



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

OPTICKÁ LINKA PRO PŘENOS VYSOKOFREKVENČNÍHO SIGNÁLU

RF ANALOG FIBER OPTIC LINK

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petr Kelbler

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Drexler, Ph.D.

BRNO 2017

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá návrhem optické linky pro přenos vysokofrekvenčního signálu pro systém detekce a lokalizace částečného výboje MOSAD[®]-PD-UHF vyvíjeného Ústavem teoretické a experimentální elektrotechniky, kde bude sloužit jako náhrada pro koaxiální kabel, jenž není vhodný pro silně zarušené prostředí. V úvodní části práce je obecně popsán systém MOSAD[®]-PD-UHF a porovnáno několik komerčně dostupných optických linek. Dále se práce zabývá popisem jednotlivých komponent optického řetězce a návrhem kompletní přenosové linky pro zadaný optický přijímač a vysílač. Závěrečná část práce se poté věnuje konstrukci optické linky a měření dosažených parametrů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Optická linka, optický přijímač, optický vysílač, optické vlákno

ABSTRACT

This thesis analyzes the problem of design analog fiber optic link for transmission high frequency signals. Analog fiber optic link will be used in system for detection and localization a partial discharge activity MOSAD[®]-PD-UHF, where will replace existing solution with coaxial cables, which is not appropriate for highly noise environment. MOSAD[®]-PD-UHF system is developed in department of theoretical and experimental electrical engineering. At the first, MOSAD[®]-PD-UHF system and individual parts of optical chain are theoretical described. In following part are compared a few commercially available analog fiber optic link and design of chosen transmit and receive module are described. . The thesis final part deals with construction of optical link and measured parameters are discussed.

KEYWORDS

Optic link, optic receiver, optic transmitter, optic fiber

Kelbler, Petr. *Optická linka pro přenos vysokofrekvenčního signálu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2017, 63 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Drexler, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Optická linka pro přenos vysokofrekvenčního signálu jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících 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.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu mého semestrálního projektu doc. Ing. Petru Drexlerovi, Ph.D. za velmi ochotnou pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

Experimentální část této diplomové práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře
vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072

Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

ObsahAbstrakt	1
Klíčová slova	1
Abstract	1
Keywords	1
Prohlášení	3
Poděkování	3
Seznam obrázků	vii
Úvod	1
1 Motivace práce	2
2 Optický přenosový systém	4
2.1 Přenos signálu optickým vláknem	5
2.1.1 Konstrukce a fyzikální princip optického vlákna	5
2.1.2 Typy optických vláken.....	8
Jednovidová vlákna	8
Mnohovidová se skokovou změnou indexu lomu.....	9
Mnohovidová s gradientním průběhem indexu lomu	10
2.1.3 Parametry optických vláken.....	10
Útlum signálu v optickém vlákně	10
Šířka pásma	12
Disperze.....	12
Parametr MFD.....	13
2.2 Optický vysílač	14
2.2.1 Elektroluminiscenční dioda	14
2.2.2 Laserové zdroje	15
2.2.3 Laserová dioda	17
Řízení laserových diod	18
Chlazení laserových diod	19
2.2.4 Modulace světla	20
2.3 Optický přijímač	22
2.3.1 Fotodioda	22
Náhradní schéma fotodiody	23

2.3.2	PIN dioda	24
2.3.3	Lavinová dioda	24
	Citlivost a kvantová účinnost	24
	Šumy v optickém přijímači	26
	Zpracování přijatého signálu v optickém přijímači	26
3	Srovnání komerčních řešení	28
	Point2point –AC Coupled Fiber Optic Link	28
	LTX-5515 “Signal transporter”	29
	MITEQ-SLL-5K2P5G	30
	AFL-4800 High Speed Analog/digital fiber optic link	31
4	Výběr řešení	31
4.1	Napájení vysílače	35
4.2	Napájení přijímače	37
4.3	Budič laserové diody	38
4.4	Shrnutí.....	41
5	Konstrukční část	43
5.1	Měření parametrů optické linky.....	53
6	ZÁVĚR	59
	Literatura	61
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	62

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Principiální schéma systému detekce částečných výbojů	2
Obr. 1.2: Blokové schéma hlavní řídicí jednotky	3
Obr. 1.3: Blokové schéma senzoru pro detekci částečných výbojů.....	3
Obr. 2.1: Optický řetězec	5
Obr. 2.2: Konstrukce optického vlákna	5
Obr. 2.3: Snellův zákon	6
Obr. 2.4: Grafické znázornění vzniku mezního úhlu a totálního odrazu	7
Obr. 2.5: Navázání paprsku do optického vlákna	8
Obr. 2.6: Konstrukce a šíření paprsku jednovidovým optickým vláknem	9
Obr. 2.7: Konstrukce a šíření paprsku mnohovidovým optickým vláknem se skokovou změnou indexu lomu.....	9
Obr. 2.8: Konstrukce a šíření paprsku mnohovidovým optickým vláknem s gradientním průběhem indexem lomu	10
Obr. 2.9: Útlumová charakteristika optického vlákna	12
Obr. 2.10: Důsledek vidové disperze.....	13
Obr. 2.11: Definice parametru MFD	14
Obr. 2.12: P-N přechod s energetickým diagramem	15
Obr. 2.13: Stimulovaná emise.....	16
Obr. 2.14: Principiální znázornění LASERU	17
Obr. 2.15: Porovnání závislosti vstupního proudu a výstupního výkonu LED a LASERU	18
Obr. 2.16: Porovnání spektrální šířky záření LED a LASERU	18
Obr. 2.17: Různé konfigurace laserové a monitorovací diody	19
Obr. 2.18: Závislost vyzařovaného optického výkonu na budícím proudu při rostoucí teplotě.....	20
Obr. 2.19: Znázornění Peltierova jevu.....	20
Obr. 2.20: Externí Mach-Zenderův modulátor	21
Obr. 2.21: Schematické znázornění Bias-T	22
Obr. 2.22: Volt-ampérová charakteristika fotodiody.....	23
Obr. 2.23: Náhradní schéma fotodiody.....	24
Obr. 2.24: Graf citlivosti v závislosti na vlnové délce nejpoužívanějších materiálů, převzato z [5]	25

Obr. 2.25: Schéma transimpedančního zesilovače	27
Obr. 2.26: Frekvenční závislost napěťového zisku OZ	28
Obr. 3.1: Optická linka point2point AC coupled Fiber Optic Link (převzato z http://ppmtest.com/wp-content/uploads/point2point-AC-Link-Datasheet-PAX-DS-7.pdf)	29
Obr. 3.2: Optická linka LTX-5515 (převzato z http://www.teratec.us/products/75/LTX5515--Analog/Digital,-DC-to-25-MHz-Fiber-Optic-Links/)	30
Obr. 3.3: Optická linka MITEQ-SLL-5K2P5G (převzato z https://www.miteq.com/docs/MITEQ-SLL-5K2P5G.PDF)	30
Obr. 3.4: Optická linka AFL-4800 High Speed Analog/Digital (převzato z http://www.lab-systems.com/products/fib-opt/afl4800/index.html)	31
Obr. 4.1: Moduly optické linky od firmy Avago Technologies (vlevo vysílač a vpravo přijímač)	32
Obr. 4.2: Schéma vysílacího modulu	33
Obr. 4.3: Inovované schéma řídicí jednotky	33
Obr. 4.4: Inovované schéma senzoru	33
Obr. 4.5: Bod jednodécibellové komprese a bod zahrazení produkty třetího řádu IP3 ...	34
Obr. 4.6: Schéma přijímacího modulu	35
Obr. 4.7: Napájení pro vysílací modul	36
Obr. 4.8: Schéma zapojení lineárního stabilizátoru LM 317	36
Obr. 4.9: Napájecí obvod pro přijímací modul	38
Obr. 4.10: Schéma zapojení lineárního stabilizátoru LM317	38
Obr. 4.11: Doporučené zapojení řídicího obvodu iC-WKP (převzato z http://www.ichaus.de/upload/pdf/WKP_datasheet_C1en.pdf)	40
Obr. 4.12: Lineární stabilizátor LM 317 jako omezovač proudu	40
Obr. 4.14: Schéma navrženého přijímacího modulu	42
Obr. 5.1: Graf závislosti optického výkonu na protékajícím proudu	43
Obr. 5.3: Mechanické řešení připojení modulu na nepájivé pole	45
Obr. 5.4: Zapojení modulu na nepájivém poli a měření proudovou sondou	45
Obr. 5.5: Zapojení pracoviště pro měření optického výkonu	46
Obr. 5.6: Mechanické řešení připojení přijímacího modulu	46
Obr. 5.7: Zapojení optické linky	47
Obr. 5.8: Schéma zapojení vysílače z programu Eagle	48
Obr. 5.9: Deska plošných spojů (hladina TOP)	48
Obr. 5.10: Fotografie osazené desky plošných spojů	49

Obr. 5.11: Rozmístění součástek na desce vysílače.....	49
Obr. 5.12: Návrh 50Ω mikropáskového vedení	50
Obr. 5.13: Schéma zapojení přijímače z programu Eagle	51
Obr. 5.14: Motiv vodivých spojů na hladině TOP.....	51
Obr. 5.15: Fotografie desky přijímače	52
Obr. 5.16: Rozmístění součástek	52
Obr. 5.17: Porovnání změřeného průběhu S_{11} s průběhem od výrobce.....	54
Obr. 5.18: Porovnání změřeného průběhu vst. impedance Z s průběhem od výrobce ...	54
Obr. 5.19: Porovnání změřeného průběhu S_{22} s průběhem od výrobce.....	55
Obr. 5.20: Porovnání změřeného průběhu přenosu S_{21} s průběhem od výrobce	55
Obr. 5.21: Obrazovka osciloskopu při měření modulovaného signálu.....	57

ÚVOD

Přenos signálů pomocí optických vláken už začíná být v dnešní době dominantním typem kabelového přenosu signálů na delší i kratší vzdálenosti, především v telekomunikacích. Hlavními výhodami přenosu signálu pomocí optických vláken v porovnání s klasickým metalickým vedením jsou nízký útlum, velmi vysoká odolnost proti elektromagnetickému rušení a podstatně vyšší dosažitelné přenosové rychlosti. Naopak za nevýhody lze považovat technologicky náročnou výrobu, obtížnou manipulaci s optickými vlákny a vyšší cenu. Aby bylo možné přenést signál po optickém vlákne je nutné nejprve pomocí vhodného zdroje záření a modulátoru převést elektrický signál na optický. Naopak pro zpracování přijatého signálu v přijímači je potřeba vhodným optickým detektorem převést optický signál zpět do elektrické oblasti.

V rámci diplomové práce je rozebrána problematika návrhu a konstrukce optické linky pro přenos vysokofrekvenčního signálu, která je tvořena optickým vysílačem, přijímačem a optickým vláknem. Takovýto systém je znázorněn na Obr. 2.1. Hlavním cílem je návrh a praktická realizace optické linky s šířkou pásma do 1 GHz. U realizované optické budou staveny dosažené parametry a porovnány s komerčními řešeními.

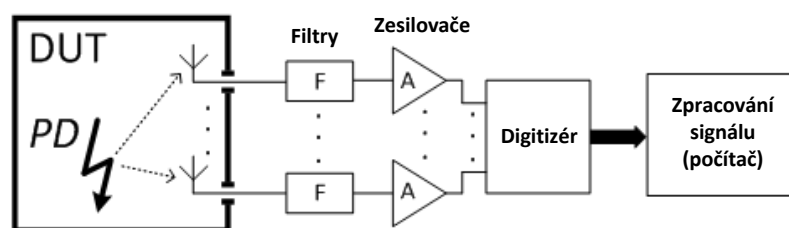
Diplomová práce je rozdělena do čtyř základních částí. V první kapitole je popsán systém MOSAD[®]-PD-UHF, ve kterém bude navržená optická linka použita, dále následuje kapitola s teoretickým popisem jednotlivých částí optického řetězce. Ve třetí části jsou vybrána dostupná komerční řešení a porovnány jejich vlastnosti. Výběru řešení a návrhu modulu vysílače a přijímače se věnuje čtvrtá kapitola. Poslední pátá kapitola je věnována samotné konstrukci optické linky a zhodnocení dosažených parametrů.

1 MOTIVACE PRÁCE

Současná technologicky vyspělá společnost je charakteristická značnou spotřebou energie a to především v její elektrické podobě. Spolehlivost výroby a dodávky elektrické energie je kvůli závislosti mnoha napájecích systémů velmi důležitá. Při výpadku dodávek elektrické energie může dojít k vážným technickým, bezpečnostním i ekonomickým důsledkům.

Jednu z klíčových částí energetického výrobního a přenosového řetězce představují vysokonapěťové výkonové transformátory. Ty přenášejí elektrický výkon řádu stovek megawattů při napěťových úrovních desítek až stovek kilovoltů. Kritickou částí transformátoru je dielektrická olejová náplň, která zajišťuje elektrickou izolaci a chlazení. Kvalita olejové náplně je degradována výskytem tzv. částečných výbojů. Při částečném výboji dochází k náhlému částečnému přemostění izolace mezi místy s rozdílným elektrickým potenciálem a to zejména na nehomogenitách dielektrika. Elektrický výboj způsobuje další degradaci oleje a další zvýšení pravděpodobnosti vzniku výbojů. Pokud není tato skutečnost včas zjištěna a transformátor není včas vyřazen z provozu, může dojít k velmi významnému zhoršení izolačních vlastností oleje, vzniku oblouku a následnému požáru nebo explozi.

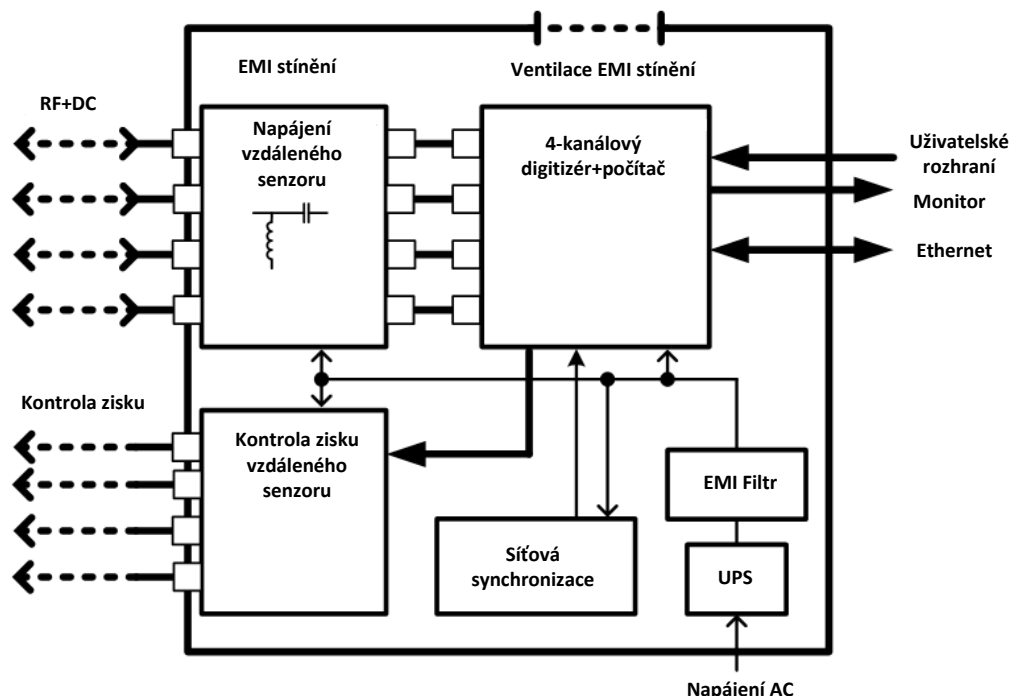
Jednou z aktivit Ústavu teoretické a experimentální elektrotechniky je výzkum problematiky detekce a lokalizace částečných výbojů ve výkonových transformátorech. V rámci výzkumu byl vyvinut systém pro detekci, lokalizaci a vyhodnocení částečných výbojů v transformátorech MOSAD®-MST-PD. Systém využívá moderní metodu detekce vyzařování elektromagnetických vln od částečných výbojů v pásmu velmi vysokých kmitočtů. Umožňuje diagnostikovat přítomnost částečných výbojů, vyhodnotit jejich úroveň a lokalizovat místo jejich výskytu a to v reálném čase. Jednoduché principiální schéma je znázorněno na Obr. 1.1 Úplně vlevo se nachází transformátor a chladicí kapalinou, kde vznikají částečné výboje. Tyto částečné výboje jsou detekovány anténou a následně je naměřený signál přenesen k digitizéru, který jej převede do digitální podoby a poté je signál zpracován a analyzován v hlavním počítači.



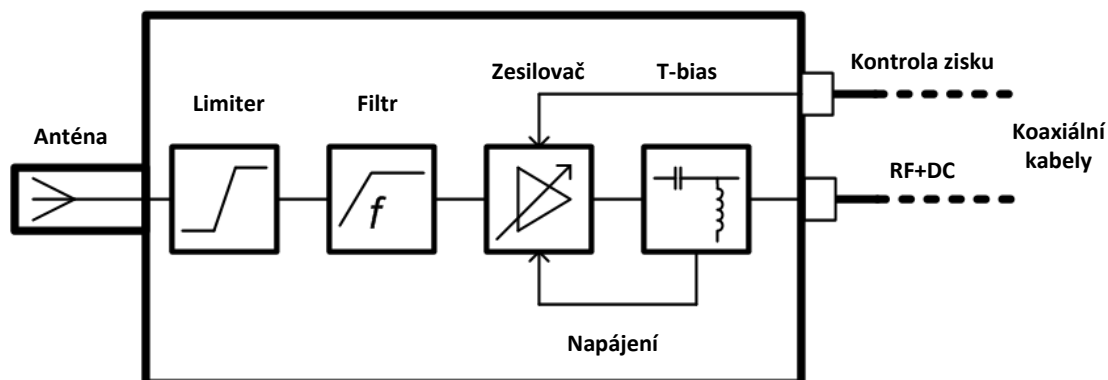
Obr. 1.1: Principiální schéma systému detekce částečných výbojů

Hlavní řídicí jednotka systému MOSAD®-MST-PD znázorněna na Obr 1.2, obsahuje digitizér, řídicí počítač, bloky pro napájení a řízení vzdálených senzorů, napájecí systém a systém chlazení přístrojové skříně. K hlavní jednotce jsou pomocí koaxiálních kabelů připojeny čtyři vzdálené senzory. Modul senzoru tvoří anténa (kuželový monopol), limiter pro ochranu dalších obvodů, dále filtr typu horní propust,

zesilovač s nastavitelným zesílením a vazební a napájecí článek typu T která odděluje vysokofrekvenční signál od napájecího. Blokové schéma senzoru je znázorněno na Obr. 1.3



Obr. 1.2: Blokové schéma hlavní řídicí jednotky



Obr. 1.3: Blokové schéma senzoru pro detekci částečných výbojů

Měřicí senzory a hlavní řídicí jednotku spojují koaxiální kabely, pomocí kterých, jsou přenášeny naměřené vysokofrekvenční signály, dále signály pro kontrolu zisku zesilovačů a napájení. Použité koaxiální kabely mají dva oplety, vzájemně oddělené a připojené do specifických míst navazující stínící konstrukce. Toto opatření dále snižuje průniku rušení do přenosové cesty a tím zvyšuje odolnost zařízení proti silnému rušení. Významnou nevýhodou koaxiálních kabelů je poměrně vysoký měrný útlum na vyšších kmitočtech. Použitý kabel je typu G_03332 od švýcarské společnosti Huber&Suhner.

Jeho měrný útlum na kmitočtu 1 GHz je 0,5 dB-m-1. Při délce měřicího přenosového vedení 18 m je tak jeho celkový útlum 8,2 dB. To představuje téměř třináásobný pokles napětí signálu na výstupu kabelu a významný pokles poměru signálu k šumu před jeho digitalizací a dalším zpracováním. V samotné přenosové cestě systému MOSAD®-MST-PD jsou pak použity další vazební a ochranné prvky, které zvyšují útlum až na 12,8 dB. Pokles napětí je pak více než čtyřnásobný.

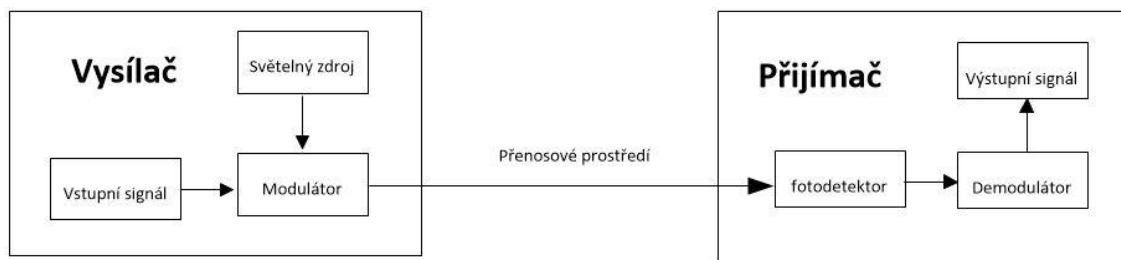
V rámci dalšího vývoje systému byla hledána možnost jak tento přenosový útlum snížit. Jako vhodná alternativa se nabízí optická vlákna, která mají v současnosti měrný útlum výrazně nižší, z principu své funkce jsou vysoce odolná vůči elektromagnetickému rušení a mají výrazně vyšší využitelnou šířku kmitočtového pásma. Vzhledem ke skutečnosti, že použití optovláknové přenosové cesty obnáší doplnění systému o elektrooptický a optoelektronický převodník a optovláknové konektory, nelze pro porovnání výsledný útlum jednoduše stanovit. Přesnější hodnotu by bylo možno získat výpočtem při známém řešení celkové přenosové cesty nebo pak měření na jejím prototypu. Při použití optického vlákna na vlnové délce 1310nm je typický útlum 0,5 dB/km, při délce vlákna 18 m vychází útlum 0,09 dB. K tomu je třeba připočítat útlumy na konektorech. Použitá optická linka bude obsahovat konektory typu FC, pro které byl nalezen vložný útlum přibližně 0,2 dB [1]. Celkový útlum optické trasy je tedy dán součtem útlumů na dvou FC konektorech a samotném vláknu a vychází 0,49 dB.

Za další výhody optických kabelů lze považovat jejich malé rozměry, nízkou hmotnost, vysokou spolehlivost a relativně dlouhou životnost. Cílem této práce bude navrhnout a zkonstruovat optickou linku s šířkou pásma v řádu stovek MHz až 1GHz, která by sloužila jako náhrada stávajícího řešení s koaxiálním kabelem.

2 OPTICKÝ PŘENOSOVÝ SYSTÉM

Optický přenosový systém je znázorněn na Obr. 2.1 a je tvořen třemi základními částmi: vysílačem, přenosovým prostředím a přijímačem.

Blok vysílače je tvořen zdrojem vstupního signálu, který chceme přenášet, poté zdrojem světelného záření a konečně modulátor, kterým je vstupní signál namodulován na světelný paprsek. Přenosové prostředí bývá většinou tvořeno optickým vláknem, avšak může být tvořeno i atmosférou, takový přenos je zatížen velkým útlumem, malou spolehlivostí a najde svoje využití u rádiových přenosů. Poslední částí optického řetězce je přijímač, který se skládá z fotodetektoru, jenž přemění optický signál na elektrický a demodulátoru, který zpracuje přijatý signál do vhodné podoby.



Obr. 2.1: Optický řetězec

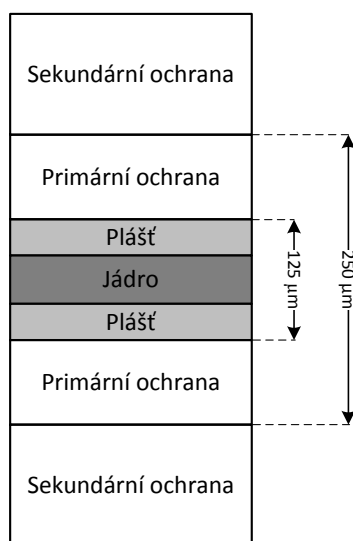
2.1 Přenos signálu optickým vláknem

Jednou ze základních částí optického řetězce znázorněného na Obr. 2.1, je optické prostředí, většinou optické vlákno. Přenos signálu optickým vláknem je dnes dominantním typem přenosu dat na velké vzdálenosti a při velmi vysokých přenosových rychlostech. Mezi hlavní výhody optických vláken patří nízký útlum (běžně pod 0,5 dB/km), velká šířka pásma, velký dynamický rozsah a skutečnost, že jsou vysoce odolné vůči elektromagnetickému rušení a představují galvanické oddělení systémů.

2.1.1 Konstrukce a fyzikální princip optického vlákna

Optické vlákno je tvořeno:

- Jádrem – má větší index lomu a společně s pláštěm mohou být skleněné nebo plastové
- Pláštěm – má nižší index lomu než jádro
- Primární ochranou – zajišťuje základní ochranu vlákna
- Sekundární ochranou – zvyšuje mechanickou odolnost vlákna



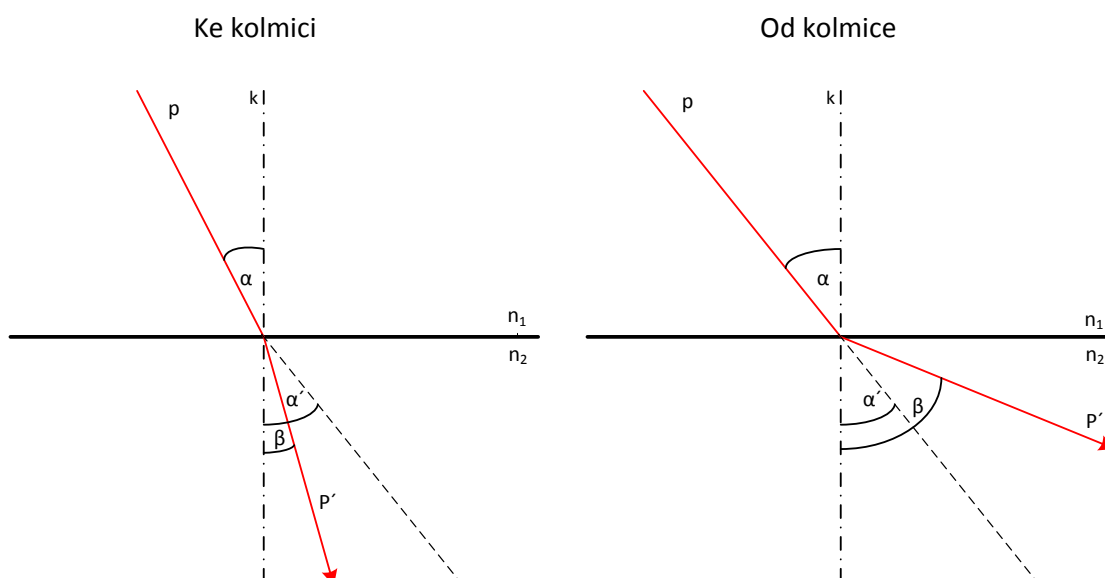
Obr. 2.2: Konstrukce optického vlákna

Optická vlákna se dnes vyrábí z tzv. preformy, což je skleněná tyčka o průřezu, který představuje zvětšený profil vlákna. Z preformy se poté za vysoké teploty táhne vlastní vlákno. Materiálem používaným k výrobě je SiO_2 a mnohé legovací příměsi, kterými se dosahuje požadovaných vlastností vlákna[2].

