byly shodné by i tabulky kompletně shodné. Tabulka 6.15 shrnuje výsledné naměřené hodnoty útlumu vybraných pasivních optických prvků, měřených pro všechny typy simulovaných zdrojů záření. Tabulky pro jednotlivé zdroje záření se nacházejí v kompletním přehledu naměřených hodnot na přiloženém kompaktním disku.

7 ZÁVĚR

První část bakalářské práce je zaměřena na teoretické seznámení s problematikou optických přenosů, věnuje se popisu optických vláken, jejich standardů, výhod a nevýhod jejich použití. Dále jsou v kapitolách popsány možné ztráty optických vedení, vysvětlen je vznik disperze a útlumu. Poté jsou rozebrány jednotlivé pasivní optické prvky a jejich nejdůležitější parametry a využití. Zmíněny jsou také zdroje a detektory optického záření a jejich požadované vlastnosti. Druhá část práce je věnována samotnému měření a simulaci, ověření vlastností pasivních optických prvků.

Cílem této práce bylo ověřit vlastnosti vybraných optických pasivních prvků v oblasti krátkých vlnových délek. Tohoto cíle bylo dosaženo provedeným měřením vybraných pasivních optických prvků jak na jejich pracovní vlnové délce, tak i na různých jiných vlnových délkách. Provedené měření ověřilo konkrétní hodnoty vložného útlumu poskytnutých pasivních optických prvků a jejich dělicí poměr, izolační útlum. Výsledné hodnoty byly ve většině měření, v rámci tolerance, totožné s hodnotami katalogovými jen pro zdroje záření o vlnové délce odpovídající pracovní vlnové délce měřeného pasivního optického prvku. Pro zdroje optického záření o jiné vlnové délce, než je pracovní vlnová délka pasivních optických prvků, byly naměřené hodnoty zcela mimo toleranci nebo se jen vzdáleně blížily hodnotám udávaným v katalogovém listu. Výjimkou z vybraných pasivních optických prvků byly optické couplery s dělicím poměrem 50:50 a pracovní vlnovou délkou 850 nm a 1550 nm, u kterých docházelo k naměření dostatečně vyhovujících hodnot i pro zdroj záření o vlnové délce 1310 nm.

Pro laserový optický zdroj záření o vlnové délce 850 nm se ani v jednom měření nepodařilo naměřit hodnoty blízké se hodnotám katalogovým. Vybrané pasivní optické prvky nejsou vhodné pro tento typ optického zdroje záření.

Vybrané měřené pasivní optické prvky lze tedy označit za vyhovující pouze při použití zdroje optického záření odpovídajícího pracovní vlnové délce pasivního optického prvku. Pro zdroje optického záření o jiné vlnové délce, než je pracovní vlnová délka pasivního prvku, nelze zaručit hodnoty parametrů udávané katalogovým listem pasivního prvku.

Na základě naměřených hodnot vybraných pasivních optických prvků, převážně s vyšší pracovní vlnovou délkou 1550 nm, je nedoporučuji používat v oblasti krátkých vlnových délek.

Samotné rozdíly naměřených a katalogových hodnot útlumu, či dělicího poměru, nevypovídají o kvalitě měření ani o chybovosti měření. Lze předpokládat, že pro potřeby výrobce resp. katalogových listů, bylo použito jiných, sofistikovanějších metod pro měření vlastností optických pasivních prvků a přesnějších měřících přístrojů.

LITERATURA

- [1] BUBNÍK, Lukáš, Jiří KLAJBL a Petr MAZUCH. 2015. *Optoelektrotechnika* [online]. 1. Brno: MŠMT [cit. 2016-11-03]. ISBN 978-80-88058-20-5. Dostupné z: <https://publi.cz/books/185/Cover.html>
- [2] *Úvod do optiky*. 2010. Gymnázium Ladislava Jaroše: Výukový portál gymnázia [online]. Holešov: Gymnázium Ladislava Jaroše [cit. 2016-11-10]. Dostupné z: http://www.gymhol.cz/projekt/fyzika/01_uvod/01.htm
- [3] SCHRÖFEL, Josef a Karel NOVOTNÝ. 1986. *Optické vlnovody*. Praha: SNTL/ALFA. ISBN DT 6213728.
- [4] FILKA, Miloslav. 2009. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Brno: M. Filka. ISBN 978-80-86785-14-1.
- [5] *G.652: Characteristics of a single-mode optical fibre and cable*. 2009. Version 8. Geneva, Switzerland: ITU-T, 22 s. Dostupné také z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.652/en>
- [6] *G.655: Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable*. 2009. Version 5. Geneva, Switzerland: ITU-T, 26 s. Dostupné také z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.655/>
- [7] NAVRÁTIL, Jiří a Pavel LORENZ. 2015. *Elektrotechnika: Optoelektronika* [online]. Olomouc: MŠMT [cit. 2016-11-19]. ISBN MSMT-7521/2015-40. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/books/22/sections>
- [8] FILKA, Miloslav. 2009. *Optoelectronics for telecommunications and informatics*. Dallas: Optokon. ISBN 978-0-615-33185-0.
- [9] LAFATA, Pavel a Jiří VODRÁŽKA. 2014. *Optické přístupové sítě a přípojky FTTx*. Praha: České vysoké učení technické v Praze. ISBN 978-80-01-05463-5.
- [10] RYBIČKA, Jiří. 2003. *LATEX pro začátečníky*. 3. vyd. Brno: Konvoj. ISBN 8073020491.
- [11] *THORLABS: Single Mode Fiber Optic Circulators*. 2016. THORLABS: *Fiber Components* [online]. Newton, New Jersey: Thorlabs [cit. 2016-12-06]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/navigation.cfm?guide_id=2239

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

A	útlum
NA	numerická apertura
c	rychlost světla
l	délka trasy
λ	vlnová délka
$\Delta\tau$	zpoždění signálu
θ	mezní vstupní úhel
APD	A valanche - P hoto D iode – Lavinová fotodioda
DFB	D istributed F eed B ack – Laserová dioda s rozprostřenou zpětnou vazbou, hranově emitující
DGD	D ifferential G roup D elay – Rozdílové skupinové zpoždění
DWDM	D ense W avelength D ivision M ultiplex – Hustý vlnový multiplex
FBT	F used B iconic T aper – Fúzní technologie výroby
FC	F errule C onnector – Konektor s ferulí
FTTH	F iber T o T he H ome – Optické vlákno přivedené až do domu
LASER	L ight A mplification by S timulated E mission of R adiation – Zesilování světla stimulovanou emisí záření
LD	L aser D iode – Laserová dioda
LED	L ight E mitting D iode – Světlo emitující dioda
PLC	P lanar L ightwave C ircuit – Planární technologie výroby
PMD	P olarization M ode D ispersion – Polarizační vidová disperze
PON	P assive O ptical N etwork – Pasivní optická síť
SC	S tandard C onnector – Standardní konektor
SDH	S ynchronous D igital H ierarchy – Synchronní digitální hierarchie
VCSEL	V ertical- C avity S urface- E mitting L aser – Laserová dioda, plošně vyzařující