



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

NÁVRH OPTICKÉHO ZESILOVAČE

DESIGN OF OPTICAL AMPLIFIER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

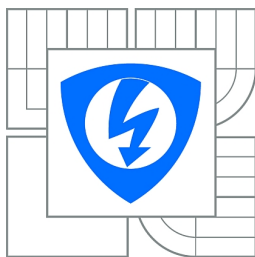
RASTISLAV SOMORA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Mgr. KAREL SLAVÍČEK, Ph.D.

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Teleinformatika

Student: Rastislav Somora

ID: 115274

Ročník: 3

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Návrh optického zesilovače

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je navrhnout a sestavit optický zesilovač s konstantním zesílením na bázi prvků SOA. Zesilovač bude využívat existující součástkovou základnu SOA v provedení tzv. Butterfly. Úkolem je navrhnout a sestavit podpůrné obvody potřebné pro provoz zesilovače, zejména obvody napájení a obvody teplotní stabilizace vysílače.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] FILKA, M. Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku. CENTA, Brno 2009.

[2] KREJČIŘÍK, A. Napájecí zdroje, BEN, 2002.

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 2.6.2011

Vedoucí práce: Mgr. Karel Slavíček, Ph.D.

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ANOTACE

Bakalářská práce se zabývá návrhem a konstrukcí pomocných obvodů pro moderní polovodičový optický zesilovač SOA. V první kapitole je popsáno optické přenosové médium, jeho fyzikální vlastnosti a druhy používaných kabelů. Přehled zahrnuje i rozdělení optických oken, útlumové vlastnosti kabelů a parazitní jevy, které mohou při přenosu vzniknout. Další kapitola je zaměřena na zdroje optického signálu používaných v moderních datových sítích, popisuje jejich vnitřní strukturu a fyzikální podstatu. Třetí kapitola je věnována návrhu optického zesilovače s obvodem SOA. Zaměřuje se na správný výběr součástek, jejich rozmístění a koncepci celého návrhu. Poslední kapitola se věnuje nastavení, kalibraci a ovládání modulu optického zesilovače.

KLÍČOVÁ SLOVA

SOA, EDFA, WDM, LED, LD, Fabry-Perot, optické vlákno, útlum

ABSTRACT

This Bachelor's thesis deals with design and construction of support circuits for a modern optical amplifier the SOA. In the first chapter, optical transmitting medium with its physical properties and types of used cables is described. The overview includes a list of optical cables, their damping properties and parasitic effects which can occur during communication. Next chapter is focused on the optical signal sources used in modern data networks, describes their internal structure and physical essence. Third chapter is dedicated to designing the optical amplifier with the SOA circuit. It focuses on the right choice of parts, their arrangement and layout of the design. Last chapter deals with set up, calibration and control of the optical amplifier module.

KEY WORDS

SOA, EDFA, WDM, LED, LD, Fabry-Perot, optical cable, damping

SOMORA, R. *Návrh optického zesilovače*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 49 s. Vedoucí bakalářské práce Mgr. Karel Slavíček, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svoji bakalářskou práci na téma „Návrh optického zesilovače“ vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s využitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citované v práci a uvedené v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob. Jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., započítání možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1960 Sb.

V Brně dne

.....

podpis autora

Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce Mgr. Karlu Slavičkovi Ph.D. a doc. Ing. Václavu Zemanovi Ph.D. za vedení při řešení diplomové práce.

V Brně dne

.....