Optické vlákno je vlastně dielektrický vlnovod válcovitého tvaru, který přenáší světelné paprsky ve směru podélné osy. Funkci optického vlákna je možno popsat např. pomocí jevu totálního odrazu světelného paprsku na rozhraní dvou prostředí s různým indexem lomu. Totální odraz vychází ze Snellova zákona, jehož princip je znázorněn na Obr. 2.3 a je popsán rovnicí

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}, \quad (2.1)$$

kde α_1 je úhel dopadu, α_2 je úhel lomu, n_1 je index lomu 1. prostředí, n_2 je index lomu 2. prostředí, v_1 rychlost světla v 1. prostředí a v_2 rychlost světla ve 2. prostředí.



Obr. 2.3: Snellův zákon

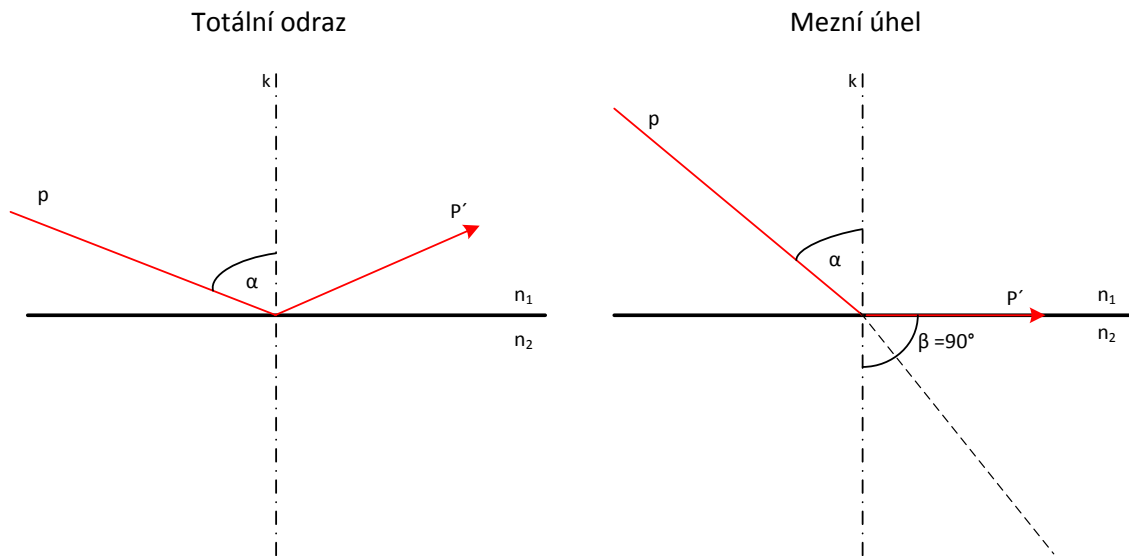
Snellův zákon udává podíl sinu úhlu dopadu a sinu úhlu lomu, jenž je roven podílu rychlostí světla v jednotlivých prostředích, respektive podílu jejich indexů lomu. Mohou nastat dva případy:

- lom paprsku od kolmice (z opticky hustšího do opticky řidšího prostředí)
- lom paprsku ke kolmici (z opticky řidšího do opticky hustšího prostředí)

Jestliže se bude při lomu paprsku od kolmice zvětšovat úhel dopadu, úhel lomu dosáhne 90° a lomený paprsek se bude šířit na rozhraní obou prostředí (Obr. 2.4). Takový úhel dopadu, který způsobí úhel lomu 90° se nazývá mezní úhel a lze ho zjistit ze vztahu

$$\frac{\sin \alpha_K}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow \sin \alpha_K = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.2)$$

Při dalším zvětšování úhlu dopadu světelného paprsku nastává totální odraz (Obr 2.4). Jádru optického vlákna proto musí mít větší index lomu než plášť, aby byly splněny podmínky totálního odrazu a vlákno přenášelo světelný signál s minimálním útlumem[1].



Obr. 2.4: Grafické znázornění vzniku mezního úhlu a totálního odrazu

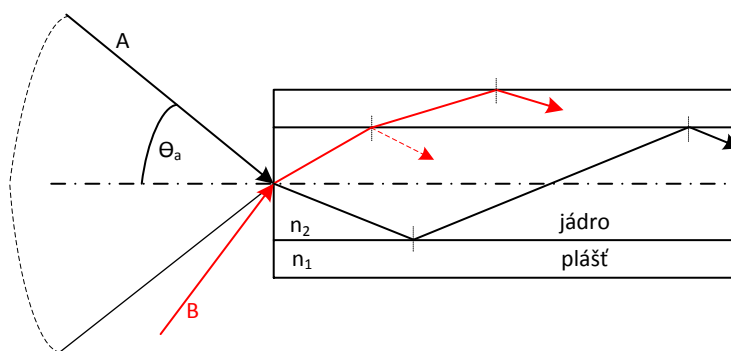
K navázání světelného paprsku do optického vlákna je třeba, aby paprsek dopadl pod úhlem menším, než je tzv. mezní úhel navázání Θ_a (Obr. 2.5). Velikost prostorového úhlu závisí na indexech lomů obou prostředí

$$n \cdot \sin \Theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (2.3)$$

kde n je index lomu vzduchu, n_1 je index lomu jádra optického vlákna, n_2 index pláště optického vlákna a θ_a je mezní úhel navázání.

Numerická apertura je schopnost optického vlákna navázat určitý optický výkon z okolí do svého jádra, číselně je rovna sinu mezního úhlu navázání θ_a

$$NA = n \cdot \sin \Theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \quad (2.4)$$



Obr. 2.5: Navázání paprsku do optického vlákna

Na Obr 2.5 je znázorněna situace navázání paprsku do optického vlákna. Paprsek A dopadá pod mezním úhlem navázání a šíří se s nízkým útlumem vláknem, zatímco paprsek B dopadá pod větším úhlem, nenastane totální odraz ve vlákně a paprsek postupně zaniká v plášti.

2.1.2 Typy optických vláken

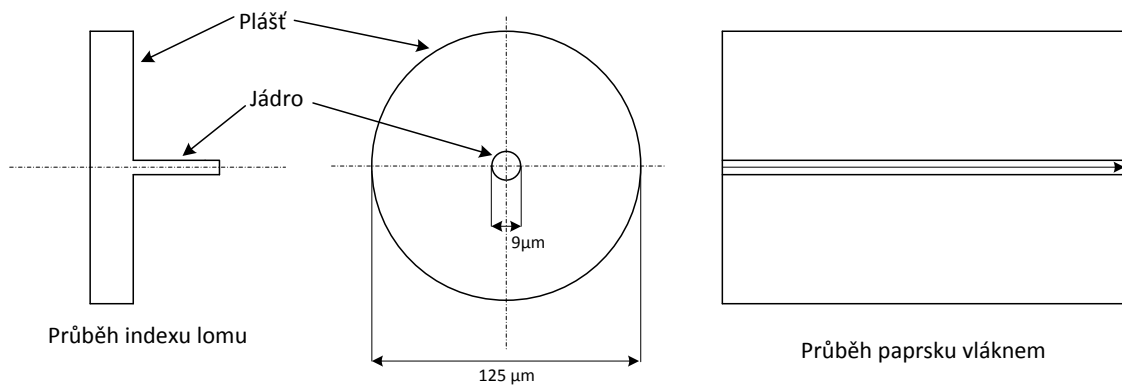
Hlavními parametry, podle kterých se dělí optická vlákna, jsou průměr a profil indexu lomu jádra. Tyto dva parametry mají zásadní vliv na výsledné vlastnosti jádra, zejména ovlivňují numerickou aperturu a počet šířících se vidů.

Základní dělení optických vláken je:

- Jednovidová (SMF)
- Mnohovidová se skokovou změnou indexu lomu (MMF SI)
- Mnohovidová s gradientním průběhem indexu lomu (MMF GI)

Jednovidová vlákna

Jednovidová vlákna mají velmi malý poloměr jádra (5-10 μm), nízkou numerickou aperturu (0,08-0,15), tedy je relativně obtížné navázat optický výkon do vlákna a šíří se jím pouze jeden vid (definované rozložené EM pole). Jsou často využívány pro přenosy na delší vzdálenosti, protože z principu u nich nenastává vidová disperze.



Obr. 2.6: Konstrukce a šíření paprsku jednovídným optickým vláknem

Mnohovidová se skokovou změnou indexu lomu

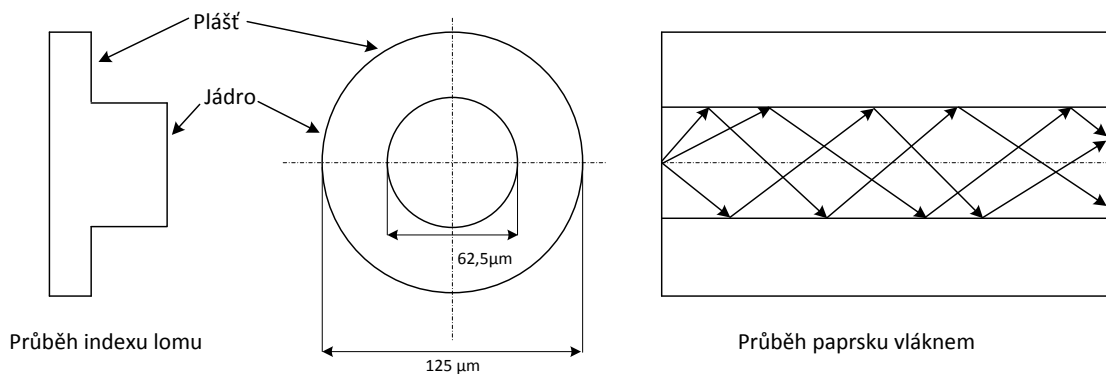
Mnohovidová vlákna se skokovou změnou indexu lomu se v podstatě liší od jednovídných pouze v průměru jádra, jenž má výrazně vyšší. Dále mají výhodu ve vysoké numerické apertuře a relativně nízké ceně. Jak vyplývá z názvu, při přenosu záření může ve vlákně existovat více vidů elektromagnetického pole. Počet vedených módů lze určit pomocí normované frekvence V

$$V = 2 \cdot \pi \frac{a}{\lambda_0} \cdot NA, \quad (2.5)$$

kde a je poloměr vlákna, λ_0 je vlnová délka ve vakuu a NA je numerická apertura. Pak přibližně platí

$$M \approx \frac{V^2}{2} \quad (\text{pro } MM / SI) \quad \text{a} \quad M \approx \frac{V^2}{4} \quad (\text{pro } GI), \quad (2.6)$$

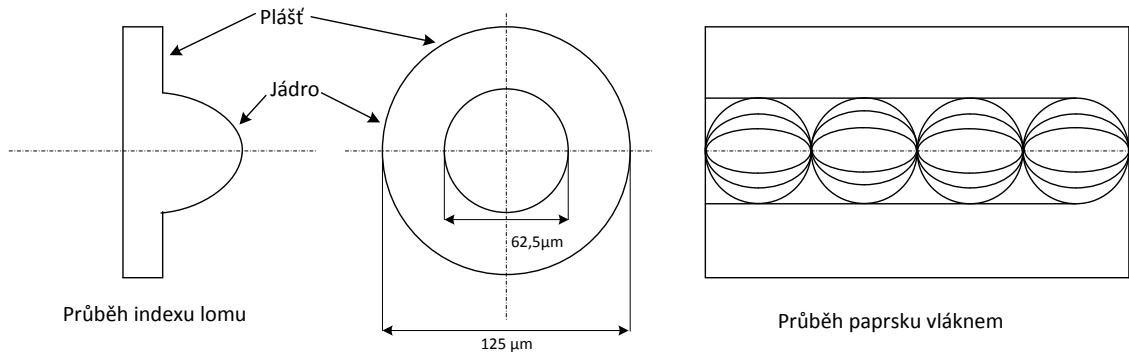
kde M je počet vedených módů. Aby bylo vlákno považováno za mnohovidové, musí splňovat podmínku $V > 2,405$ [4].



Obr. 2.7: Konstrukce a šíření paprsku mnohovidovým optickým vláknem se skokovou změnou indexu lomu

Mnohovidová s gradientním průběhem indexu lomu

U gradientních optických vláken není rozhraní mezi pláštěm a jádrem, ale jednotlivé skloviny jsou v sobě rozpuštěny. Díky gradientnímu průběhu indexu lomu se světlo v těchto vláknech nešíří totálním odrazem, ale pomocí ohybu světla (Obr 2.8). Používá se pro vlnové délky 850 a 1350 nm. Hlavní výhoda mnohovidových vláken s gradientním průběhem indexu lomu je, že způsobují menší disperzi signálu a proto jsou využívány u páteřních sítí na přenosy s velkou přenosovou rychlostí.



Obr. 2.8: Konstrukce a šíření paprsku mnohovidovým optickým vláknem s gradientním průběhem indexem lomu

2.1.3 Parametry optických vláken

Primární požadavky na optická vlákna jsou minimální útlum a minimální zkreslení optického signálu při zvoleném typu modulace. Dalšími důležitými parametry jsou šířka pásma, numerická apertura, disperze, vlnová délka a průměr jádra a pláště.

Útlum signálu v optickém vlákně

Obdobně jako u klasických metalických vedení, tak i u optických vláken při rostoucí vzdálenosti od zdroje signálu, klesá výkonová úroveň signálu. Útlum v optickém vlákně bývá udáván v jednotce dB/km a je definován jako decibelová míra poměru vstupního výkonu P_1 a výstupního P_2

$$u(\lambda) = 10 \log \left(\frac{P_1}{P_2} \right). \quad (2.7)$$

Hlavními jevy, které způsobují útlum v optickém vlákně, jsou absorpce a rozptyl světelných paprsků. Oba tyto jevy jsou silně závislé na vlnové délce optického záření. Složky, které se podílejí na celkovém útlumu:

- Útlum absorpcí α_A – je způsoben pohlcením části optického záření vlastními molekulami materiálu optického vlákna nebo molekulami nečistot, které do vlákna vnikly při výrobě. Prvním typem je infračervená absorpce, která narůstá u větších vlnových délek a druhým je ultrafialová, jež je výraznější u kratších vlnových délek.

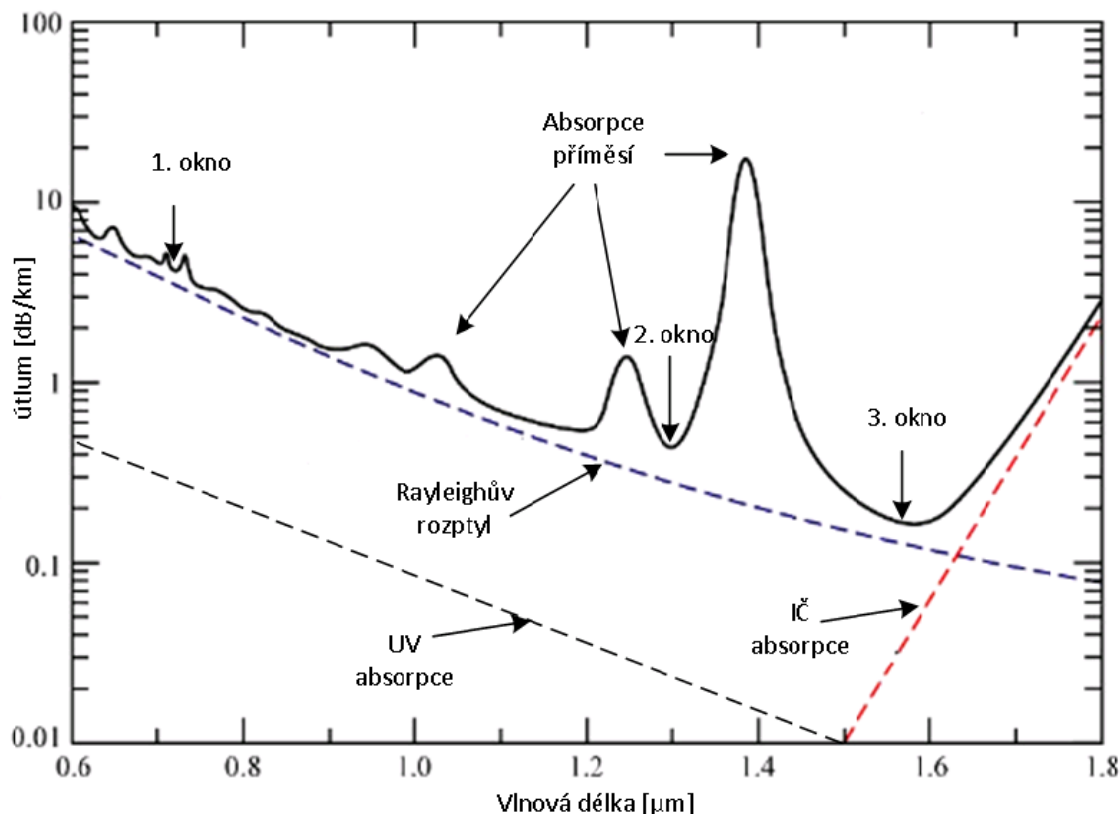
- Rayleighův rozptyl α_R – vzniká v důsledku srážek mezi molekulami hmoty jádra a procházejícího světelného paprsku. Část procházejícího světelného paprsku se rozptyluje do různých směrů.
- Rozptyl na makroohybech a jiných deformacích α_O – při ohybu optického vlákna může nastat situace, že úhel dopadu nebo odrazu překročí mezní úhel a světelný paprsek pronikne do pláště, kde zanikne. Proto je třeba s optickými vlákny pracovat šetrně a podle pokynů výrobce.
- Rozptyl na makroskopických neregularitách α_N – makroskopické neregularity jsou například trhlinky v materiálu, vzduchové bubliny nebo nepřesnosti ve tvaru vlákna.
- Rozptyl na mikroohybech α_{MO} – mikroohyby jsou malé nepřesnosti v přímočarosti osy a geometrii jádra. Vznikají již při výrobě nebo působením vnějších vlivů na vlákno.

Celkový útlum α je dán součtem všech dílčích útlumů

$$\alpha = \alpha_A + \alpha_N + \alpha_R + \alpha_{MO} + \alpha_O, \quad (2.8)$$

Z útlumové charakteristiky na Obr. 2.9 vyplývá, že pro komunikaci po optickém vlákne jsou vhodné pouze zejména některé vlnové délky tzv. okna.

1. Okno na vlnové délce 850 nm se používá pro mnohovidové šíření a díky velmi levným zdrojům a detektorům záření se využívá u optických přístupových sítí.
2. Okno je na vlnových délkách okolo 1300 nm a bývá využíváno pro jednovidové šíření s útlumem pod 0,35 dB/km a slouží často k dálkovým přenosům. Vyznačuje se nejnižším koeficientem disperze.
3. Okno je na vlnových délkách okolo 1550 nm a to je okno s nejnižším útlum okolo 0,2 dB/km a také je využíváno pro dálkové přenosy.



Obr. 2.9: Útlumová charakteristika optického vlákna

Šířka pásma

Šířka pásma vyjadřuje nejvyšší frekvenci, která může být spolehlivě přenesena na vzdálenost jeden kilometr mnohovidovým vláknem bez znatelného zkreslení signálu. Bývá udávána v jednotkách MHz·km a výrazně závisí na konstrukci vlákna a na vlnové délce přenášeného signálu.

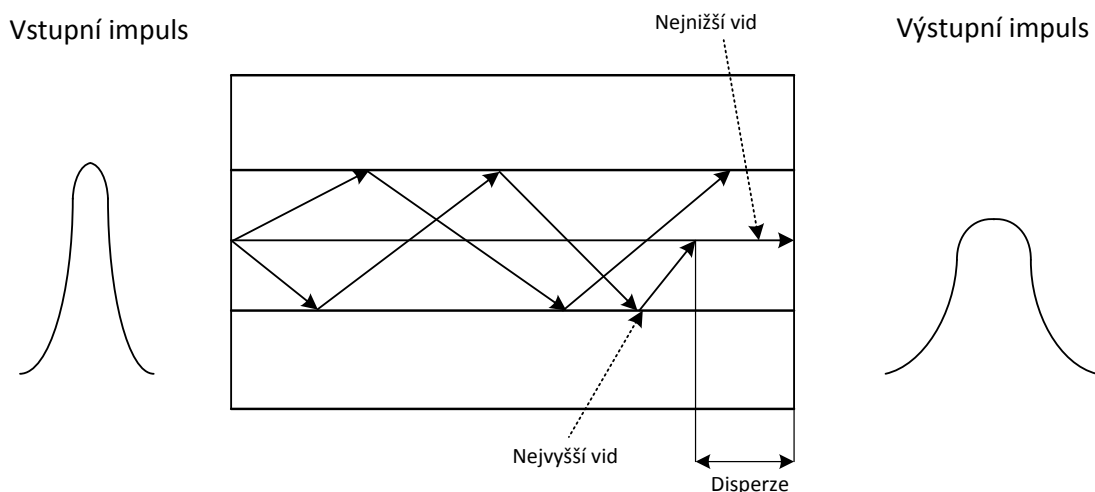
Disperze

Disperze způsobuje zkreslení přenášeného signálu v podobě unipolárního impulsu záření. Definuje se jako rozdíl šířky v polovině výšky impulsu na vstupu a na výstupu vlákna. Rozlišujeme tři typy disperze:

- Vidová disperze – vyskytuje se ve mnohovidových vláknech. Každý vid (světelný paprsek) dorazí na konec vlákna v různém časovém okamžiku a výsledný impuls složený z jednotlivých vidů se liší tvarem od vstupního. Vidová disperze se projevuje u dlouhých optických vláken a omezuje počet impulsů, které mohou být za určitý čas přeneseny.
- Chromatická disperze - zdroje záření používané v optoelektronice nejsou monochromatické (jejich záření obsahuje více vlnových délek). Každá vlnová délka má různou rychlost šíření a zároveň se s vlnovou délkou mění mírně i index lomu. To způsobí, že jednotlivé vlnové délky dorazí v různém časovém okamžiku a výsledný složený impuls je zkreslený oproti

vstupnímu.

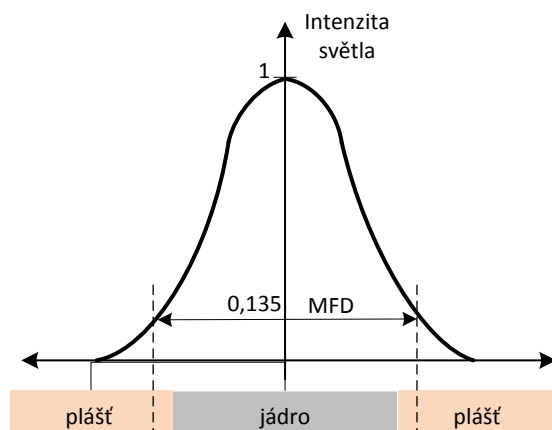
- Polarizační disperze – vyskytuje se u jednovidových optických vláken. Vid šířící se optickým vláknem, se šíří dvěma na sebe kolnými polarizačními rovinami. Výskyt jakékoli kruhové nesymetrie či nečistoty, způsobí různou rychlost v obou polarizacích a tedy zkreslení výstupního impulsu. Polarizační disperze je pro krátké vzdálenosti a nižší přenosové rychlosti obvykle zanedbatelná oproti chromatické a vidové.



Obr. 2.10: Důsledek vidové disperze

Parametr MFD

Je to parametr udávaný výrobcem pro jednovidová optická vlákna, který udává šířku, ve které je intenzita přenášeného optického záření vyšší nebo rovna než 0,135 z maximální intenzity a obvykle bývá o něco větší než průměr jádra, protože malá část optického záření se šíří i pláštěm. Parametr MFD je závislý na vlnové délce, s kratší vlnovou délkou se zmenšuje. Důležitý je především u spojování optických vláken, protože svařili se dvě vlákna s různým MFD zvýší se útlum.



Obr. 2.11: Definice parametru MFD

2.2 Optický vysílač

Tato kapitola se bude zabývat další důležitou součástí optického řetězce, a to sice vysílači optického záření. Optický vysílač se skládá ze zdroje optického záření a z modulátoru. Hlavní funkcí optického vysílače je převést signál z elektrické oblasti do optické a provést jeho požadovanou modulaci.

Hlavními požadavky kladené na optické zdroje jsou:

- Vysoká účinnost přeměny elektrické energie na světelnou
- V některých případech vysoká koherence vyzařovaného záření
- Vyzařování na vlnových délkách, kde je minimální útlum optických vláken
- Snadná modulovatelnost výstupního záření
- Snadné navázání optického záření na optické vlákno
- Vysoká spolehlivost, dlouhá životnost a nízká cena
- V některých případech co nejúžší spektrální šířka generovaného záření
- Co nejmenší rozměry a hmotnost

Jako zdroje optického signálu jsou v optoelektronice obvykle využívány buď elektroluminiscenční (LED) nebo laserové diody (LD).

2.2.1 Elektroluminiscenční dioda

LED dioda je polovodičová součástka obsahující PN přechod, který při polarizaci v propustném směru emituje nekoherentní optické záření. Fyzikální princip je založen na rekombinaci páru elektron-díra a je znázorněn na Obr. 2.12. Elektrony se nachází ve vodivostním pásu s energií E_v a díry ve valenčním pásu s energií E_1 . Při rekombinaci dojde k uvolnění kvanta energie, které je rovno rozdílu obou energetických hladin

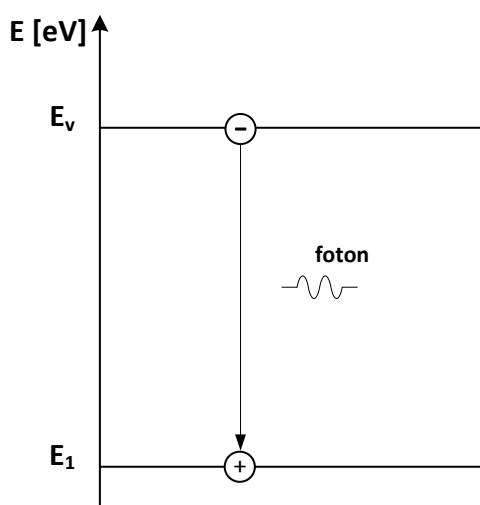
$$\Delta E = E_v - E_1. \quad (2.9)$$

Dále mezi energií a frekvencí vyzařovaného záření platí vztah,

$$\Delta E = h \cdot f, \quad (2.10)$$

kde h je Planckova konstanta $h=6,62 \cdot 10^{-34} \text{ W} \cdot \text{s}^2$ a f je frekvence v Hz.

Vlnová délka a spektrální šířka emitovaného záření je určena materiálem, ze kterých je LED vyrobena, tedy energetickou vzdáleností vodivostního a valenčního pásu. Pro typickou vlnovou délku 1. okna 850 nm bývá použit materiál GaAs a pro 2. okno (1550 nm) bývá použit materiál InGaAsP.



Obr. 2.12: P-N přechod s energetickým diagramem

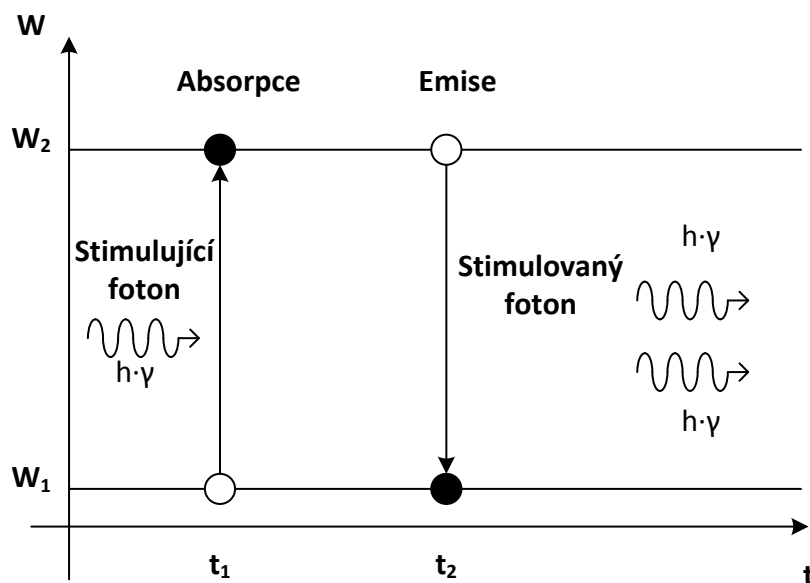
Jako výhody LED diod lze považovat to, že jsou levné, mají dlouhou životnost a budící proud lze snadno modulovat, naopak nevýhody jsou, že vyzařují nekoherentní záření s nízkým výkonem a s větší spektrální šířkou oproti LD. Vzhledem k těmto vlastnostem jsou využívány jako zdroj optického záření pro mnohovlňová optická vlákna, která mají větší průměr jádra a tedy vyšší numerickou aperturu.

Z konstrukčního hlediska existují dva typy LED diod: s čelním vyzařováním a s vyzařováním z hrany. LED diody vyzařující z hrany vyzařují úzkopásmověji a vyšším výkonem než LED diody vyzařující čelně.

2.2.2 Laserové zdroje

Teorie laserů vychází z jevu stimulované emise znázorněného na Obr. 2.13. Jsou zde znázorněny dvě energetické hladiny W_1 a W_2 , v okamžiku t_1 dojde k absorpci fotonu (přechod z nižší do vyšší hladiny). Po uplynutí doby Δt by soustava přešla spontánně do základního stavu a byl by vyzářen foton s nahodilou fází, polarizací a náhodným směrem šíření. Bude-li přiveden do soustavy přiveden foton (stimulující) s energií rovnou rozdílu obou hladin v okamžiku t_2 , jenž předchází spontánní emisi, přejde soustava do základního stavu už v tomto okamžiku. Přechod z hladiny W_2 do W_1 způsobí vyzáření fotonu, který má stejnou fází, polarizaci a směr šíření jako foton

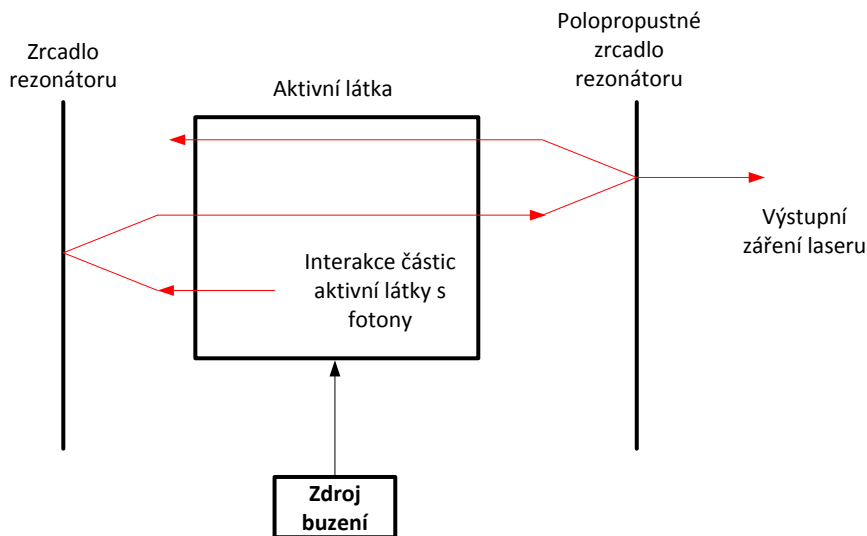
stimulující. Na výstupu soustavy jsou jak stimulovaný tak stimulující foton[3].



Obr. 2.13: Stimulovaná emise

Obecně se laser skládá z několika základních částí (znázorněných na Obr. 2.14): zdroj buzení, aktivní látka a zrcadla rezonátoru. Zdrojem buzení je do aktivního prostředí dodávána energie, která vybudí většinu elektronů aktivního prostředí ze základní hladiny do vyšší, čímž vznikne tzv. inverze populace, což je nerovnovážný stav, kdy je většina elektronů ve vybuzeném - excitovaném stavu. Při zpětném poklesu elektronů na nižší energetickou hladinu dojde k emisi fotonů. Tyto fotony interagují s dalšími elektrony inverzní populace a nastává stimulovaná emise. Umístěním aktivního prostředí mezi zrcadla rezonátoru, dojde k odrazu paprsku fotonů a k ještě většímu zesílení záření, které je vyzářeno skrz polopropustné zrcadlo rezonátoru.

Generované záření je vysoce koherentní (fotony mají stejnou fázi), monochromatické a vysoce směrové.



Obr. 2.14: Principiální znázornění LASERU

2.2.3 Laserová dioda

Laserová dioda je polovodičový laser, kde polovodičový krystal plní funkci aktivního prostředí i funkci rezonátoru. Rezonátor není tvořen dvěma zrcadly, ale vhodně vybroušenými plochami krystalu, které tvoří tzv. Fabry-Perotův rezonátor. Na rozdíl od většiny laserů, v polovodičích dochází k zářivým přechodům mezi energetickými pásy nikoliv mezi energetickými hladinami[4].

Při nízkých proudech tekoucích přes PN přechod polarizovaným v propustném směru, nastává spontánní záření šířící se do všech směrů (nekoherentní záření). K přechodu od spontánní k stimulované emisi dojde při překročení tzv. prahového proudu I_p (Obr. 2.15), to má za následek prudké zvýšení vyzařovaného výkonu a zúžení spektrální šířky záření (Obr. 2.16). Intenzita záření je potom téměř lineárně závislá na budícím proudu, čím nižší I_p tím lepší laserová dioda. Z toho vyplývá, že jestli chceme využívat laserovou diodu v kontinuálním režimu, je třeba zajistit konstantní budící proud bez zákmitů[4].

Optické záření generované laserovou diodou je soustředěno do velmi úzkého rozmezí vlnových délek, vyznačuje se vysokou zářivostí a malou rozbíhavostí svazku. Vyrábějí se laserové diody vyzařující různé vlnové délky, je třeba volit takovou laserovou diodu, která bude vhodná i pro optický přijímač a použité vlákno[3].

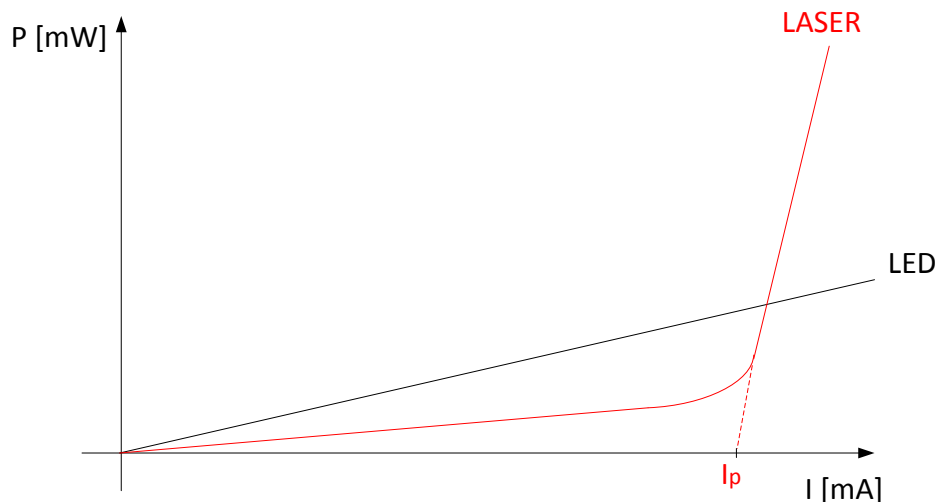
Z hlediska vnitřní struktury lze laserové diody rozdělit:

- homostrukturní
- heterostrukturní
- s rozloženou zpětnou vazbou
- s kvantovými jámami

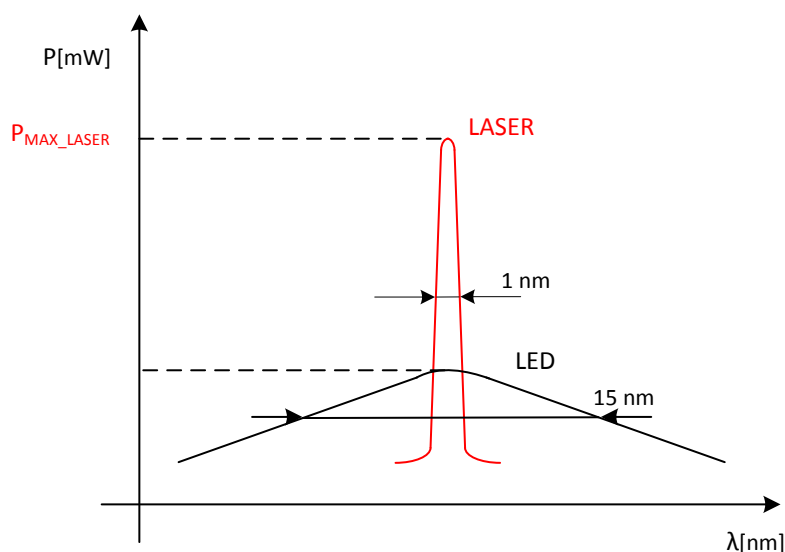
A dále z hlediska vyzařování lze laserové diody dělit:

- Hranově vyzařující

- Plošně vyzařující



Obr. 2.15: Porovnání závislosti vstupního proudu a výstupního výkonu LED a LASERU

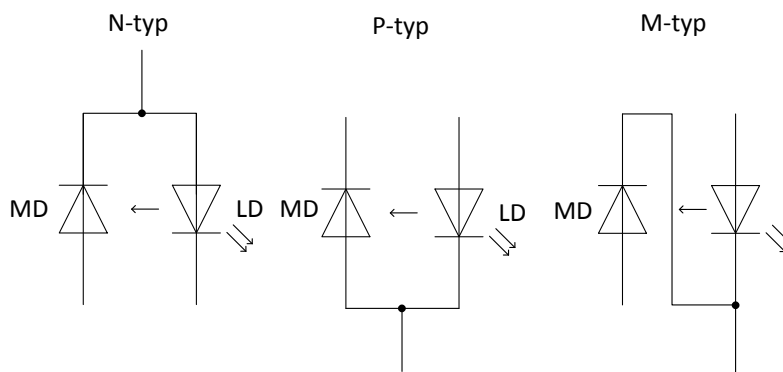


Obr. 2.16: Porovnání spektrální šířky záření LED a LASERU

Řízení laserových diod

Laserové diody mohou pracovat buď v kontinuálním režimu, kdy je konstantní výstupní výkon anebo v impulsním režimu, kdy je výstupní výkon přerušován. V kontinuálním režimu je obvykle žádoucí, aby výstupní optický výkon laserové diody byl stabilizovaný. Pro stabilizaci optického výkonu lze s výhodou využít toho, že bývá většinou zapouzdřena společně s monitorovací PIN diodou, kterou lze monitorovat vyzařovaný optický výkon, protože světlo může vycházet z laserového čipu dopředu i dozadu. Poměr mezi optickým výkonem dopadajícím na monitorovací PIN diodu a zářením vystupujícím z laserové diody je zhruba 10% a 90%. Existují tři typy

konfigurace monitorovací a laserové diody znázorněné na Obr. 2.17. Typ konfigurace je třeba vzít v potaz při výběru řídicího obvodu. Zavedením zpětné vazby je regulován budící proud laserové diody a tak je zajištěn požadovaný výstupní optický výkon[5].

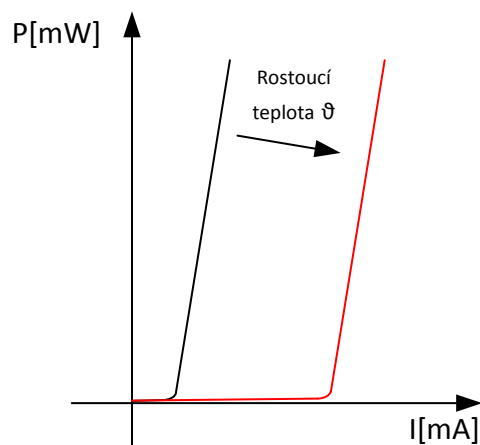


Obr. 2.17: Různé konfigurace laserové a monitorovací diody

Laserové diody jsou citlivé i na krátkodobé překročení maximálního dovoleného proudu, proto musí být budič schopen zajistit účinné omezení proudu a měl by také zamezit průniku nebezpečných napěťových špiček z napájení. Pro řízení laserových diod lze využít buďto řídicích obvodů z diskretních součástek anebo speciálních integrovaných řídicích obvodů, které pracují jako nastavitelný zdroj proudu. Velkou výhodou integrovaných řídicích obvodů je potřeba minimálního počtu externích součástek, menší zabraná plocha na desce plošného spoje, výborná stabilita výstupního výkonu při kolísání napájení, ochrana laserové diody před ESD výboji, před nadměrným proudem a před špičkami na napájecím vedení. Nevýhodou jsou vyšší pořizovací náklady [5].

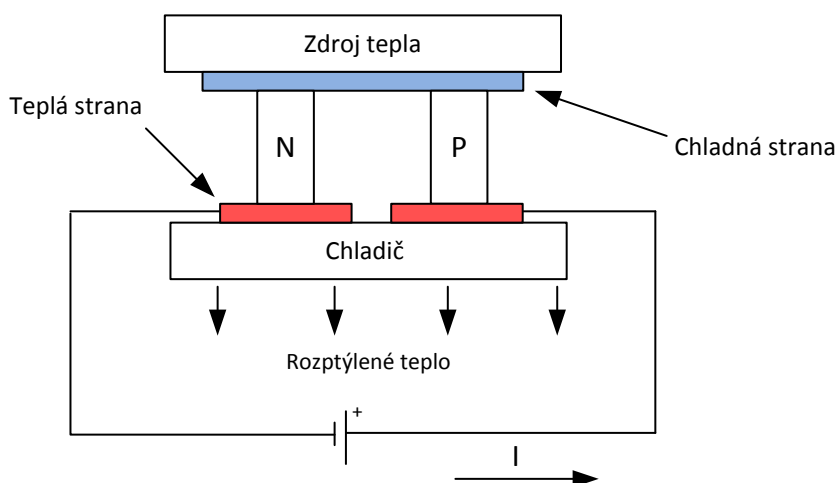
Chlazení laserových diod

Jak již bylo zmíněno výše, laserové diody jsou silně teplotně závislé a je nutné zajistit dostatečné chlazení. Se vzrůstající teplotou dochází k poklesu výstupního optického výkonu, dále k nárůstu prahového proudu I_p (Obr. 2.18) a ke změně vlnové délky výstupního záření zhruba o $0,25\text{nm}/^\circ\text{C}$. V neposlední řadě má teplota vliv i na dobu životnosti, statisticky je udáváno, že snížení pracovní teploty o 10°C zdvojnásobí dobu životnosti laserové diody.



Obr. 2.18: Závislost vyzařovaného optického výkonu na budícím proudu při rostoucí teplotě

Často se pro chlazení laserových diod využívá termočlánek založený na Peltierově jevu znázorněný na Obr. 2.19. Ten je tvořený dvěma bloky polovodiče, které jsou spojeny elektricky do série a tepelně paralelně. Při průchodu proudu rozhraním dvou kovů dochází k ochlazení jedné strany článku a oteplení druhé strany článku [6]. Velkou výhodou je, že lze teplotu přesně řídit nastavením protékajícího proudu. Běžně používané Peltierovy termobaterie obsahují mnoho chladících článků.



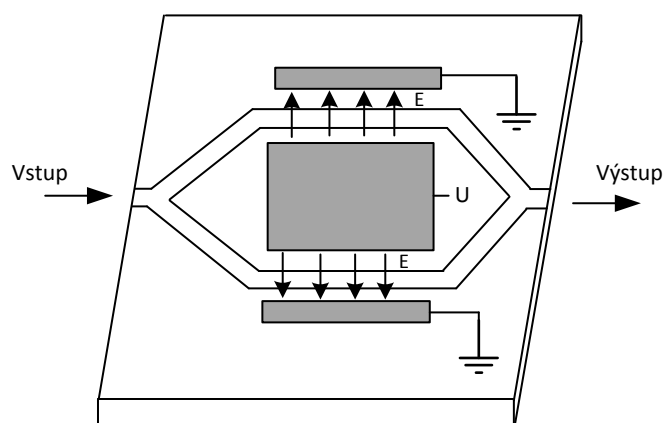
Obr. 2.19: Znázornění Peltierova jevu

2.2.4 Modulace světla

Pro modulaci optického záření se využívá dvou základních principů. Intenzitní modulace zdroje optického záření, kde je modulační proud přímo superponován na konstantní budící proud LED nebo laserové diody, jenž nastavuje pracovní bod na výstupní charakteristice. Druhým principem je modulace konstantního optického toku externím modulátorem neboli modulace pole, kde je zdroj optického záření buzen pro stálý optický výkon a modulace je řízena externím modulátorem.

Modulace pole se používá, má-li optické záření koherentní charakter. Lze modulovat amplitudu (AM), frekvenci (FM), fázi (PM) a polarizaci (PoM). Je požadován koherentní laserový zdroj záření, dále musí zajištěno vysoce stabilní umístění prvků systému. Modulaci pole lze použít pouze pro jednovídrová vlákna, je cenově poměrně náročná, ale zajišťuje velký poměr signálu k šumu.

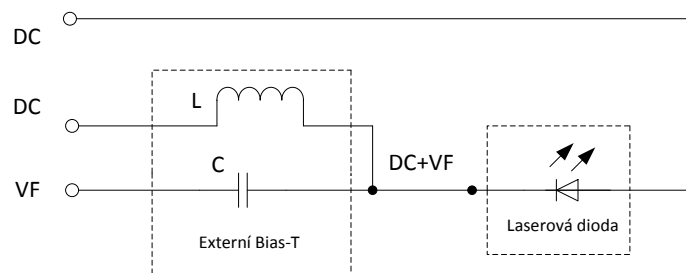
Bývá realizována pomocí externího elektrooptického modulátoru, který pracuje na principu elektrooptického jevu, čímž ovlivňuje fázi paprsku šířícího se v substrátu elektrooptického materiálu. Používá se Mach-Zenderův modulátor (Obr. 2.20), který rozdělí světelný svazek do dvou ramen. Na základě elektrooptického jevu dochází se změnou přiloženého napětí ke změně indexu lomu v obou ramenech a tedy i k fázovému posuvu. Na výstupu dojde k fázovému sečtení obou paprsků, tedy ke konstruktivní nebo destruktivní interferenci. Tímto modulátorem lze realizovat jak fázovou tak amplitudovou modulaci a to do vysokých kmitočtů [8].



Obr. 2.20: Externí Mach-Zenderův modulátor

Intenzitní modulaci lze použít i pro nekoherentní optické záření a je dnes nejrozšířenějším typem modulace. Výkon zdroje záření se mění přímo úměrně velikosti modulačního signálu. Modulační signál může v případě laserových diod dosahovat frekvence až jednotek GHz, u LED obvykle nízkých stovek MHz. Může být použita i u mnohovídrových vláken.

Pro superpozici modulačního signálu lze použít vazební a napájecí článek typu T. V anglicky psané literatuře se pro něj běžně používá výraz Bias-T a je znázorněn na Obr. 2.21. Článek Bias-T je tvořen: větví pro přivedení DC napájení, kde je umístěna cívka L , která bývá často doplněna paralelní kombinací blokovacích kondenzátorů, dále větví pro přivedení VF modulačního signálu, ve které je kondenzátor C a třetí větví, která je připojena k laserové diodě. Kondenzátor ve vysokofrekvenční větvi propustí modulační signál, ale blokuje napájecí DC složku, naopak cívka v DC větvi propustí napájecí DC signál, ale představuje vysokou impedanci pro vysokofrekvenční modulační signál. Při návrhu struktury Bias-T je třeba počítat s parazitními vlastnostmi použitých prvků. Někdy bývá tato struktura umístěna přímo v modulu vysílače.



Obr. 2.21: Schematické znázornění Bias-T

2.3 Optický přijímač

Poslední důležitou částí optického řetězce je optický přijímač. Klíčovou částí přijímače je fotodetektor, který má za úkol přeměnit energii dopadajících fotonů na elektrickou energii, nejčastěji na elektrický proud. Fotodetektory jsou založeny na vnitřním nebo vnějším fotoelektrickém jevu, při němž dochází k uvolňování elektronů z materiálů, v důsledku dopadu elektromagnetického záření na tento materiál.

V této kapitole budou popsány tři nejpoužívanější fotodetektory a to sice fotodiody, fotodiody PIN a lavinová fotodiody APD. Hlavní požadavky kladené na fotodetektory jsou:

- Velká citlivost v oblasti pracovních vlnových délek
- Krátká doba odezvy
- Minimální šum generovaný fotodetektorem
- Nízká kapacita přechodu (nízké závěrné napětí)
- Vysoká spolehlivost, dlouhá životnost a nízká cena

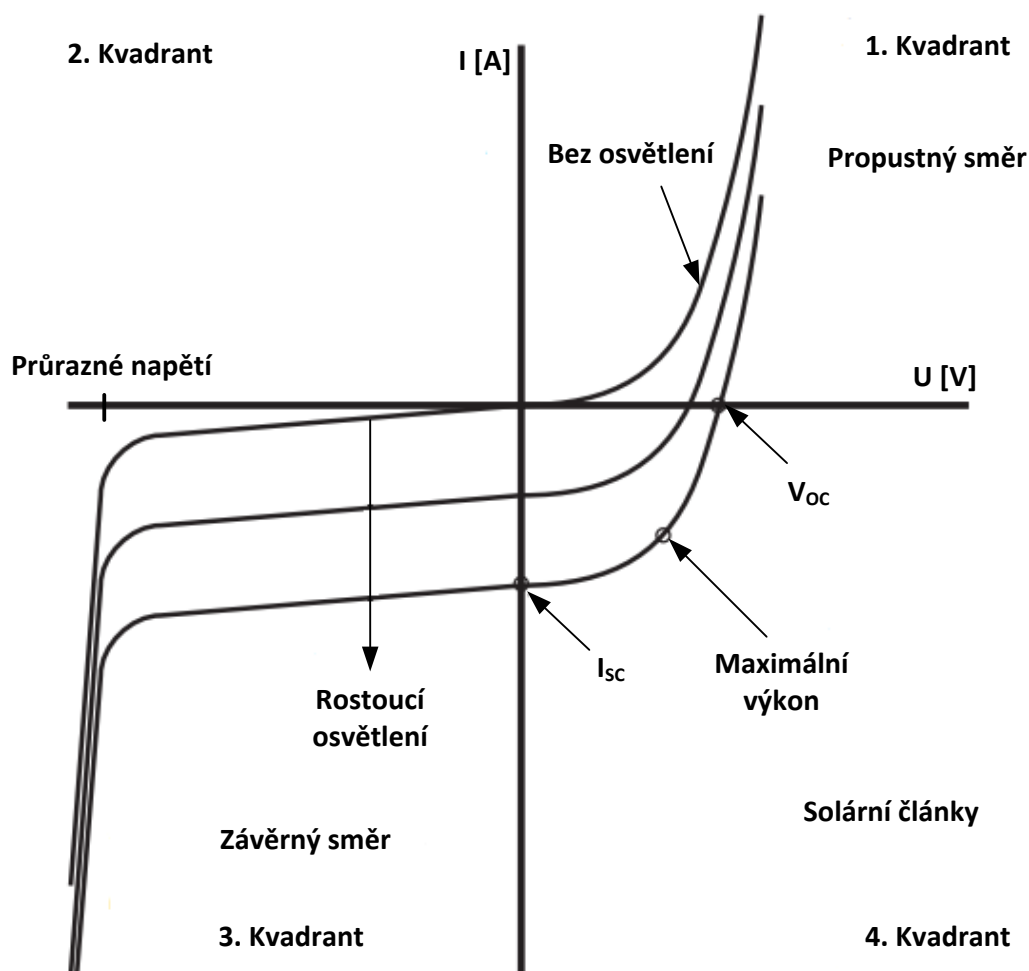
2.3.1 Fotodiody

Fotodiody využívá ke své činnosti vnitřní fotoelektrický jev a je tvořena přechodem PN, který je konstrukčně upravený tak, aby na něj mohlo dopadat světlo. Po vytvoření PN přechodu, dojde v místě styků obou polovodičů k rekombinaci elektronů z polovodiče typu N a děr z polovodiče typu P. Důsledkem je vznik vyprázdněné oblasti, kde se nenachází žádné volné nosiče náboje. Dopadne-li foton s energií větší než šířka zakázaného pásu polovodiče na vyprázdněnou oblast, dojde vlivem fotoelektrického jevu k odtržení elektronu (díry), elektrony jsou urychlovány ke kladnému prostorovému náboji v N oblasti a díry se pohybují směrem k zápornému prostorovému náboji v P oblasti. Pokud připojíme fotodiodu do obvodu, proud bude protékat směrem z části P (anody) do části N (katody). [5]

Chování fotodiody ukazuje její volt-ampérová charakteristika znázorněná na Obr. 2.22. Jak je patrné, chování fotodiody je závislé jak na intenzitě osvětlení, tak na přiloženém závěrném napětí. Křivka označená jako „Bez osvětlení“ ukazuje chování fotodiody při nulovém osvětlení. V tomto případě se fotodiody chová jako klasická usměrňovací dioda. Se zvyšující se intenzitou osvětlení se celá křivka posouvá dolů. Při

nulovém přiloženém napětí protéká diodou tzv. zkratový proud I_{SC} , který teče diodou při zkratovaných vývodech. Na vývodech diody, kterou neteče žádný proud, lze naměřit napětí, jež je znázorněné v grafu jako V_{OC} .

Pro detekci dopadajících fotonů se fotodioda provozuje ve 3. kvadrantu, kde je dioda zapojena v závěrném směru a dochází téměř k lineárnímu nárůstu procházejícího proudu při zvyšování dopadajícího světelného záření. V tomto kvadrantu se fotodioda chová jako odpor závislý na osvětlení (odporový režim). Fotodiodu lze používat i ve 4. kvadrantu, kde se chová jako zdroj elektrické energie a bývá využívána v solárních článcích. Na volt-ampérové charakteristice je znázorněn pracovní bod, kdy lze dosáhnout maximálního výkonu.

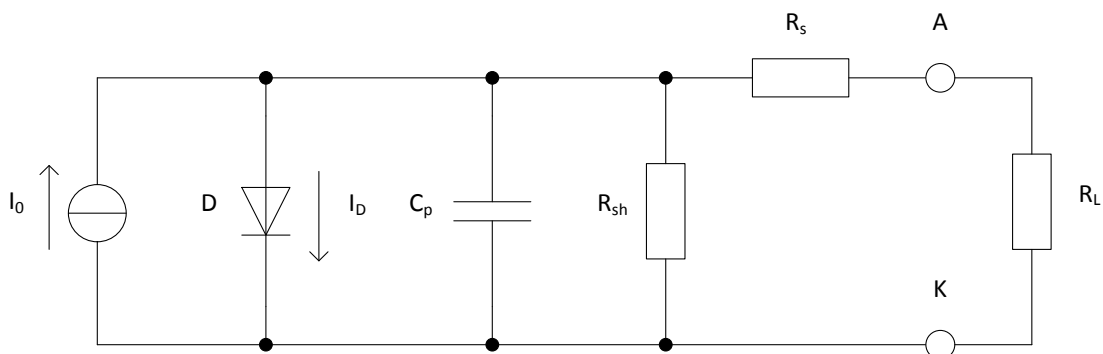


Obr. 2.22: Volt-ampérová charakteristika fotodiody

Náhradní schéma fotodiody

Fotodiodu lze modelovat náhradním schématem naznačeným na Obr. 2.23. Náhradní schéma obsahuje ideální zdroj proudu, samotnou fotodiodu, kapacitu P-N přechodu C_p , dále svodový odpor přechodu R_{sh} a sériový odpor R_s . Nejdůležitějším parametrem pro dynamické vlastnosti fotodiody je kapacita přechodu C_p , která klesá se zvyšujícím se

závěrným napětím a dosahuje řádově zlomků jednotek až stovek pF. Od určité frekvence nemůže fotodioda přenášet signál, jelikož doba potřebná k nabití kapacity C_p , je delší než půlperioda přenášeného signálu. Svodový odpor přechodu má za následek, že diodou teče proud, i když na ní nedopadá světlo, tento proud bývá označován jako tzv. dark current, bývá v řádu desítek nebo stovek pA.



Obr. 2.23: Náhradní schéma fotodiody

2.3.2 PIN dioda

PIN dioda obsahuje oproti klasickému P-N přechodu, intrinzičnou vrstvu I s vlastní vodivostí, která je vložena mezi vrstvy P a N a je slabě dotována. Přidáním této vrstvy dojde k rozšíření vyprázdněné oblasti a tím se zvýší pravděpodobnost dopadu fotonu do vyprázdněné oblasti a také se zvýší elektrická intenzita ve vyprázdněné oblasti, čímž jsou elektrony více urychlovány. PIN dioda generuje výrazně vyšší proud než fotodioda a má i výrazně nižší parazitní kapacitu. Dále se PIN diody vyznačují rychlou odezvou a kvantová účinnost bývá okolo 60-70 %. Pro tyto svoje výhodné vlastnosti bývá velmi často využívána.

2.3.3 Lavinová dioda

Lavinové diody jsou založeny na principu multiplikace volných nosičů náboje na základě ionizace v silném elektrickém poli, jinak řečeno nosiče náboje, které jsou uvolněny při dopadu fotonu, mají energii dostatečnou k uvolnění dalších nosičů náboje a ty k uvolnění další atd. Koeficient násobení bývá od desítek až do několika set [2].

Lavinové diody jsou používány z důvodů vyšší dosažitelné citlivosti v porovnání s PIN diodami. Nevýhodou je komplikovanější výroba, vyšší cena a proces multiplikace zvyšuje úroveň šumu i velikost přiloženého napětí.

Citlivost a kvantová účinnost

Pro praktické použití je nejdůležitější, jak velký bude vygenerovaný proud I_0 fotodiodou za jednotku dopadajícího optického výkonu (P_r). Tento poměr nám určuje veličina nazývaná citlivost r , jež je udávána v jednotkách A/W a je definována jako:

$$r = \frac{I_0}{P_r}. \quad (2.11)$$

V ideálním případě každý dopadající foton s energií větší než šířka zakázaného pásu fotodiody vygeneruje jeden pár elektron dír. Pro tento ideální případ je citlivost:

$$r_{ideal}(\lambda) = \frac{I_0}{P_r} = \frac{q \cdot \lambda}{h \cdot c}, \quad (2.12)$$

kde λ je vlnová délka dopadajícího záření v metrech,

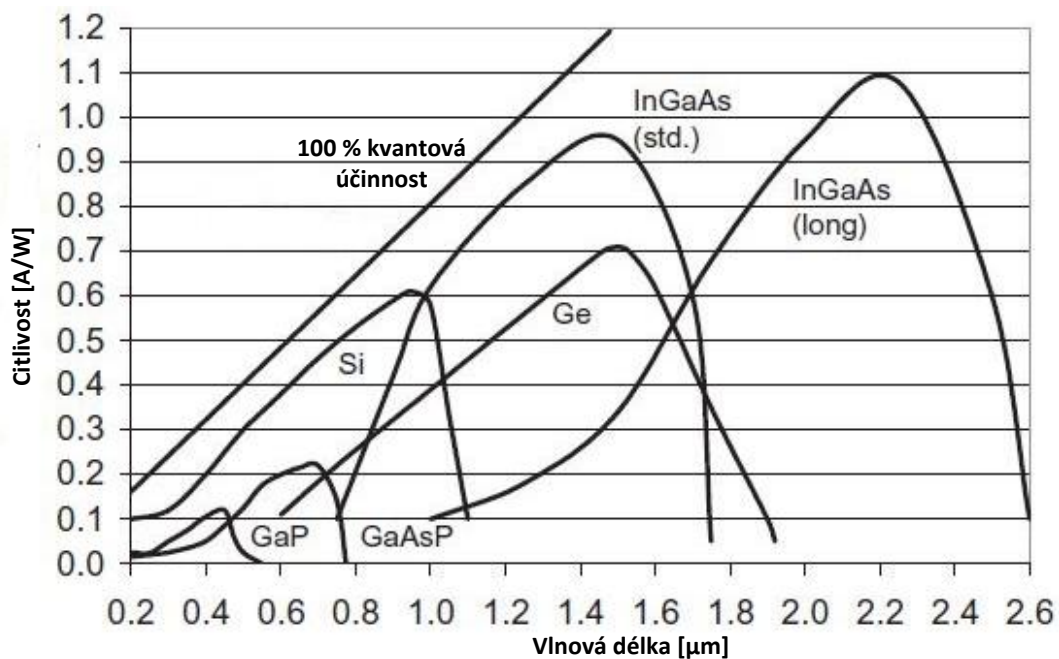
$q = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C je náboj elektronu,

$h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Js je Planckova konstanta,

$c = 2,998 \cdot 10^8$ m/s je rychlost světla ve vakuu.

Ve skutečnosti ovšem dochází ke generaci páru elektronu díru méně často a generovaný proud se vždy pouze blíží ideálnímu. Poměr reálné a teoretické citlivosti se nazývá *kvantová účinnost*:

$$\eta = \frac{r_{real}(\lambda)}{r_{ideal}(\lambda)}. \quad (2.13)$$



Obr. 2.24: Graf citlivosti v závislosti na vlnové délce nejpoužívanějších materiálů, převzato z [5]

Šumy v optickém přijímači

Existují dva dominantní typy šumů vyskytující se v každém optickém přijímači a to sice výstřelový a tepelný šum. Výstřelový šum vzniká ve fotodiodě a je způsobený tím, že ne každý dopadající foton způsobí uvolnění elektronu. Je to vlastně kolísání proudu okolo určité střední hodnoty. Spektrální hustota proudu výstřelového šumu v jednotkách A^2/Hz resp. $A/\sqrt{Hz}$ je dána vztahem:

$$i_{ns}^2 = 2 \cdot q \cdot I_p \quad \rightarrow \quad i_{ns} = \sqrt{2 \cdot q \cdot I_p}, \quad (2.14)$$

kde q je náboj elektronu a I_p je střední hodnota proudu.

Tepelný šum vzniká na každém rezistoru, který může být součástí přijímače, při teplotách vyšších než je absolutní nula. Je způsoben vnitřními změnami napětí a proudu uvnitř rezistoru. Spektrální hustota v jednotkách $A/\sqrt{Hz}$ je definována:

$$i_{nt} = \sqrt{4 \cdot k \cdot T / R}, \quad (2.15)$$

kde $k=1,381 \cdot 10^{-23}$ J/K je Boltzmanova konstanta, T je teplota v Kelvinech a R je hodnota odporu v Ω .

Z rovnice (2.14) je patrné, že výstřelová šumová složka fotoproudu má kladnou závislost právě na velikosti vlastního fotoproudu. Detekce světla s vyšší intenzitou pak povede k větší hodnotě přítomného výstřelového šumového proudu.

Příspěvek tepelného šumu při dané velikosti fotoproudu pak závisí na řešení optického přijímače, konkrétněji na velikosti rezistoru, kterým fotoproud protéká a na kterém vytváří detekovatelné napětí. Při zvyšování hodnoty odporu převodního rezistoru dochází dle rovnice (2.15) k žádoucímu poklesu jeho proudového šumu. Dochází tím ale také ke snižování horního mezního kmitočtu optického přijímače. Převodní rezistor tvoří s kapacitou fotodiody RC kombinaci, jejíž časová konstanta roste s hodnotou odporu. S nárůstem časové konstanty pak klesá horní mezní kmitočet optického přijímače.

Vhodná volba velikosti tohoto rezistoru pak umožňuje zkonstruovat přijímač, jehož šumové vlastnosti jsou limitovány fundamentálním výstřelovým šumem a zároveň dosahuje maximálního horního mezního kmitočtu[5].

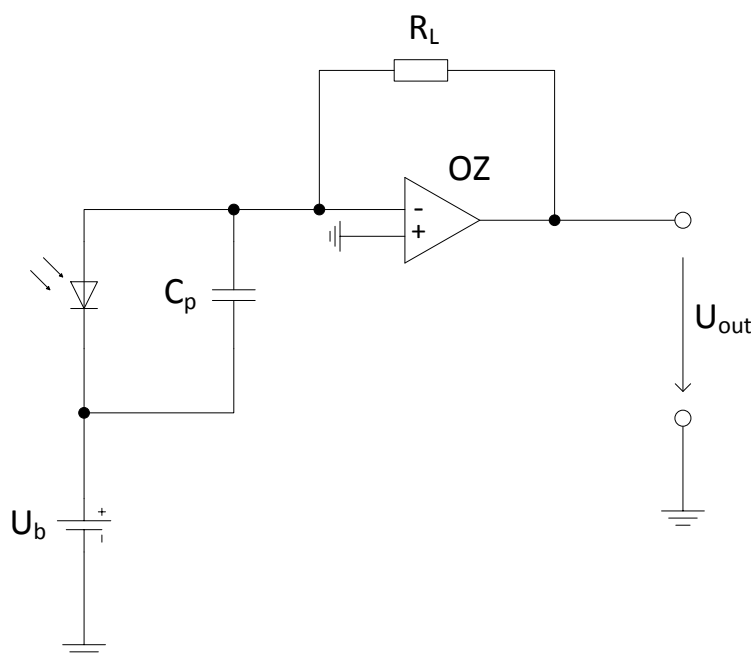
Zpracování přijatého signálu v optickém přijímači

Chování fotodiody lze přirovnat k proudovému zdroji s vysokou výstupní impedancí. Většinou je výhodnější převést proudový výstup na napěťový, nejlépe s velkou šířkou pásma, citlivostí, linearitou a nízkým šumem, který lze snímat osciloskopem či voltmetrem. K tomu lze s výhodou využít tzv. transimpedanční zesilovač, který je znázorněn na Obr. 2.25. Hlavní výhodou transimpedančního zesilovače je, že omezuje vliv parazitní kapacity snížením časové derivace napětí na kapacitě. Z pohledu střídavého signálu jsou póly fotodiody připojeny mezi vstupy operačního zesilovače. Neinvertující vstup je uzemněn. Kvůli zpětné vazbě je potenciál vstupu invertujícího udržován na hodnotě velmi blízké zemnímu potenciálu

neinvertujícího vstupu. Díky tomuto zapojení je amplituda střídavého napětí na fotodiodě a tím i na její vnitřní kapacitě minimalizována. Je tak minimalizován i kapacitní proud na vyšších kmitočtech a nedochází tak k rychlému poklesu citlivosti převodu fotoproudu na napětí.

Hlavní částí transimpedančního zapojení je operační zesilovač, který má ve zpětné vazbě zapojen rezistor R_L a neinvertující vstup je uzemněn. Zavedením záporné zpětné vazby se snaží OZ dostat na oba vstupy stejné napětí, čímž se na invertující vstupu vytvoří téměř nulové napětí. Vstupní impedance vhodně zvoleného operačního zesilovače je velmi vysoká a tak téměř celý fotoproud teče přes zpětnovazební rezistor, na kterém vyvolá úbytek napětí, které je pak přítomno i na výstupu celého obvodu.

Důvodem přiložení závěrného napětí U_b na fotodiodu je nastavení fotodiody do 3. kvadrantu, kde je odezva na optickou intenzitu vysoce lineární a dále snížení parazitní kapacity C_p , tedy další zlepšení dynamických vlastností [5].



Obr. 2.25: Schéma transimpedančního zesilovače

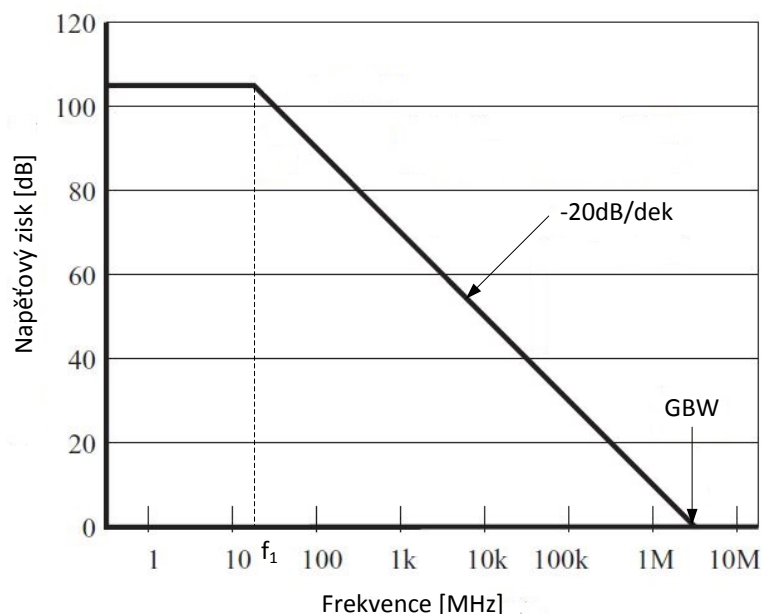
Mezní frekvenci tohoto zapojení lze určit ze vztahu:

$$f_m = \frac{A_m}{2 \cdot \pi \cdot R_L \cdot C_p}, \quad (2.16)$$

kde A_m je zesílení operačního zesilovače (OZ) s otevřenou smyčkou zpětné vazby. Běžné OZ mají zesílení konstantní do hodnot desítek Hz. Dále zesílení klesá se strmostí 20 dB/dek až protne nulu, tento bod se označuje GBW („Gain bandwidth product“), průběh zesílení je znázorněn na Obr. 2.26. Výsledný mezní kmitočet transimpedančního zesilovače je dán jako odmocnina ze součinu GBW a mezního kmitočtu článku $R_L C_p$. Úpravou vztahu (2.16) pak můžeme mezní kmitočet určit jako:

$$f_m = \sqrt{\frac{GBW}{2 \cdot \pi \cdot R_L \cdot C_p}} \quad (2.17)$$

Hodnota GBW je běžně udávána výrobcí OZ v jejich datových listech.



Obr. 2.26: Frekvenční závislost napěťového zisku OZ

3 SROVNÁNÍ KOMERČNÍCH ŘEŠENÍ

Na trhu je dostupných řada optických linek s možností přenosu jak analogového tak digitálního signálu na různé vzdálenosti. V této kapitole bude uvedeno srovnání několika komerčních řešení.

Point2point –AC Coupled Fiber Optic Link

Optická linka od firmy PPM test je vyráběna v několika verzích a je určena pro EMC měření nebo pro mikrovlnné měření. Je vybavena SMA konektorem pro vstupní signál. Signál je přenášén po jednovláknovém optickém vlákne s délkou v rozmezí 1 m až 4 km. Výrobce udává parametry:

- Šířka pásma: 10 MHz až 3 GHz
- Minimální detekovatelný výkon: -155 dBm/Hz
- Zpoždění: 10 ns
- Vstupní a výstupní impedance: 50 Ω



Obr. 3.1: Optická linka point2point AC coupled Fiber Optic Link (převzato z <http://ppmtest.com/wp-content/uploads/point2point-AC-Link-Datasheet-PAX-DS-7.pdf>)

LTX-5515 “Signal transporter”

Optická linka vyráběná firmou Terahertz Technologies určená pro přenos analogového i digitálního signálu. Signál lze přenášet optickým vláknem na vzdálenost od jednotek metrů až na více než 10 km. Elektrický signál se převádí na digitální pomocí 12-bitového A/D převodníku. Tento převodník lze použít např. k přenosu video signálu nebo v EMC technice. Zjištěné parametry:

- Šířka pásma: 0 – 25 MHz
- Vlnová délka: 850 nebo 1310 nm
- Zpoždění signálu: okolo 300 ns/m optického vlákna
- Vstupní napěťový rozsah: ± 1 V nebo ± 5 V
- Vstupní impedance: 50 Ω nebo 1 M Ω paralelně s 20 pF
- Výstupní impedance: 50 Ω
- Napěťový offset: 20 mV
- Cena: okolo 40 000 Kč (vysílač + přijímač)



Obr. 3.2: Optická linka LTX-5515 (převzato z <http://www.teratec.us/products/75/LTX5515--Analog/Digital,-DC-to-25-MHz-Fiber-Optic-Links/>)

MITEQ-SLL-5K2P5G

Optické linky od firmy MITEQ se vyrábí v rozsahu 5 kHz až 18 GHz, pro ukázkou byl vybrán typ MITEQ-SLL-5K2P5G. Obsahuje nechlazený DFB laser, transimpedanční zesilovač v přijímači i vysílači a monitorovací piny. Typickými aplikacemi je přenos signálu ze vzdálených antén a komunikační přenosy. Udávané parametry:

- Šířka pásma: 5 kHz až 2,5 GHz
- Maximální vstupní a výstupní výkon: 10 dBm
- Vstupní/výstupní impedance: 50 Ω
- Vlnová délka: 1550 nm
- Poměr stojatých vln VSWR na vstupu i výstupu: 2:1
- Cena: přibližně 70 000 Kč za pár vysílač + přijímač

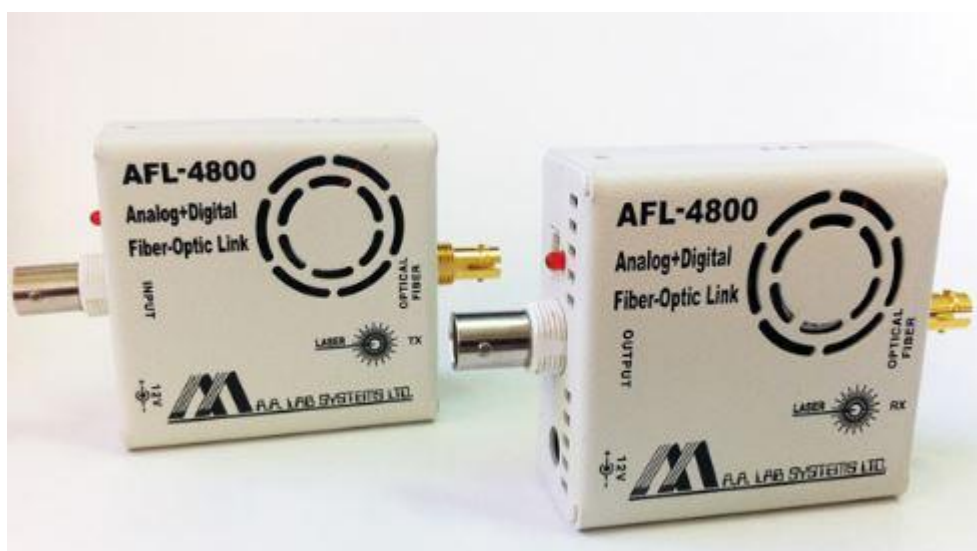


Obr. 3.3: Optická linka MITEQ-SLL-5K2P5G (převzato z <https://www.miteq.com/docs/MITEQ-SLL-5K2P5G.PDF>)

AFL-4800 High Speed Analog/digital fiber optic link

Optická linka AFL-4800 od firmy A. A. LAB SYSTEMS je založena A/D a D/A převodu. Je navržena pro přenos signálů ze silně zarušených prostředí a pro přenosy s vysokým poměrem SNR. Vyrábí se s mnohovlákenným vláknem s maximální délkou 5 km, tak s jednovlákenným vláknem s dosahem až 50 km. Parametry udávané výrobcem:

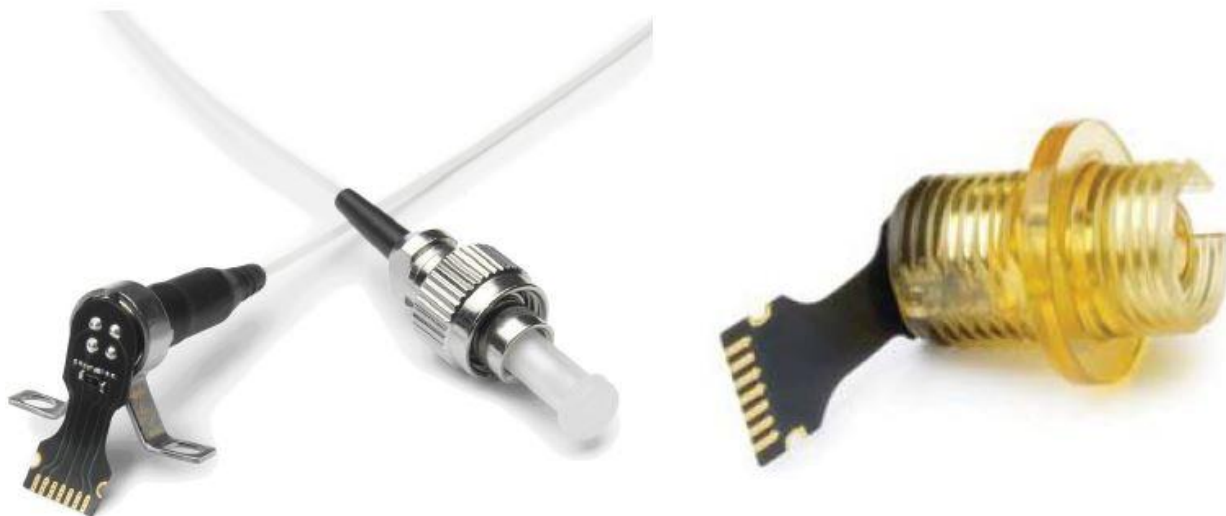
- Šířka pásma: DC až 25 MHz
- Vstupní napěťový rozsah: -5 V až 5 V
- Vstupní impedance: 50 Ω nebo 1 k Ω
- SNR: 75 dB
- 1 analogový vstup a 2 digitální
- Linearita: lepší než 0,01 %



Obr. 3.4: Optická linka AFL-4800 High Speed Analog/Digital (převzato z <http://www.lab-systems.com/products/fib-opt/afl4800/index.html>)

4 VÝBĚR ŘEŠENÍ

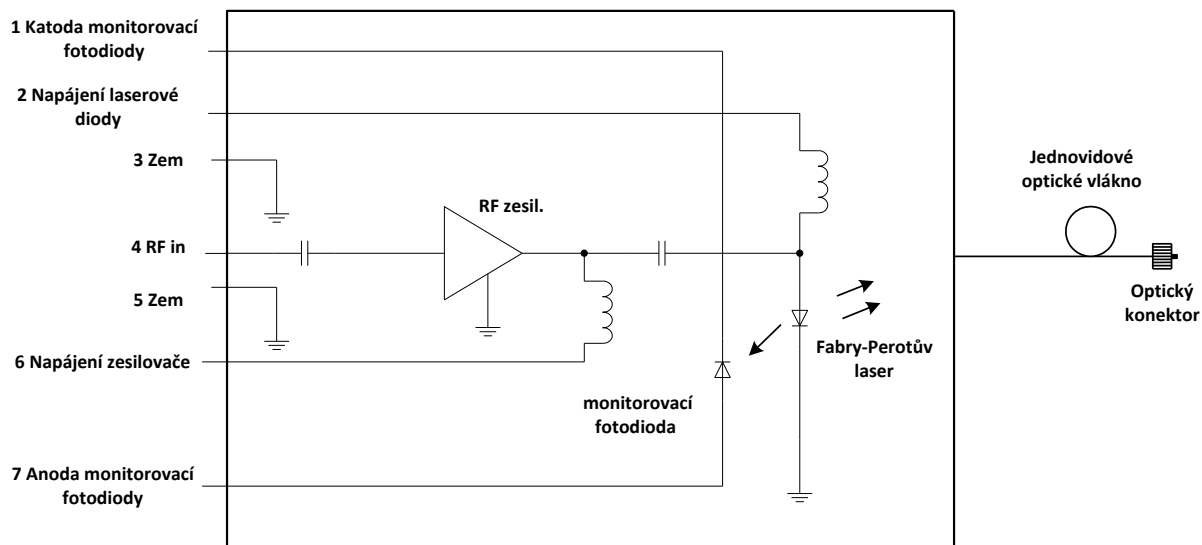
Jako nejvhodnější řešení byla zvolena optická linka od firmy Avago Technologies, která je tvořena vysílacím modulem AFBR-1310Z s polovodičovým laserem a Fabry-Perotovým rezonátorem a přijímacím modulem AFBR-2310Z, který obsahuje PIN fotodiodu. Oba moduly jsou znázorněny na Obr. 4.1. Tento typ je ideálním kompromisem mezi kompletním návrhem linky a finančně velmi náročným komerčním řešením. Výrobce udává šířku pásma od 200 MHz 5,5 GHz, což s rezervou vyhovuje zadaným požadavkům.



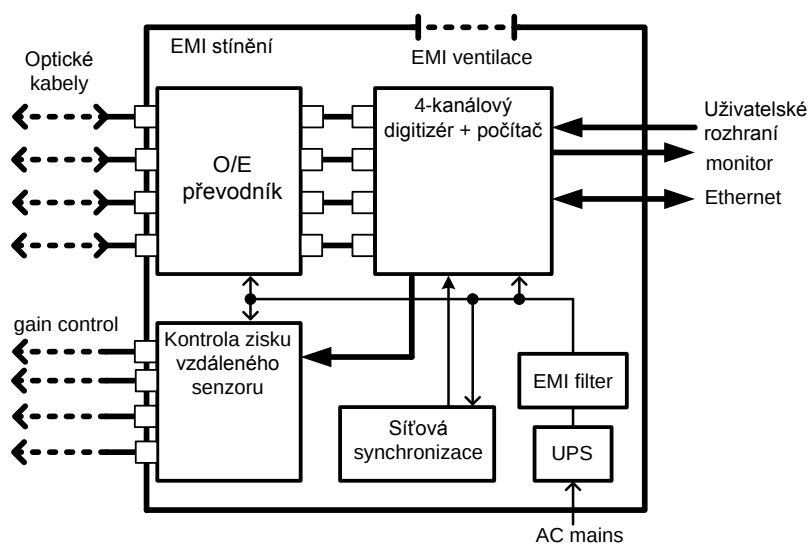
Obr. 4.1: Moduly optické linky od firmy Avago Technologies (vlevo vysílač a vpravo přijímač)

Schematické zapojení vysílací modulu je znázorněno na Obr. 4.2. Hlavní částí modulu je polovodičový laser s Fabry-perotovými rezonátory pracující na vlnové délce 1310 nm, který je navázán na jednovláknové optické vlákno. Další důležitou částí je monitorovací fotodioda, na kterou dopadá část výkonu z laseru a pomocí zpětné vazby lze řídit budicí proud laseru a jejíž elektrody jsou vyvedeny pro připojení k řídicímu obvodu. Pro oddělení vysokofrekvenčního signálu a napájení je použit člen Bias-T, jenž je popsán v teoretické části. Jak je vidět na Obr. 4.1 připojení modulu k externím obvodům je řešeno pomocí flexibilní desky plošného spoje. Výrobce udává tyto parametry modulu:

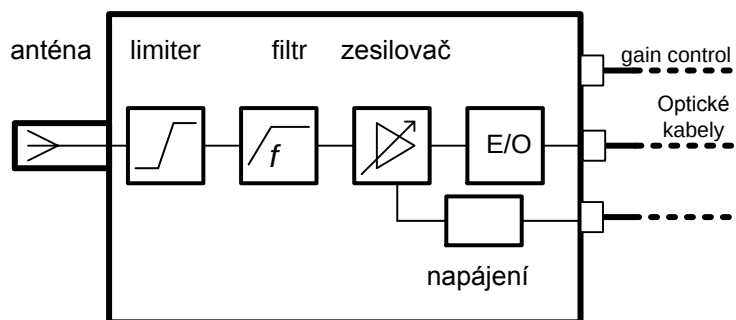
- Výstupní výkon $P_o=5$ mW při pracovním proudu $I_{op}=60$ mA
- Prahový proud $I_p=15$ mA
- Šířka spektrální čáry: 3 nm
- Monitorovací fotoproud: 0,4 až 2,5 mA
- Vstupní impedanci: 50Ω
- Úroveň bodu zahrazení produkty 3. Řádu (IP3): 8 dBm
- Frekvenční rozsah: 200 MHz až 5,5 GHz
- Napájecí napětí RF zesilovače: 5 V (± 5 %)



Obr. 4.2: Schéma vysílacího modulu



Obr. 4.3: Inovované schéma řídicí jednotky



Obr. 4.4: Inovované schéma senzoru

Vzhledem k tomu, že je plánováno implementovat optickou linku ve stávajícím řešení systému MOSAD[®]-PD-UHF (umístění optické linky v systému je na Obr 4.3 a 4.4) je třeba stanovit odhad výkonových úrovní, které se mohou objevit na vstupu vysílacího modulu. Proto je nutné spočítat výkonovou bilanci stávající obvodové kaskády v senzoru a započítat příspěvky zisků a útlumů všech bloků předcházejících optickému vysílači.

Výkonová úroveň na výstupu antény byla určena přibližně na -40 dBm, když byl přijímán signál odpovídající svým průběhem a intenzitou signálu částečného výboje. Přítomen je blok s nastavitelným útlumem v rozsahu (3 až 40 dB), další částí je blok zesilovačů s celkovým ziskem 42 dB. Je třeba započítat i útlumy spojů, omezovače úrovně signálu a vložný útlum filtru což dává přibližně 1 dB. Celkově tedy vychází vstupní výkon

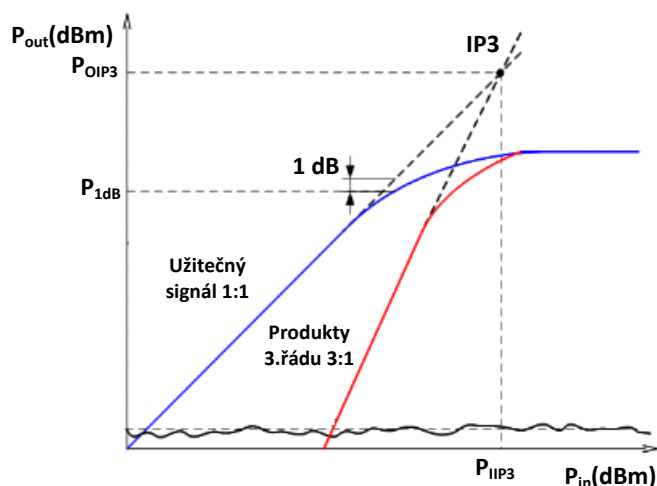
$$P_{in} \approx -40dBm - (3 \text{ až } 40dB) + 42dB - 1dB \approx -2 \text{ až } -39dBm. \quad (4.1)$$

Výrobce bohužel neuvádí přímo maximální vstupní přípustnou výkonovou úroveň na vstupu optického modulu, ale udává výkonovou úroveň bodu zahrazení produkty třetího řádu (IP3). Z něj lze pomocí vzorce (4.2) přibližně určit bod jednodéciblové komprese, kdy se reálná přenosová charakteristika odchyluje od ideální lineární charakteristiky o 1 dB [7]. Oba tyto body jsou znázorněny na Obr. 4.5. Bod jednodéciblové je tedy přibližně

$$P_{1dB} \approx IP3 - 9,6dB \approx -1,6dB, \quad (4.2)$$

z čehož vyplývá, že vstupní výkon by měl být menší než -1,6 dBm, což je podle rovnice 4.1 splněno. Ovšem tyto výpočty jsou spíše orientační a nelze s jistotou říci, zda bude zesilovač pracovat v lineární oblasti přenosové charakteristiky. Tuto skutečnost

bude třeba ověřit reálným měřením.

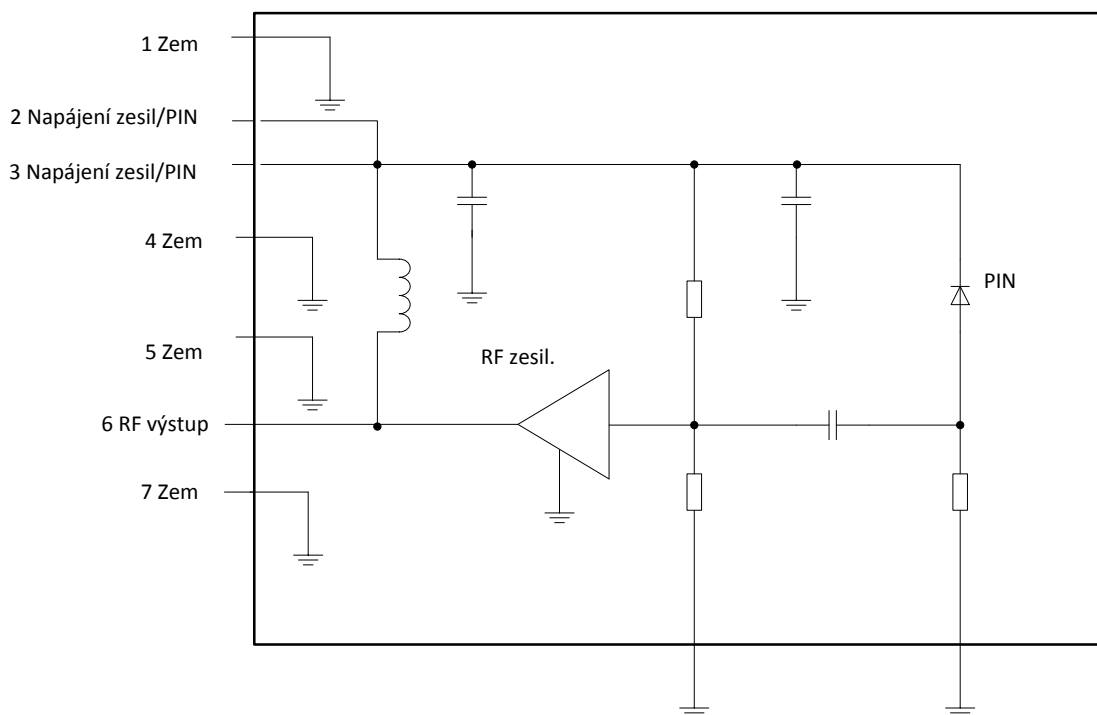


Obr. 4.5: Bod jednodéciblové komprese a bod zahrazení produkty třetího řádu IP3

Přijímací modul je znázorněný na Obr. 4.6. Hlavní částí je fotodetektor tvořený PIN diodou, optimalizovaný pro vlnovou délku 1310 nm. Stejně jako ve vysílači je

k připojení vnějších obvodů použita flexibilní deska plošných spojů obsahující 7 pinů. Výrobce udává tyto parametry:

- Výstupní impedanci: 50 Ω
- Frekvenční rozsah: 200 MHz až 5,5 GHz
- Vstupní optický výkon: 2 dBm (max. 7 dBm)
- Napájecí napětí RF zesilovače: 3,3 V ($\pm 5\%$)



Obr. 4.6: Schéma přijímacího modulu

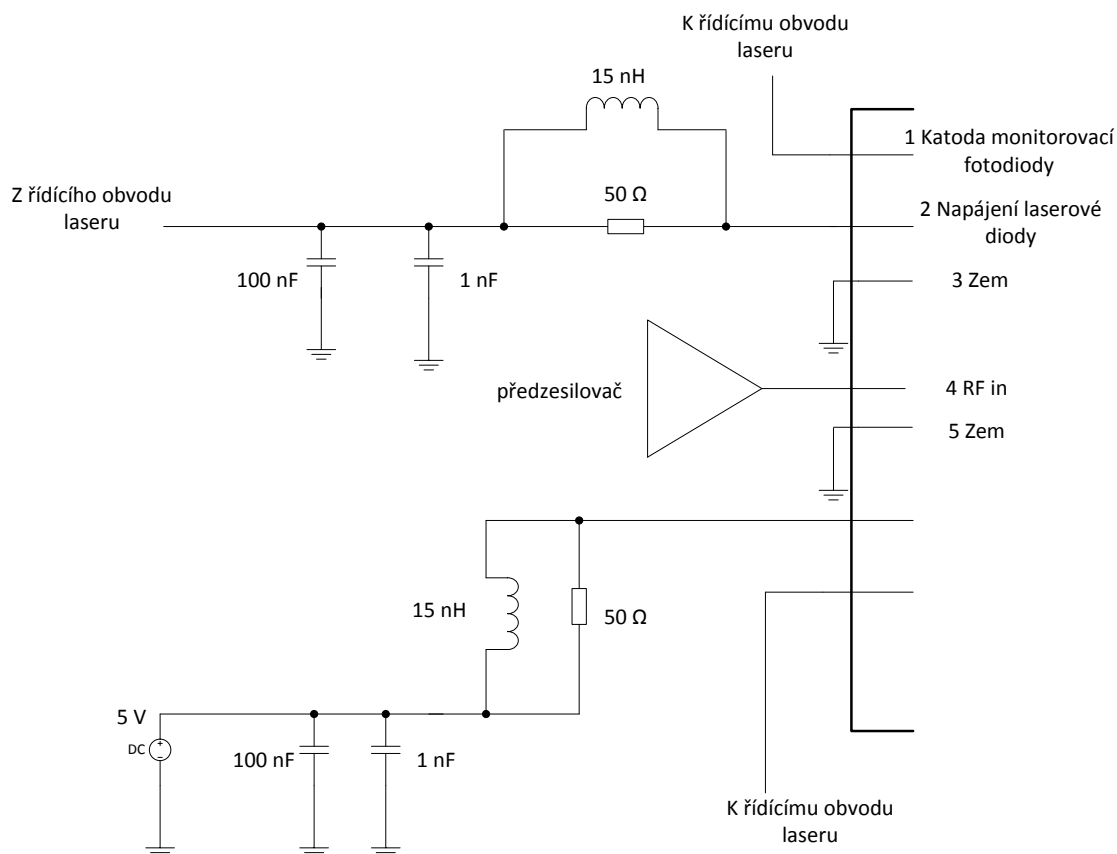
4.1 Napájení vysílače

Doporučené napájecí schéma pro vysílací modul AFBR-1310Z je znázorněno na Obr. 4.7. Zesilovač umístěný uvnitř modulu využívá napájecí napětí 5 V, které je blokováno dvojicí blokovacích kondenzátorů 1 nF a 100 nF a dále cívkou 15 nH pro potlačení vysokofrekvenčních složek v paralelní kombinaci s odporem 50 Ω . Stejná struktura napájecí větve je doporučena i pro přivedení řídicího signálu laseru. Napájecí napětí +5 V je realizováno pomocí lineárního stabilizátoru LM 317 (Obr. 4.8). Ten je doplněn dvojicí blokovacích kondenzátorů $C_1=0,1\mu\text{F}$ a $C_2=1\mu\text{F}$ a výstupní napětí je nastaveno pomocí dvojice rezistorů R_1 a R_2 podle rovnice

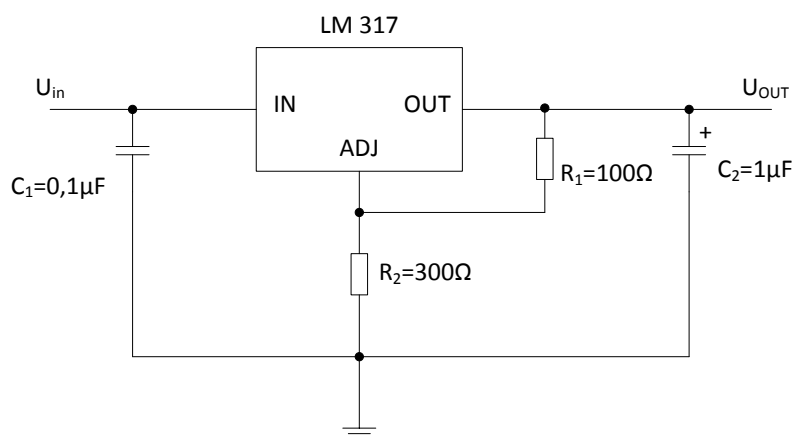
$$U_{OUT} = 1,25 * \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right). \quad (4.3)$$

Hodnota rezistoru R_1 byla zvolena 100 Ω a byla dopočítána velikost rezistoru

$R_2=300\ \Omega$. Výrobce garantuje přesnost výstupního napětí stabilizátoru 1%, což splňuje požadavek uvedený v dokumentaci vysílacího modulu. Bylo vybráno standardizované pouzdro D2PACK, pro které je udáván výstupní proud 1A, což vyhovuje. Stabilizátor obsahuje několik interních ochranných obvodů jako např. ochranu proti nadproudu a ochranu proti přehřátí.



Obr. 4.7: Napájení pro vysílací modul



Obr. 4.8: Schéma zapojení lineárního stabilizátoru LM 317

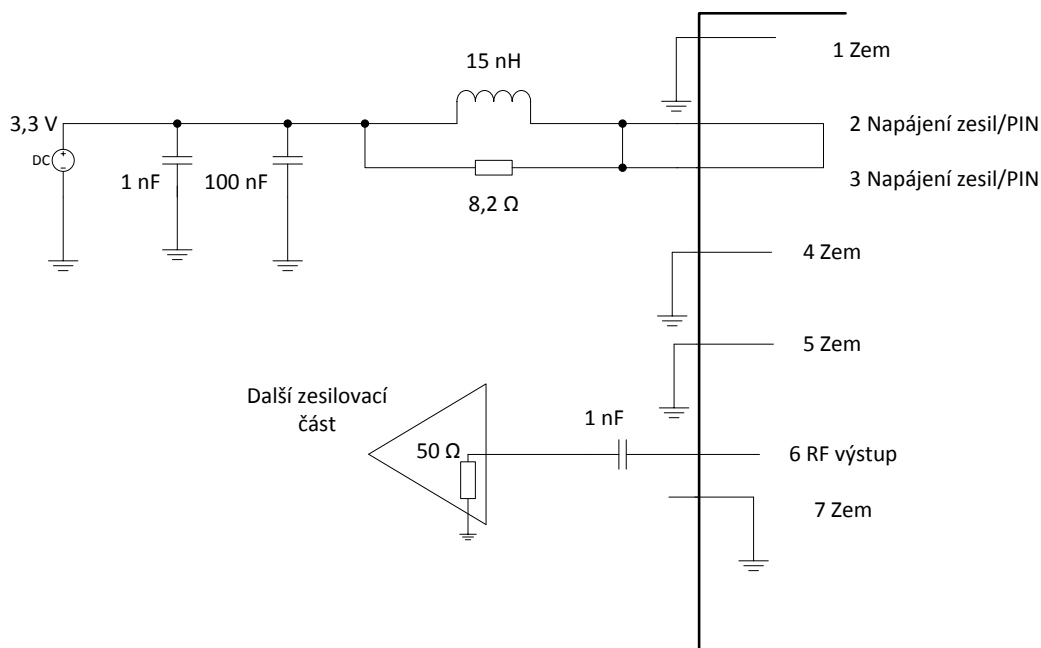
U vysílacího modulu, který obsahuje polovodičový laser s Fabry-Perotovým rezonátorem, je třeba se zabývat otázkou chlazení. Výrobce udává ve specifikaci, že není třeba chlazení pro široký rozsah pracovních teplot. Příkony vnitřního zesilovače a laserové diody jsou

$$\begin{aligned} P_Z &= U_Z \cdot I_Z = 5 \cdot 0,065 = 0,325 \text{ W} \\ P_L &= U_L \cdot I_L = 2 \cdot 0,06 = 0,132 \text{ W} \end{aligned} \quad (4.2)$$

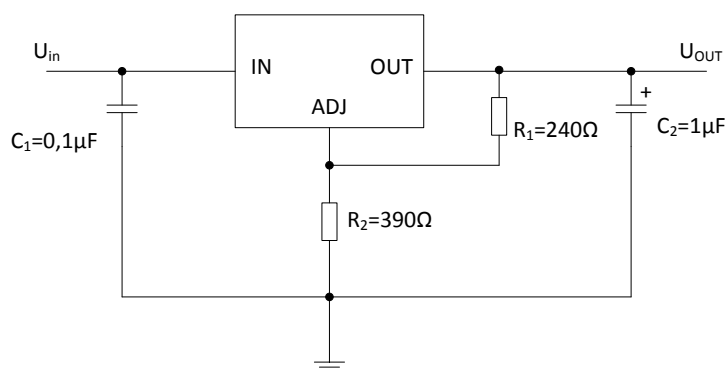
kde U_Z je napájecí napětí zesilovače, I_Z je proud odebíraný zesilovačem, U_L napětí na laserové diodě a I_L proud laserovou diodou. Tímto výpočtem byly stanoveny přibližné celkové tepelné ztráty 0,457 W a takovýto tepelný výkon už by měl být odveden pasivním chladičem.

4.2 Napájení přijímače

Výrobce doporučuje napájecí schéma pro přijímací modul AFBR-2310Z je znázorněno na Obr. 4.9. Napájecí napětí pro vnitřní zesilovač je 3,3 V a napájecí větve je opět blokována dvojicí kondenzátorů 1 nF a 100 nF, dále je tvořena paralelní kombinací cívky 15 nH a odporu 8,2 Ω . Dále výrobce doporučuje umístit do větve vedoucí k dalším zesilovačům kondenzátor 1 nF pro oddělení stejnosměrné složky. Napájecí napětí +3,3 V je také stejně jako u vysílače realizováno pomocí lineárního stabilizátoru LM317 v pouzdře D2PACK, který je doplněn dvojicí blokovacích kondenzátorů o velikosti $C_1=0,1\mu\text{F}$ a $C_2=1\mu\text{F}$ (viz Obr. 4.10) připojených co nejbližše stabilizátoru, které slouží k blokování rychlých změn napětí a tím brání rozkmitání regulačních prvků v obvodu. Výstupní napětí je nastaveno opět pomocí dvojice rezistorů $R_1=240\Omega$ a $R_2=390\Omega$.



Obr. 4.9: Napájecí obvod pro přijímací modul



Obr. 4.10: Schéma zapojení lineárního stabilizátoru LM317

4.3 Budič laserové diody

Jak již bylo uvedeno výše, vyzářený optický výkon je silně závislý na protékajícím proudu a okolní teplotě. Při nízkých proudech převažuje spontánní emise a záření není koherentní. Při překročení prahového proudu I_p přejde dioda do laserového režimu a dojde k výraznému zvýšení vyzářovaného výkonu a zúžení spektrální čáry.

Hlavním úkolem budiče laserové diody je tedy udržovat pracovní bod v optimální oblasti a zamezit jak příliš nízkým proudům laserovou diodou, tak přetěžování laserové diody a případnému zničení. Jak je patrné z Obr. 4.2, modul vysílače obsahuje monitorovací fotodiodu, která měří část vyzářovaného optického výkonu a poskytuje zpětnou vazbu řídicímu obvodu, který nastavuje proud laserovou diodou.

Řídicí obvod laserové diody může realizován buď pomocí diskretních součástek anebo speciálního integrovaného obvodu. Pro řadu výhod uvedených výše v příslušné

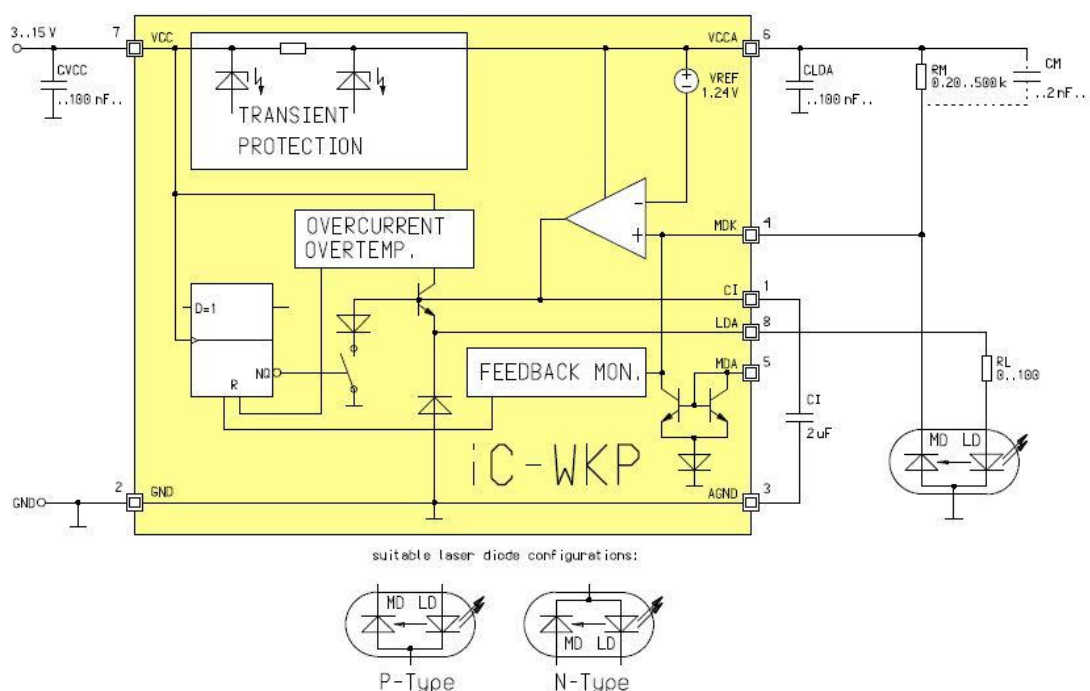
kapitole, byl vybrán integrovaný řídicí obvod od německé firmy iC-Haus, která se specializuje na řídicí obvody pro laserové a LED diody. Při výběru vhodného řídicího obvodu je důležité přihlídnout k maximálnímu proudu, který je schopný obvod dodat laserové diodě, dále k rozmezí monitorovacího proudu fotodiody a v neposlední řadě k typu konfigurace laserové a monitorovací diody. Parametry vysílacího modulu, které musí řídicí obvod splnit, jsou:

- napájecí proud alespoň 60 mA
- rozsah monitorovacího proudu 0,4 až 2,5 mA
- konfigurace laserové a monitorovací může být libovolná, jelikož je monitorovací dioda v modulu plovoucí.

Byl vybrán řídicí obvod (budič) iC-WKP, který je vhodný pro řízení laserových pracujících v kontinuálním režimu, je schopen dodávat laserové diodě proud až 350 mA, rozsah monitorovacího proudu má 2,5 μ A až 6,25 mA a napájecí napětí 3 až 15 V. Zapojení doporučené od výrobce je znázorněno na Obr. 4.11. Řídicí obvod je svojí strukturou optimalizovaný pro P-typ konfigurace laserové a monitorovací diody, kde může být katoda laserové a anoda monitorovací diody připojena na zem, což je velmi vhodné pro vysílací modul AFBR-1310Z. Dále obvod obsahuje ochrany proti ESD, proti vysoké teplotě a nadproudu a dále obsahuje tzv. pomalý start, kdy je chráněna laserová dioda při zapnutí napájení. Monitorovací proud slouží jako reference a je regulován nezávisle na teplotě a napájecím napětím. Obvod udržuje mezi piny MDK a VCCA trvale napětí 1,24 V a pomocí změny sériové kombinace fixního rezistoru R_M a nastavitelného R_{var} lze řídit velikost budícího proudu. Vztahy pro zjištění hodnot odporů jsou znázorněny níže. Minimální a maximální hodnota monitorovacího proudu vztažena k nominálnímu výkonu P_{NOM} byla zjištěna v katalogovém listu modulu a námi požadovaný proud okolo 50 mA odpovídá rozsahu nastavovaného výkonu P_{SET} 3 až 5 mW.

$$\begin{aligned}
 RM_{MIN} &= \frac{U_{MDA}}{I_{M_{NOM_{MAX}}}} \cdot \frac{P_{NOM}}{P_{SET}} = \frac{1,24}{2,5 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{5 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-3}} = 496 \Omega \\
 RM_{MAX} &= \frac{U_{MDA}}{I_{M_{NOM_{MIN}}}} \cdot \frac{P_{NOM}}{P_{SET}} = \frac{1,24}{0,4 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{5 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 10^{-3}} = 5166,7 \Omega \\
 RM_{MIN} &\geq RM_{FIX} \approx 470 \Omega \\
 RM_{MAX} - RM_{FIX} &\leq RM_{VAR} \approx 5100 \Omega
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

K dvojici odporů R_M a R_{var} je paralelně zapojen kondenzátor C_M o velikosti 2 nF, který zvyšuje stabilitu. Mezi piny CI a AGND musí být zapojen kondenzátor C_I , kterým je možné nastavit řídicí časové konstanty a rychlost zapnutí řídicího obvodu. Dále mezi pin LDA a anoda laserové diody je zapojen odpor nízké hodnoty R_L , který také zlepšuje stabilitu a zlepšuje odvod tepla.

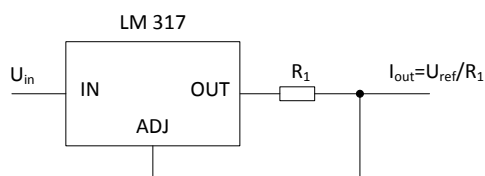


Obr. 4.11: Doporučené zapojení řídicího obvodu iC-WKP (převzato z http://www.ichaus.de/upload/pdf/WKP_datasheet_C1en.pdf)

V obvodu budiče je dobré zajistit omezení maximálního proudu laserovou diodou a zabránit tak jejímu případnému zničení. Jako omezovač proudu je použit lineární stabilizátor LM 317. Zapojení omezovače proudu je na Obr. 4.12. Velikost limitního proudu lze nastavit rezistorem R_1 , podle rovnice

$$I_{OUT} = \frac{U_{REF}}{R_1}, \quad (4.3)$$

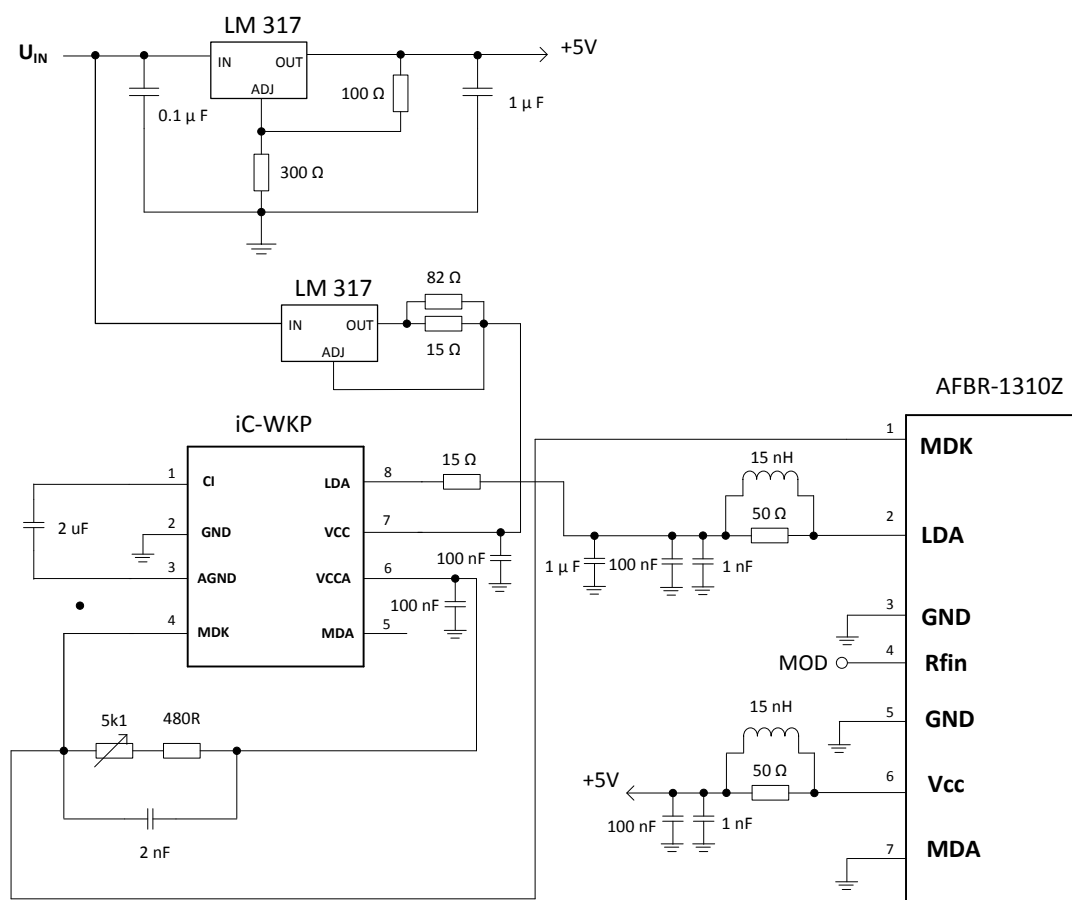
kde $U_{ref}=1,25$ V a je to konstantní referenční napětí, které stabilizátor udržuje mezi svorkami ADJ a OUT. Maximální proud laserovou diodou udávaný výrobcem je 100 mA a doporučený pracovní proud je 60 mA. Pro paralelní kombinaci odporů 15 a 82 Ω , je limitní proud nastaven na hodnotu 97,8 mA.



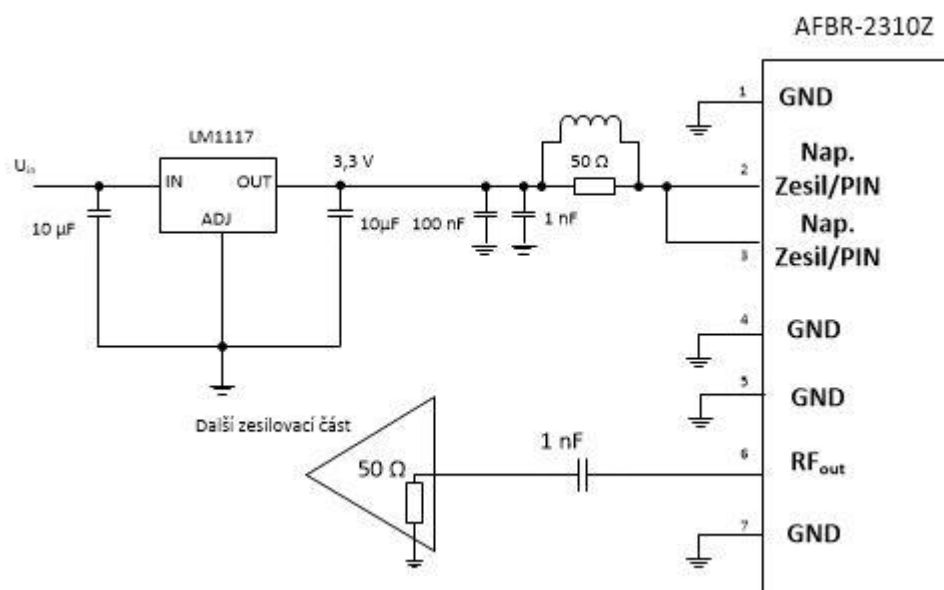
Obr. 4.12: Lineární stabilizátor LM 317 jako omezovač proudu

4.4 Shrnutí

Celkové navržené zapojení vysílacího a přijímacího modulu je znázorněno na Obr. 4.13 a Obr. 4.14. Modulační signál bude připojen na konektor typu SMA a k pinu RF_{in} bude přiveden přizpůsobeným mikropáskovým vedením o impedanci $50\ \Omega$. Uvnitř vysílacího modulu je struktura Bias-T, přes kterou bude modulační signál přiveden na laserovou diodu a bude tak ovlivňovat proud laserovou diodou a tedy i výstupní optický výkon. V modulu přijímacího modulu je naznačen případný zesilovač přijatého signálu.



Obr. 4.13: Schéma navrženého vysílacího modulu

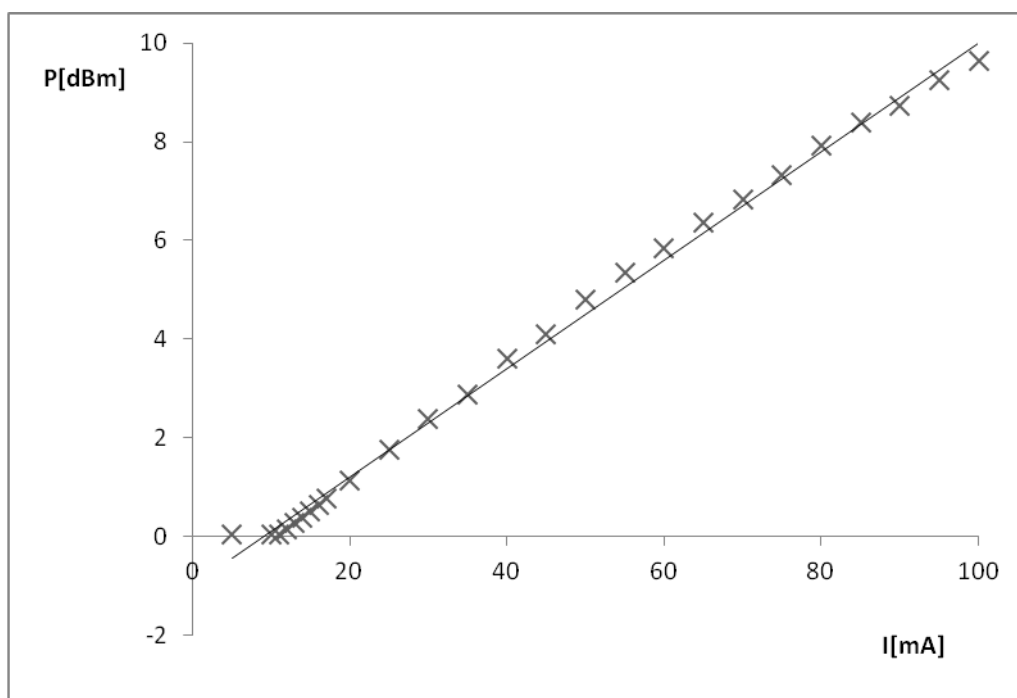


Obr. 4.14: Schéma navrženého přijímacího modulu

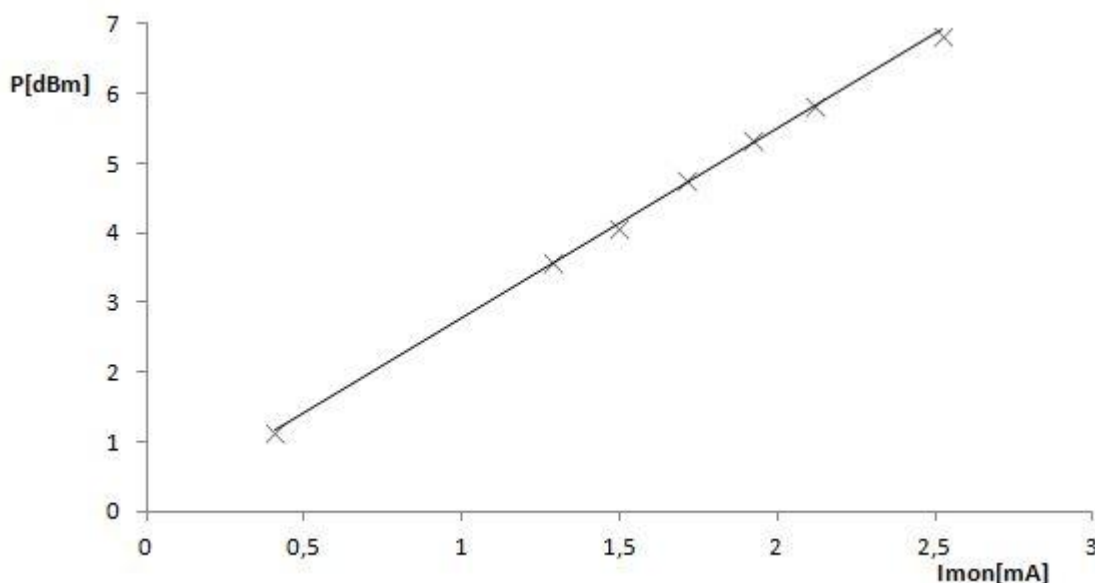
5 KONSTRUKČNÍ ČÁST

V této části práce bude popsána konstrukce a měření jednotlivých částí optické linky. Před samotným návrhem desky plošných spojů je vhodné si změřit charakteristiky laserové diody a zjistit zda bude potřeba řešit otázku chlazení, tedy bude-li budič laserové diody udržovat konstantní optický výkon.

Nejprve je vhodné změřit závislost vyzařovaného optického výkonu na protékajícím proudu laserovou diodou. Z této závislosti poté určit hodnotu prahového proudu I_p a stanovit oblast, kde se průběh blíží lineární charakteristice. Optický výkon na výstupu vlákna byl měřen optickým přijímačem Thorlabs PDA10CS. Výrobce udává pro integrovanou laserovou diodu prahový proud $I_p=15$ mA, ovšem ze změřené charakteristiky (Obr. 5.1) byla odečtena hodnota o něco nižší, zhruba 10 mA. Oblast s lineárním charakterem, vhodná k umístění pracovního bodu, byla určena v rozsahu od 20 mA do 80 mA, přičemž maximální dovolený proud je 100 mA. Vzhledem k těmto zjištěným parametrům se zdá být ideální umístění pracovního bodu na 50 mA. Pro maximální dovolený proud 100 mA, bylo napětí na laserové diodě 1,6 V, tedy výkon 0,16 W. Byla změřena i závislost proudu I_{MON} z monitorovací fotodiody umístěné uvnitř modulu na výstupním optickém výkonu, která byla podle očekávání lineární (Obr. 5.2). Zjištěné krajní hodnoty fotoproudu budou použity při návrhu budiče laserové diody.



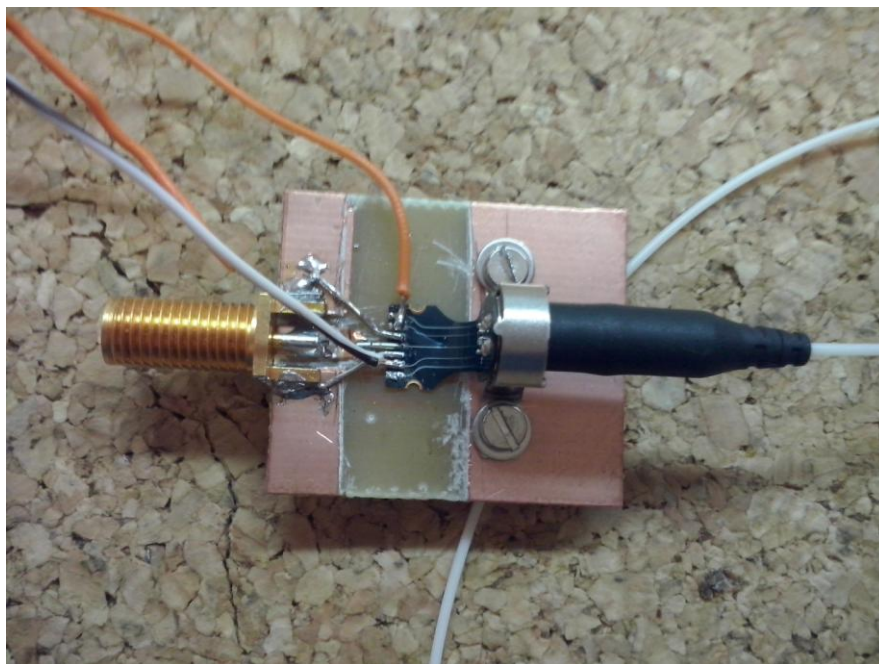
Obr. 5.1: Graf závislosti optického výkonu na protékajícím proudu



Obr. 5.2: Závislost proudu monitorovací fotodiody na výstupním optickém výkonu laserové diody

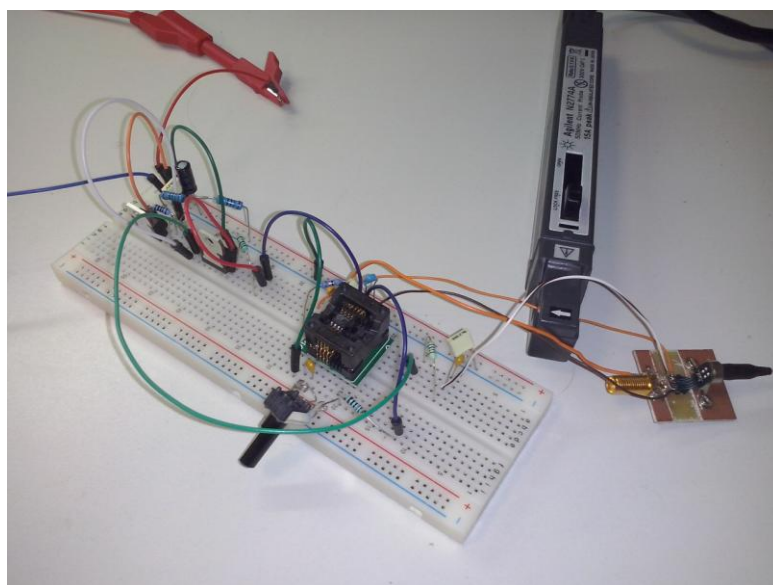
Pro vyzkoušení funkčnosti budiče pro optický vysílač, bylo zapojení sestaveno na nepájivém poli. Budič iC-WKP byl umístěn do patice pro připojení SMD součástek na nepájivé kontaktní pole. Na nepájivém kontaktním poli byl sestaven i stabilizátor napětí a omezovač proudu, kde byla ověřena jejich správná funkce.

Dále byla vyrobena experimentální destička pro připojení vysílacího modulu AFB1310-Z k nepájivému kontaktnímu poli. Z konektoru flexibilní desky plošného spoje modulu bylo třeba vyvést jednotlivé signály pomocí vodičů. SMA konektor byl na experimentální destičce připojen na vysokofrekvenční vstup modulu pomocí tenké měděné folie a kousku vodiče. Samotný modul byl k této destičce mechanicky připevněn šrouby. Celá popsaná konstrukce je znázorněna na Obr 5.3. Při mechanické konstrukci bylo dbáno na zajištění co nejmenší délky vysokofrekvenční cesty mezi konektorem SMA a RF vstupem modulu, z důvodu potlačení odrazu modulačního signálu vlivem impedančního nepřizpůsobení. Impedanční přizpůsobení bylo následně měřeno pomocí vektorového analyzátoru. V pásmu od 200 MHz do 5,5 GHz, kde výrobce modulu udává hodnotu vstupní impedance 50Ω , dosahovala vstupní impedance velmi nízkých hodnot a na frekvenci okolo 1 GHz byla zjištěna paralelní rezonance. Lze se domnívat, že zjištěné impedanční přizpůsobení je způsobeno nevhodným provizorním řešením vysokofrekvenční cesty mezi SMA konektorem a vstupem modulu. Bylo proto navrženo opětovné měření vstupní impedance na finální desce plošných spojů, kde by propojení mělo být provedeno výrazně lépe.



Obr. 5.3: Mechanické řešení připojení modulu na nepájivé pole

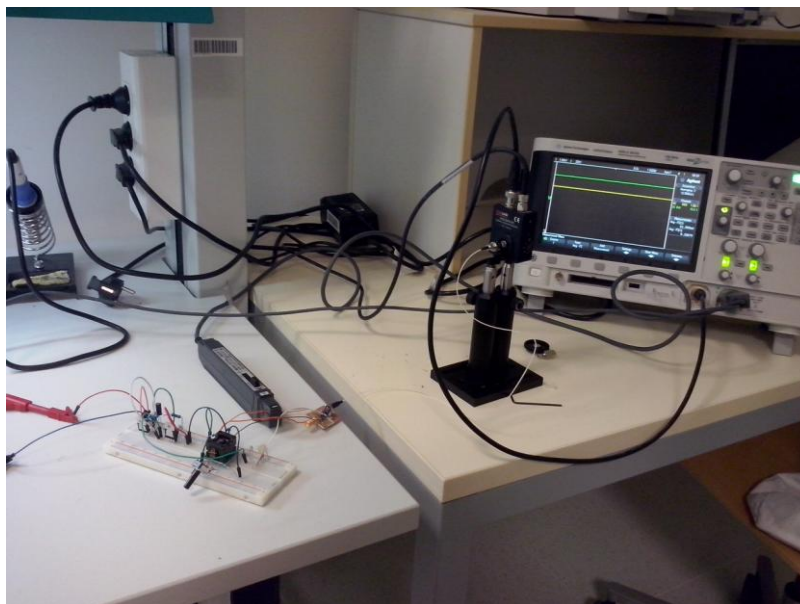
Sestavený budič pracoval správně podle očekávání. Bylo ověřeno, že mezi piny budiče VCCA a MDK je skutečně správné referenční napětí 1,24 V. Proud tekoucí do laserové diody, byl řízen sériovou kombinací pevného a proměnného odporu a byl měřen pomocí proudové sondy Agilent N2774A (Obr. 5.4.).



Obr. 5.4: Zapojení modulu na nepájivém poli a měření proudovou sondou

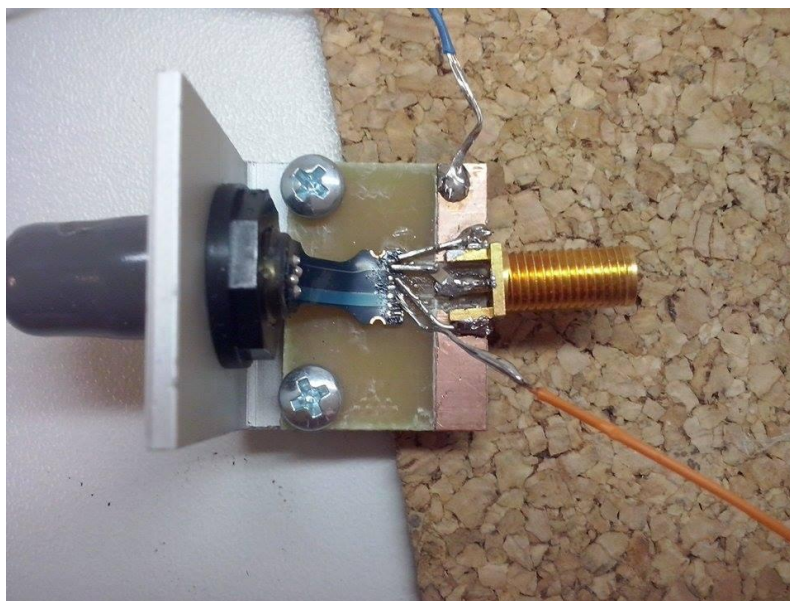
Nejprve byla vláknovým mikroskopem Thorlabs CL-200 zkontrolována čistota apertury optického vlákna a optický výkon byl poté měřen pomocí měřiče optického výkonu Exfo FOT-10A. Při proudu tekoucím do laserové diody 50 mA byla měřená úroveň okolo 7 dBm, což zhruba odpovídá 5 mW udávaným výrobcem v datovém listu

modulu. Výstupní optický výkon byl při dlouhodobějším sledování (respektujícím poměrně malou časovou konstantu ohřevu modulu) stabilizovaný. Tudíž nebylo nutno řešit otázku dodatečného chlazení, respektive odvodu ztrátového výkonu z modulu. Dále byla stabilita optického výkonu měřena i pomocí optického přijímače Thorlabs PDA10CS. Zapojení celého pracoviště je ukázáno na Obr. 5.5.



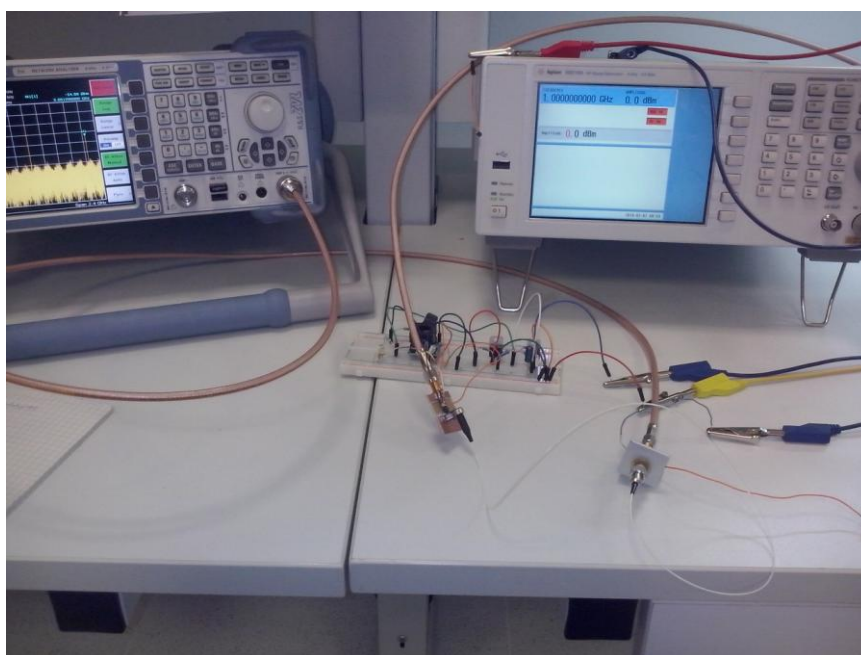
Obr. 5.5: Zapojení pracoviště pro měření optického výkonu

Na experimentální destičku byl připojen i přijímací modul. Opět bylo třeba vyvést kontakty z flexibilní desky plošných spojů. SMA konektor byl připojen na RF výstup vysílače přes vazební kondenzátor 1 nF. Samotný přijímací modul byl nasazen a mechanicky připevněn k hliníkovému profilu ve tvaru L.



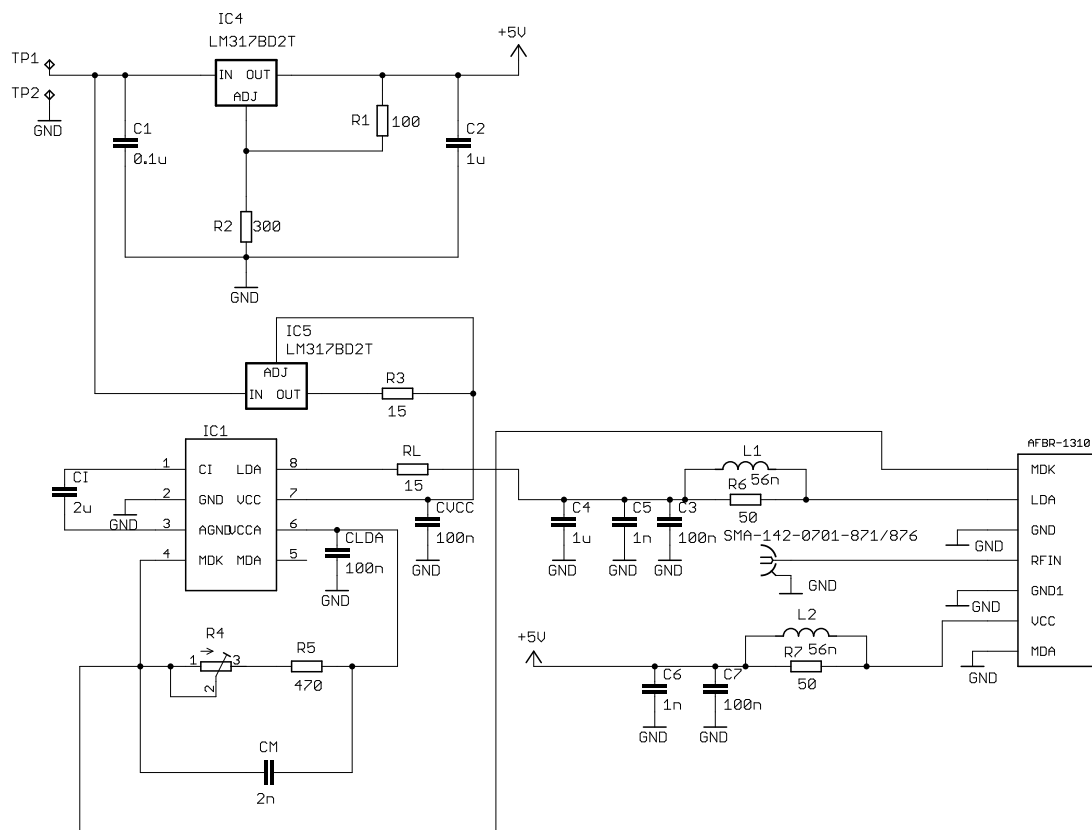
Obr. 5.6: Mechanické řešení připojení přijímacího modulu

Dále byla sestavena celá optická linka. Na vstup vysílacího modulu byl připojen generátor modulačního vysokofrekvenčního signálu a na výstup přijímacího modulu byl připojen spektrální analyzátor. Toto zapojení je znázorněno na Obr. 5.7. Pomocí spektrálního analyzátoru, byla zjištěna úroveň výstupního signálu a zároveň pomocí zobrazeného spektra, lze určit hodnotu vstupního budícího signálu, kdy začínají ve spektru vystupovat vyšší harmonické složky. Při budícím signálu z generátoru o frekvenci 1 GHz a výkonové úrovni 0 dBm, byla přijímaná úroveň zhruba -30 dBm. To mohlo být způsobeno špatným impedančním přizpůsobením, nedokonalou konstrukcí a zapojením na nepájivém kontaktním poli. Úroveň vstupního budícího signálu, kdy začaly vystupovat vyšší harmonické složky, byla zjištěna okolo 5 dBm. Bohužel později v závěrečné fázi bylo zjištěno, že při měření útlumu optického vlákna byl nevhodně nastaven spektrální analyzátor, kde byl nastaven offset měřené úrovně, kvůli čemuž byla zobrazovaná úroveň o 15 dB vyšší než ve skutečnosti.

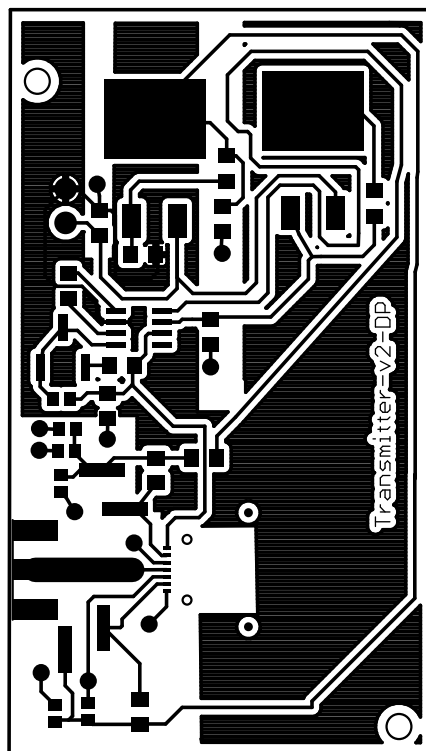


Obr. 5.7: Zapojení optické linky

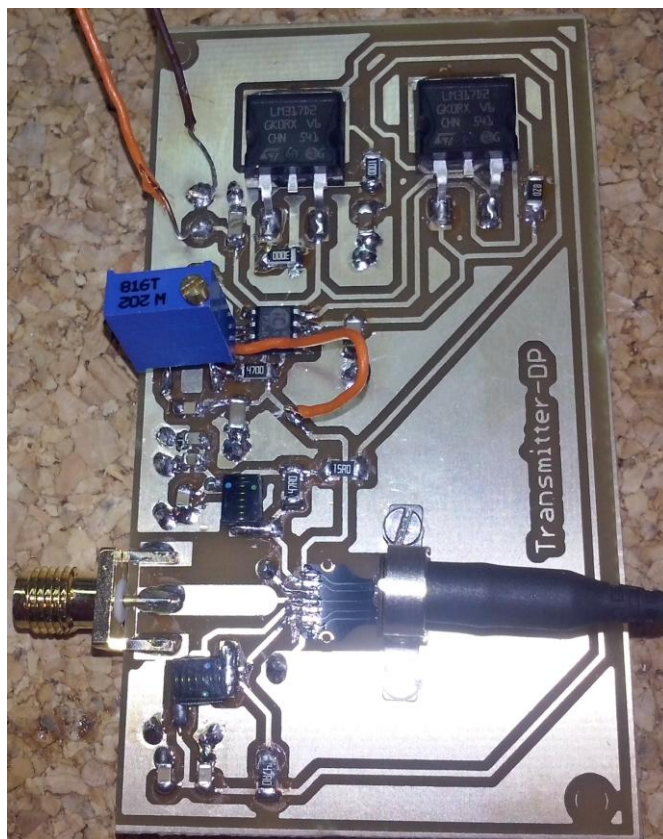
Pro finální verzi optické linky byly navrženy desky plošných spojů pro vysílač i přijímač. Nejprve byla pozornost zaměřena na sestavení a oživení modulu vysílače, následně pak přijímače. Na obrázcích níže, je znázorněno schéma zapojení vysílače (Obr. 5.8), deska exportovaná z návrhového softwaru Eagle (Obr. 5.9), fotka samotné desky vysílače (Obr. 5.10) a rozmístění součástek na desce (Obr. 5.11). Navržená deska obsahuje napájecí část tvořenou stabilizátorem napětí LM 317, který vytváří napájecí napětí +5 V pro vysílací modul, a dále napájí budič laserové diody přes omezovač proudu. Hlavní částí budiče laserové diody je obvod iC-WKP, který dodává požadovaný proud laserové diodě a zároveň pomocí monitorovacího proudu z fotodiody udržuje konstantní optický výkon. Poslední částí desky, je samotný vysílací modul AFBR1310-Z, jeho napájecí obvody a SMA konektor pro přivedení vysokofrekvenčního signálu.



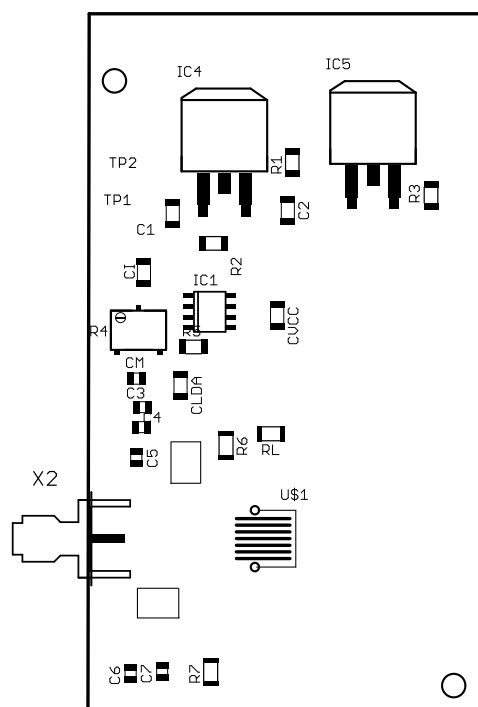
Obr. 5.8: Schéma zapojení vysílače z programu Eagle



Obr. 5.9: Deska plošných spojů (hladina TOP)



Obr. 5.10: Fotografie osazené desky plošných spojů



Obr. 5.11: Rozmístění součástek na desce vysílače

Postupně byly osazeny a oživeny jednotlivé části desky a byla ověřena jejich správná funkce stejně jako u zapojení na nepájivém kontaktním poli. Optický vysílací modul AFBR1310-Z a řídicí obvod iC-WKP jsou velmi citlivé na ESD výboje, které je mohou poškodit případně zničit. Proto při manipulaci s těmito obvody byl použit ochranný ESD náramek pro uzemnění. V návrhu desky došlo k chybnému spojení katody monitorovací diody a řídicího obvodu, tato chyba byla odhalena a vyřešena drátovou propojkou. Proud laserovou diodou byl nastaven na 50 mA proměnným odporem R_5 a byl měřen výstupní optický výkon opět pomocí měřiče optického výkonu Exfo FOT-10A. Následně byl proud ještě ověřen výpočtem ze změřeného úbytku napětí na známém odporu R_L , který je zapojen na anodu laserové diody. Jak je vidět z fotografie (Obr. 5.10), montážní podpěry modulu byly připevněny k souvislým plochám mědi pro lepší dodatečný odvod tepla.

Pro vysokofrekvenční cestu signálu od SMA konektoru k vstupnímu RF pinu vysílacího modulu AFBR310-Z bylo navrženo 50Ω mikropáskové vedení pro substrát FR-4 a frekvenci 1 GHz v softwaru AppCAD od firmy Avago Technologies (Obr 5.12). Hlavním parametrem určujícím impedanci, je šířka pásku W , která byla určena na $W=2,76$ mm. Při návrhu bylo opět dbáno na co nejkratší vzdálenost vysokofrekvenční cesty.

Microstrip

Calculate Z0 [F4]

$Z_0 = 50.06 \Omega$

Elect Length = 0.309 λ

Elect Length = 111.3 degrees

Elect Length = 92.712 mm (Air Line equiv.)

Delay = 309.255 ps

1.0 Wavelength = 161.679 mm

$V_p = 0.539$ fraction of c

$\epsilon_{eff} = 3.438$

$W/H = 1.816$

Dielectric: $\epsilon_r = 4.6$

FR-4

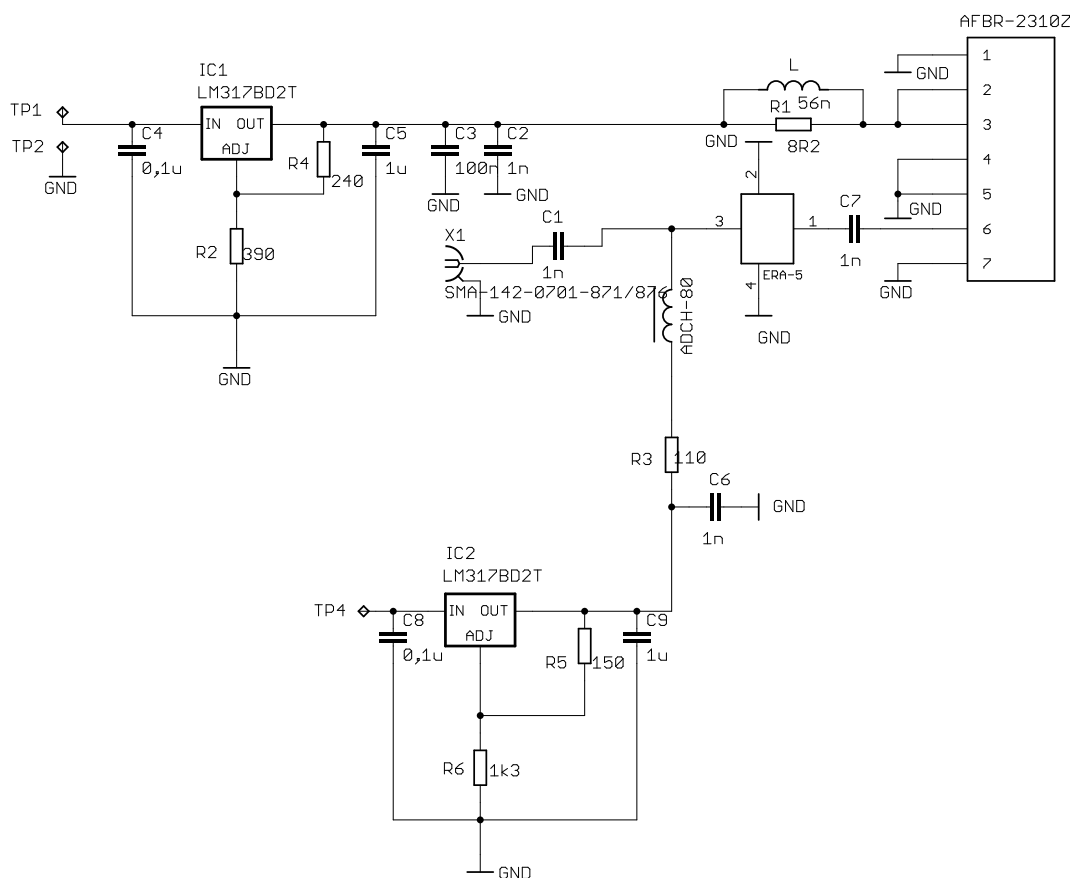
Frequency: 1 GHz

Length Units: mm

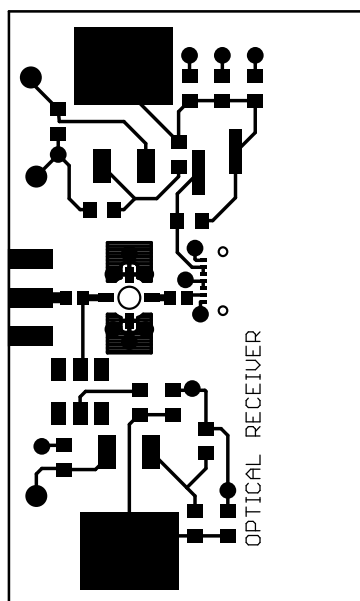
Obr. 5.12: Návrh 50Ω mikropáskového vedení

Vzhledem k výše uvedenému útlumu optické linky bylo navržené schéma přijímače doplněno o zesilovač. Konkrétně se jedná o monolitický zesilovač ERA-5 ve 4 vývodovém pouzdře VV105, který pracuje v rozmezí DC až 4 GHz a pro frekvence do 1 GHz, které jsou pro tuto aplikaci důležité, má zisk okolo 20 dB. Pro jeho napájení byl použit stabilizátor LM-317, jehož výstupní napětí bylo nastaveno rezistory na 12 V. V obvodu napájení zesilovače se nachází cívka o hodnotě $1,8 \mu\text{H}$, pro zamezení pronikání vysokofrekvenčních složek do napájení, tato cívka by měla mít impedanci výrazně vyšší než 50Ω na nejnižší uvažované pracovní frekvenci. Pro nejnižší pracovní frekvenci linky, tedy 200 MHz, vychází impedance cívky 2200Ω , což vyhovuje. V napájecím obvodu je nutný i blokovací kondenzátor pro blokování stejnosměrné složky na výstupu. Okolo zemnicích vývodů zesilovače byly umístěny celistvé plošky mědi a bylo zde realizováno několik prokovených otvorů pro kvalitní spojení těchto

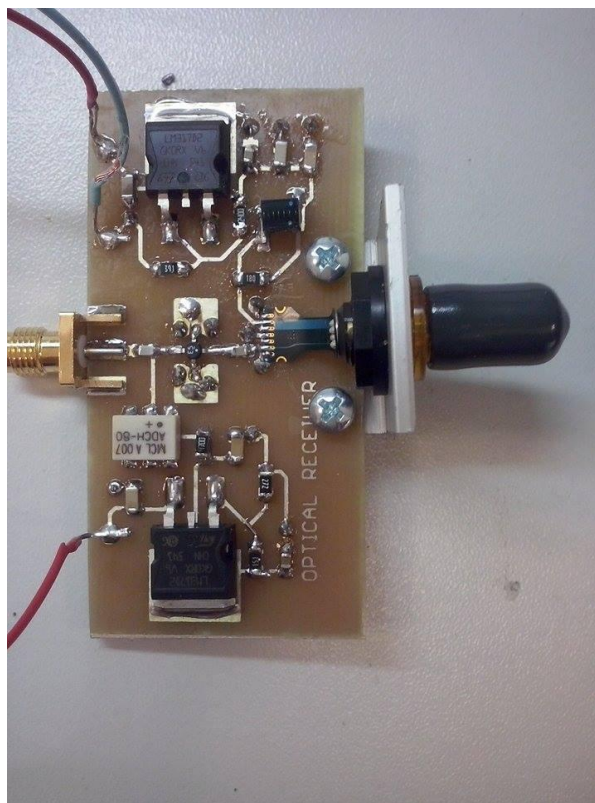
vývodů se zemí. Celé zapojení přijímače doplněné o zesilovač, je znázorněno níže na Obr. 5.13 spolu s motivem desky (Obr. 5.14) a umístěním součástek (Obr. 5.15).



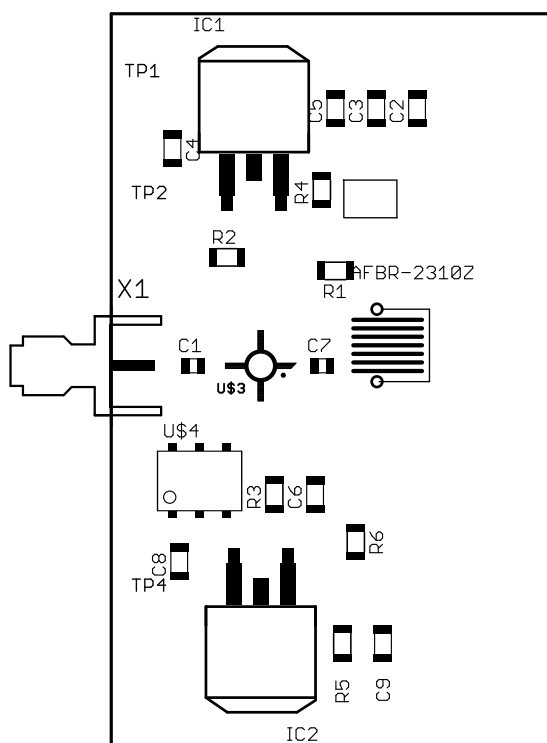
Obr. 5.13: Schéma zapojení přijímače z programu Eagle



Obr. 5.14: Motiv vodivých spojů na hladině TOP



Obr. 5.15: Fotografie desky přijímače

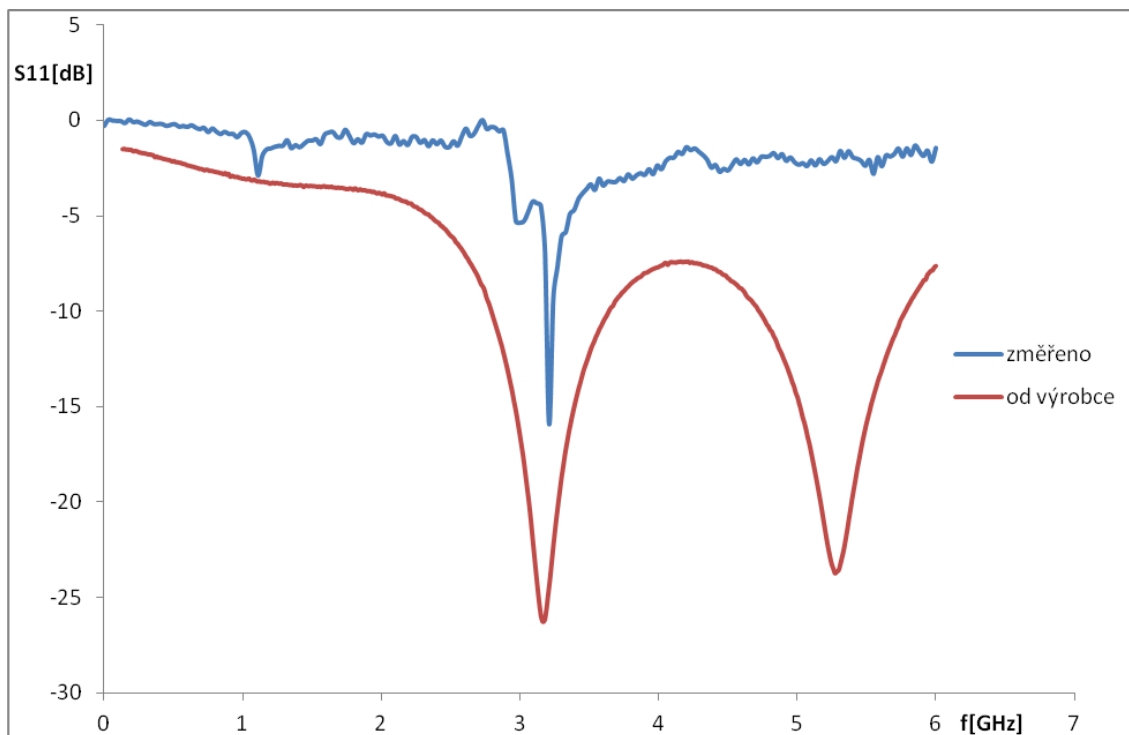


Obr. 5.16: Rozmístění součástek

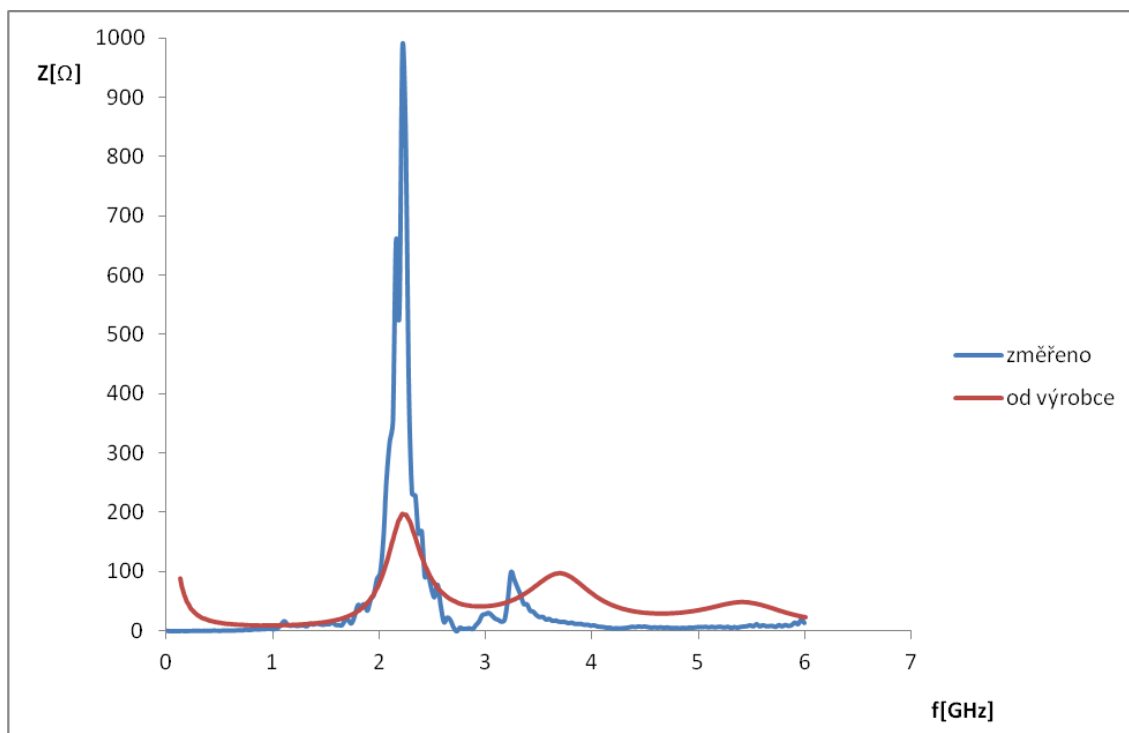
Při konstrukci přijímače byly opět nejprve oživeny napájecí obvody. V napájecí části pro zesilovač musela být pozornost věnována ztrátovému výkonu na odporu R_3 . Úbytek napětí na něm dosahuje zhruba 7 V a proud do zesilovače teče okolo 65 mA, což dává ztrátový výkon 0,455 W. SMD odpory jsou vyráběny na ztrátový výkon 0,25 W, proto musel být odpor 110 Ω realizován paralelní kombinací čtyř odporů 470 Ω , která představuje hodnotu 117,5 Ω . Příjímávací modul byl navlečen na hliníkový profil tvaru L a upevněn přitahovací maticí. Následně byl hliníkový profil mechanicky připevněn k desce plošných spojů a modul připájen.

5.1 Měření parametrů optické linky

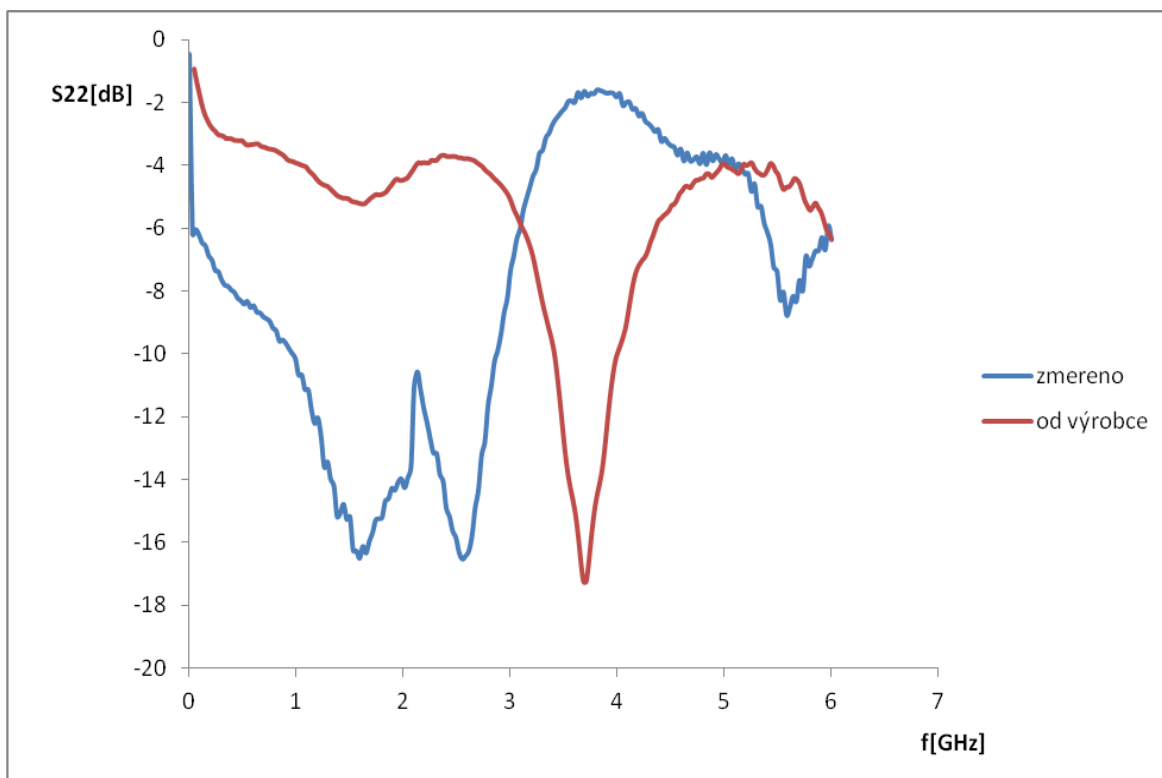
Kompletní optická linka byla sestavena a byly měřeny její parametry. Nejprve byl změřen rozptylový parametr S_{11} , z něj určená vstupní impedance Z a rozptylový parametr S_{22} . Měření bylo provedeno pomocí vektorového obvodového analyzátoru Rohde&Schwarz ZVL-6. Průběhy těchto parametrů jsou na obrázcích 5.17 až 5.19. Impedanční přizpůsobení se ani přes lepší konstrukci výrazně nezlepšilo. Proto byl kontaktován výrobce modulu, firma Avago Technologies, který poskytl jimi změřené rozptylové parametry linky. V obrázcích níže jsou kromě změřených i získané parametry od výrobce pro porovnání. Z grafu S_{11} od výrobce je patrné, že modul není ideálně přizpůsobený na 50 Ω , i přes fakt, že to výrobce v katalogovém listu uvádí. Změřený S_{11} je o několik dB horší, ale charakter průběhu je podobný. Změřený parametr S_{22} , se výrazně liší od grafu od výrobce, z důvodu připojení zesilovače Era-5, který má přizpůsobení k 50 Ω vyhovující. Následně byl změřen přenos optické linky S_{21} (Obr. 5.20). Přenos optické linky S_{21} je výrazně horší než přenos udávaný výrobcem a to zhruba o 30 až 40 dB. Bohužel z materiálů poskytnutých výrobcem nebylo jasné, jak byl přenos měřen.



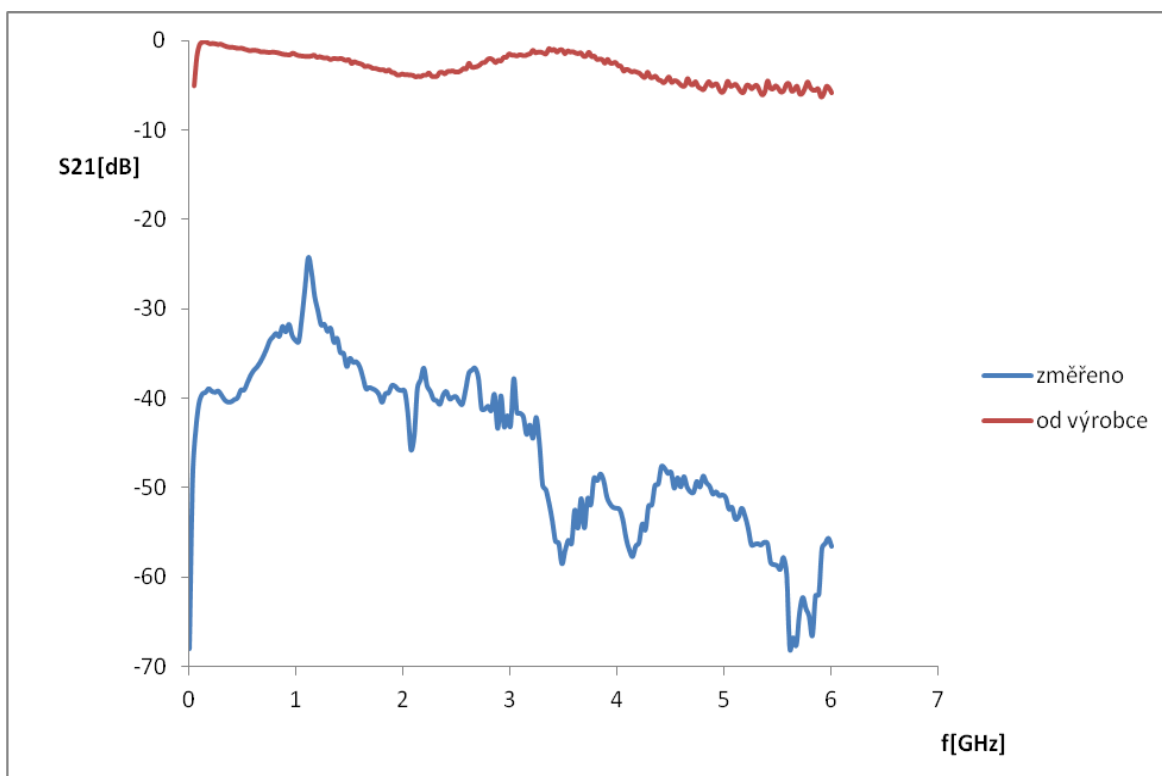
Obr. 5.17: Porovnání změřeného průběhu S_{11} s průběhem od výrobce



Obr. 5.18: Porovnání změřeného průběhu vst. impedance Z s průběhem od výrobce



Obr. 5.19: Porovnání změřeného průběhu S_{22} s průběhem od výrobce



Obr. 5.20: Porovnání změřeného průběhu přenosu S_{21} s průběhem od výrobce

V další části textu jsou určovány možné příčiny takto nízkého změřeného přenosu optické linky. Nejprve byla ověřena správná funkce vysílače. Pomocí generátoru byl přiveden vysokofrekvenční modulační signál na SMA konektor vysílačského modulu a spektrálním analyzátozem byla zjišťována výstupní výkonová úroveň linky a úroveň vyšších harmonických složek. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tabulce 1.

P[dBm]	-15	-10	-5	-2	0	2	5	8	10
1.harm	-52	-48	-41	-37	-34	-31,3	-30	-26,3	-23,8
2.harm	-	-	-78	-72	-66	-61,3	-57,3	-50,3	-45,8
3.harm	-	-	-	-	-	-	-	-59	-54
Δ_{1-2}	-	-	37,6	35	32	30,3	27,3	24,4	22

Tabulka 1: Výkonová úroveň na výstupu a vyšší harmonické při frekvenci 1 GHz

Jak je patrné z Tabulky 1, se zvyšujícím se budícím výkonem P_{IN} se snižuje odstup Δ_{1-2} 1. a 2. harmonické složky. Dále lze říci, že třetí harmonická složka začala vystupovat při vstupním výkonu zhruba 8 dBm.

Tuto hodnotu lze ověřit jednoduchým výpočtem. V předchozí kapitole byl určen bod jednodéciblové komprese $P_{1dB} = -1,6$ dBm, což představuje výkon 0,7 mW. Dále je znám změřený parametr S_{11} na frekvenci 1 GHz, který je -0,6 dB. Z převodní tabulky [9] bylo odečteno, že parametr $S_{11} = -0,6$ dB, odpovídá přenosu 12,5 % budícího výkonu do zátěže a zbytek výkonu tedy 87,5 %, se odrazí zpět. Ke zjištění vstupního výkonu P_{IN} , který je nutný k dosažení P_{1dB} na vstupu vysílače stačí vypočítat:

$$P_{IN} = P_{1dB} * 0,125 = 0,7 * 10^{-3} * 0,125 = 5,6 \text{ mW}$$

$$P_{IN} [dBm] = 10 * \log(P_{IN}) = 10 * \log\left(\frac{5,6 * 10^{-3}}{1 * 10^{-3}}\right) = 7,5 \text{ dBm} \quad (5.1)$$

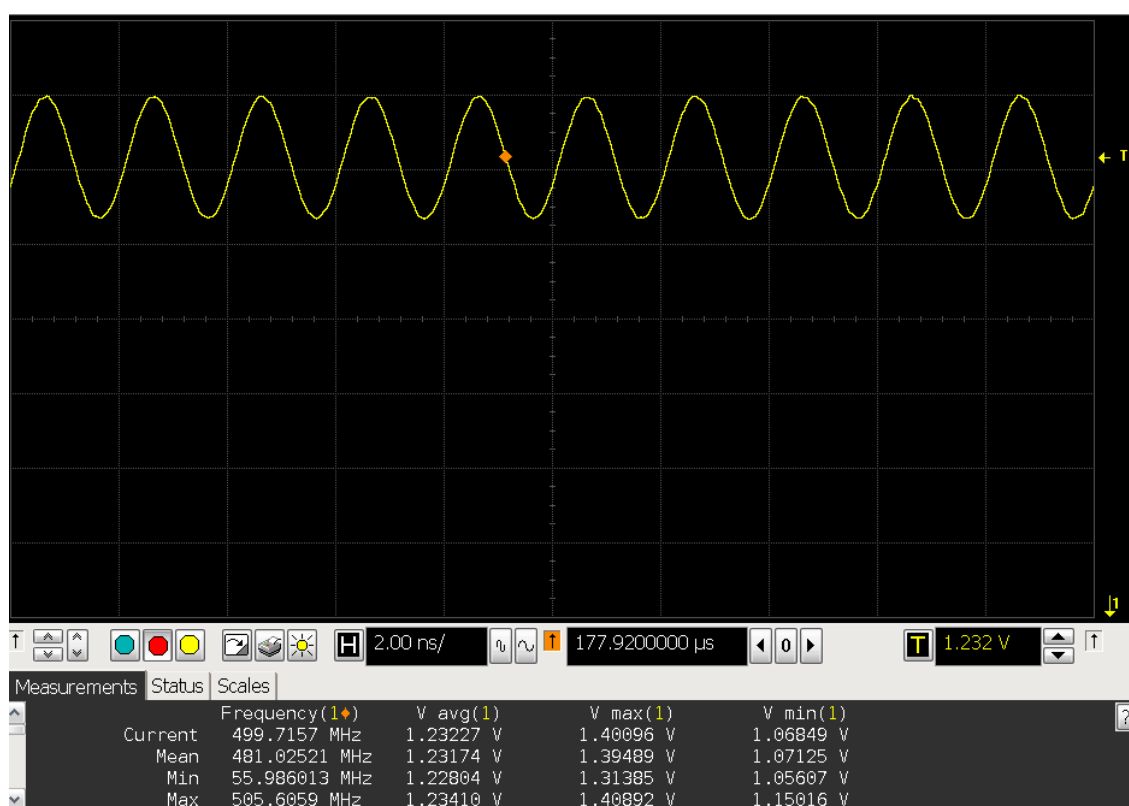
Tento výpočet potvrzuje změřený fakt, že vyšší harmonické složky se začínají výrazněji objevovat zhruba od vstupního výkonu $P_{IN} = 8$ dBm. Tento dílčí závěr naznačuje, že ač je impedanční přizpůsobení vstupu linky nepříliš kvalitní, dá se jinak předpokládat správná funkce zbytku vysílače.

Druhým způsobem ověřování funkčnosti vysílače bylo zjišťování, zda je výstupní optický signál správně modulován vysokofrekvenčním signálem. Podle změřené závislosti výstupního optického výkonu na proudu laserovou diodou uvedené na Obr. 5.1, byl zvolen střední proud laserovou diodou 50 mA a rozkmit vlivem modulační ± 30 mA, tedy $I_{MIN} = 20$ mA a $I_{MAX} = 80$ mA. Na původní experimentální desku vysílače byl připojen proudový zdroj a pomocí osciloskopické sondy bylo měřeno napětí na U_L laserové diodě pro minimální a maximální proud. Výsledky jsou uvedeny v Tabulce 2.

I[mA]	U_L [V]
20	1,075
50	1,226
80	1,397

Tabulka 2: Naměřené hodnoty napětí U_L pro různé proudy laserovou diodou

Následně byl generátor modulačního signálu o frekvenci 500 MHz připojen k desce vysílače a pomocí osciloskopické sondy s mezním kmitočtem 600 MHz, bylo modulované napětí měřeno mezi pinem anody laserové diody a zemí (katodou) a zobrazen na osciloskopu. Na obr. 5.21 je znázorněn snímek obrazovky osciloskopu s měřeným modulovaným signálem, včetně měření minimální a maximální hodnoty. Změřené hodnoty, relativně přesně odpovídají změřeným hodnotám v Tabulce 2. Z toho vyplývá, že bylo dosaženo plné hloubky modulace a signál je modulován správně. Při měření byl použit vstupní výkon $P_{IN}=8$ dBm, který odpovídá hodnotě ověřené v předchozím dílčím závěru. Průběh modulačního napětí byl poté zjišťován na různých frekvencích z důvodů určení frekvenčního rozsahu linky. Byla zjištěna dolní mezní frekvence $f_{MIN}=200$ MHz a horní mezní frekvence linky byla vyšší než požadovaný 1 GHz, což odpovídá údajům udávaným výrobcem.



Obr. 5.21: Obrazovka osciloskopu při měření modulovaného signálu

Z výše popsaných provedených experimentů, lze usoudit, že vysílač pracuje správně podle předpokladů. Na výstupu optického vlákna byl změřen optický výkon 7 dBm, což odpovídá proudu 50 mA a proto vlákno také nevnaší chybu vlivem nadměrného útlumu, proto byla dále pozornost zaměřena na přijímač.

Nejprve bylo ověřeno, zda správně funguje zesilovač ERA-5. Osciloskopickou sondou byla měřena efektivní hodnota napětí na výstupu přijímače zhruba 1mV a na výstupu zesilovače 16 mV, což ukazuje, že zesilovač funguje správně a zesiluje signál zhruba o 20 dB.

Výrobce v katalogovém listu pro přijímací modul AFBR2310-Z, uvádí parametr převodní zisk 200 V/W. Z toho parametru lze odvodit očekávanou úroveň na výstupu

přijímacího modulu. V teoretickém případě by při vstupním výkonu 1 W mělo být napětí na výstupu modulu 200 V. Je znám vstupní optický výkon, který byl změřen na vlákne $P=5$ mW. Pro tento výkon lze snadno určit výstupní napětí modulu na 1 V, což odpovídá výkonu 10 dBm. Tohoto výkonu nebylo zdaleka dosaženo, proto lze usoudit, že vysoký přenosový útlum linky může způsobovat optický přijímací modul AFBR2310-Z. Tuto skutečnost lze ověřit připojením optického vlákna vysílače k jinému externímu optickému přijímači optimalizovanému pro vlnovou délku 1310 nm a stanovit útlum takovéto linky. Další možností, jak určit zda je chyba skutečně způsobena přijímačem, je použít externí modulovaný optický zdroj místo vysílače AFBR110-Z.

6 ZÁVĚR

V teoretické části byla diskutována problematika jednotlivých částí analogových optických linek. Nejprve byla popsána optická vlákna, jejich konstrukce, typy a nejdůležitější parametry. Dále se práce zabývá popisem zdrojů záření vhodnými pro optické komunikace a optickou modulací. V posledním bodě teoretické části jsou rozebrány nejpoužívanější typy fotodetektorů, jejich vlastnosti a základy zpracování přijatého signálu. Teoretická část také obsahuje popis systému MOSAD®-MST-PD, ve kterém by měla navržená optická linka nahradit stávající řešení s koaxiálními kabely.

V další fázi bylo vybráno několik komerčně dostupných optických linek a byly diskutovány jejich vlastnosti a zjištěné parametry. Následně bylo vybráno řešení optické linky pomocí vysílacího a přijímacího modulu od firmy Avago Technologies, které představuje ideální kompromis mezi kompletním návrhem linky a finančně velmi náročným komerčním řešením a splňuje požadavek na přenos vf signálu do 1 GHz. Na základě vybraného řešení byly navrženy napájecí a řídicí obvody k vysílacímu i přijímacímu modulu.

Nejprve byly oba moduly zkonstruovány na experimentálních deskách a budič sestaven na nepájivém kontaktním poli, kde byla ověřena jeho funkčnost. V této fázi došlo ke zdržení ve vývoji, jelikož byl nejprve použit nevhodný řídicí iC-WKN, který nebyl vhodný pro způsob, jakým jsou zapojeny laserová a monitorovací dioda ve vysílacím modulu AFBR1310-Z. Tato chyba byla zjištěna a byl použit již vhodný řídicí obvod iC-WKP. Byla změřena závislost výstupního optického výkonu na proudu laserovou diodou a z ní byl stanoven vhodný střední proud 50 mA. Byl také zjištěn značný útlum optické linky, který mohl být způsoben nedokonalým přizpůsobením vysílacího modulu.

Následně byl optický přijímač a vysílač realizován na deskách plošných spojů. Pomocí vektorové obvodové analyzátoru byly změřeny rozptylové parametry a porovnány s parametry od výrobce. Změřený parametr S_{11} měl podobný charakter jako parametr výrobce, ale nesvědčil o dobrém impedančním přizpůsobení k 50Ω . To má za následek, že se velká část budícího výkonu odráží od vstupu vysílače. K mírnému zlepšení impedančního přizpůsobení, by mohla pomoci profesionální výroba desky s prokvy pod kontaktními body flexibilního vývodu modulu. Byla by tak minimalizována délka zemní cesty a tím i sníženy parazitní vlastnosti. Dále byl změřen přenos optické linky S_{21} , který dosahoval ovšem nízkých hodnot.

Dále bylo změřeno, při jakém budícím výkonu se ve spektru začínají objevovat vyšší harmonické složky. Tento výkon P_{IN} byl stanoven na 8 dBm. Tato hodnota byla poté ověřena výpočtem pomocí bodu jednadicibellové komprese P_{1dB} . V dalším kroku byla ověřena plná hloubka modulace signálu, pomocí měření napětí na laserové diodě. Z těchto měření lze usoudit, že vysílač pracuje správně a důvod nízkého přenosu optické linky je chyba v přijímacím modulu. Hlavní části přijímacího modulu tedy přijímací PIN dioda zesilovač, jsou umístěny uvnitř modulu a tedy nepřístupné. Výpočtem byl odhadnut očekávaný výkon na výstupu při správné funkci přijímače, ovšem této hodnoty přijímač zdaleka nedosahuje.

Návrh a praktická realizace optické linky proběhly ve výsledku úspěšně. Optická

linka byla sestavena a byly měřeny její dosažené parametry. V průběhu konstrukce byl zjištěn problém, že linka dosahuje nízkých hodnot přenosu. Tento problém byl analyzován a byla ověřována správná funkčnost jednotlivých částí linky. Zjištěné parametry vysílače potvrzují jeho správné chování. Příčina nízkého přenosu, tedy byla určena pravděpodobně v konstrukci přijímače. Dále by bylo vhodné kontaktovat výrobce s detailním popisem konstrukce přijímače, aby byla zjištěna přesná příčina nadměrného útlumu.

LITERATURA

- [1] BUBNÍK, Lukáš, Jiří KLAJBL a Petr MAZUCH. *Optoelektrotechnika* [online]. [cit. 2016-09-14]. ISBN 978-80-88058-20-5. Dostupné z: <https://publi.cz/books/185/Impresum.html>
- [2] FILKA, Miloslav. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Brno: M. Filka, 2009. ISBN 9788086785141.
- [3] LUKÁŠ, Michal. *Laserové diody Část 1 - Princip funkce laserových diod* [online]. [cit. 2016-09-12]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01034/index.html>
- [4] LUKÁŠ, Michal. *Laserové diody Část 3 – Parametry laserových diod a jejich měření* [online]. [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/02023/index.html>
- [5] MALZAHN, Uwe. *Driving diode lasers is straightforward* [online]. , 1-4 [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: http://www.ichaus.de/upload/pdf/EuroPhotonics_H89_2004_Driving_Diode_Lasers.pdf
- [6] WILFERT, Otakar. *Fotonika a optické komunikace* [online]. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ [cit. 2016-09-29]. Dostupné z: <https://moodle.vutbr.cz/mod/resource/view.php?id=101124>
- [7] Johnson, M. *Photodetection and Measurement: Maximizing Performance in Optical Systems*. New York: McGraw-Hill, 2003.
- [8] JOHNSON, Lawrence A. *Application note 1 -Controlling Temperatures of Diode Lasers Thermoelectrically* [online]. ILX Lightwave Corporation, 2003 [cit. 2016-10-14].
- [9] KUNDERT, Ken. *Accurate and Rapid Measurement of IP2 and IP3* [online]. In: . S. 6-8 [cit. 2016-11-28].
- [10] COX, Charles H. III. *Analog Optical Links: Theory and Practice*. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. ISBN 0-521-02778-0.
- [11] Mini-circuits. *The effect of VSWR on Transmitted Power: AN-40-013 (04/14/15)* [online]. In: . [cit. 2017-05-12]

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

α_1	úhel dopadu
α_2	úhel lomu
n_1, n_2	indexy lomu
Θ_a	mezní úhel navázání
NA	numerická apertura
V	normovaná frekvence
M	počet vedených modů
P_1	vstupní výkon
P_2	výstupní výkon
$u(\lambda)$	útlum optického vlákna
α_A	útlum absorpcí
α_R	Rayleighův rozptyl
α_O	Rozptyl na makroohybech a jiných deformacích
α_N	Rozptyl na makroskopických neregularitách
α_{MO}	Rozptyl na mikroohybech
α	celkový útlum
f	frekvence
E_v	energie ve vodivostního pásu
E_1	energie ve valenčním pásu
h	Planckova konstanta
W_1, W_2	energetické hladiny
t_1, t_2	časové okamžiky
I_p	prahový proud
ESD	elektrostatický výboj
AM	amplitudová modulace
FM	frekvenční modulace
PM	fázová modulace
PoM	polarizační modulace
DC	stejnoseměrné napájení
APD	lavinová dioda

I_{sc}	zkratový proud
V_{oc}	napětí při nulovém proudu fotodiodou
C_p	kapacita přechodu P-N
R_{sh}	svodový odpor
R_s	sériový odpor
P_r	světelný výkon dopadající na fotodetektor
I_0	proud vygenerovaný fotodiodou
r	citlivost
q	náboj elektronu
c	rychlost světla
η	kvantová účinnost
i_{ns}	spektrální hustota proudu výstřelového šumu
k	Boltzmanova konstanta
T	teplota v Kelvinech
R	odpor
OZ	operační zesilovač
U_b	závěrné napětí na fotodiodě
f_m	mezní frekvence
A_m	zesílení operačního zesilovače
EMC	elektromagnetická kompatibilita
SNR	poměr signál/šum
$IP3$	bod zahrazení produkty třetího řádu
SMD	povrchová montáž
W	šířka mikropásku
U_L	napětí laserové diody
I_L	proud laserovou diodou
P_{1dB}	bod jednadiciblové komprese