podpis autora

OBSAH

Seznam zkratk	1
Seznam obrázků	2
Seznam Tabulek	3
Úvod	4
1 Optické vlákno	5
1.1 Materiály pro výrobu optických vláken	6
1.2 Přenosové vlastnosti optických vláken	6
1.3 Útlum optických vláken	7
1.3.1 Typy optických vláken	12
1.4 Disperze	15
1.4.1 Chromatická disperze	19
1.5 Nelineární jevy při optickém přenosu	21
2 Zdroje světla	23
2.1 Luminiscenční diody	23
2.2 Laserové diody	24
2.3 SOA	25
2.4 EDFA zesilovače	26
3 Návrh zesilovače SOA	29
3.1 Rozbor jednotlivých obvodů	31
3.1.1 THORLABS-SOA1013S	31
3.1.2 TECA1-3V-3V-D	33
3.1.3 ATLS1A103	35
3.1.4 LT1084CT-3.3	36
3.2 Konstrukce	37
3.2.1 Návrh zdroje	37
3.2.2 Rozložení součástek	38
3.2.3 Chlazení	38
4 Ovládání a nastavení optického zesilovače	40
4.1.1 Nastavení modulu optického zesilovače	41
Závěr	43
Použitá literatura	44
Seznam příloh	45

SEZNAM ZKRATEK

Zkratka	Anglicky	Česky
ADC	Analog Digital Converter	Analogově digitální převodník
AR	Anti Refelction	Bezodrazová vrstva
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing	Běžný vlnový multiplex
DAC	Digital Analog Converter	Digitálně analogový převodník
DPSSL	Diode Pumped Solid-State Laser	Diodou vybuzený polovodičový laser
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing	Hustý vlnový multiplex
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier	Zesilovač z Erbiem dotovaným vláknem
EMI	Electro-Magnetic Interference	Elektro magnetické rušení
LD	Laser Diode	Laserová dioda
LED	Light Emitting Diode	Elektroluminescenční dioda
SOA	Semiconductor Optical Amplifier	Polovodičový optický zesilovač
TEC	Thermo-Electric Cooler	Peltierův článek
WDM	Wavelength Division Multiplexing	Vlnový multiplex

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Útlum ve vláknových světlovodech	8
Obr. 1.2 Závislost útlumu světlovodu na teplotě	10
Obr. 1.3 Závislost útlumu světlovodu optického kabelu po 8 měsících Při „utopení“ kabelu. 10	
Obr. 1.4 Útlumová charakteristika optického vlákna.....	12
Obr. 1.5 Ilustrace vlnového multiplexu.....	14
Obr. 1.6 Průběh kmitočtové závislosti indexu lomu na skupinovém indexu lomu n_s u SiO_2 ..	16
Obr. 1.7 Šíření impulzů světlovodem.....	18
Obr. 1.8 Průběh chromatické disperze u vláken s posunutou disperzní charakteristikou.....	20
Obr. 1.9 Průběh chromatické disperze konvenčního vlákna	21
Obr. 2.1 Schéma polovodičového laseru.....	24
Obr. 2.2 Porovnání Fabry-Perot laserové diody s SOA	25
Obr. 2.3 Závislost výstupního výkonu na zesílení u SOA	26
Obr. 2.4 Schéma stimulované emise v EDFA zesilovačích.....	27
Obr. 2.5 Bloková schéma EDFA zesilovače	27
Obr. 3.1 Schéma optického zesilovače.....	30
Obr. 3.2 Závislost výstupního výkonu SOA1013S na zesílení	31
Obr. 3.3 Butterfly pouzdro SOA1013S	32
Obr. 3.4 Optický konektor SOA, a) vnější stavba, b) vnitřní stavba.....	32
Obr. 3.5 Rozměry DIP pouzdra kontroléru TECA1-XV-XV-D	34
Obr. 3.6 Blokové schéma obvodu TECA1-3V-3V-D	35
Obr. 3.7 Vnitřní schéma obvodu ATLS1A103	36
Obr. 3.8 Low-Dropout charakteristika obvodu LT1084	37
Obr. 4.1 Kalibrovací zapojení modulu SOA	40
Obr. 4.2 Nastavení DIP přepínače SW1	41

SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1 Jednotlivá pásma vlnových délek jednovidových optických vláken	12
Tab. 1.2 Limitní hodnoty chromatické disperze podle ITU-T G.695	19
Tab. 3.1 Parametry optického zesilovače THORLABS SOA1013S.....	33

ÚVOD

Úkolem bakalářské práce je navrhnout zapojení optického zesilovače s obvodem SOA (Semiconductor Optical Amplifier). Hlavními požadavky na navrhované zapojení optického zesilovače je možnost volby zesílení mezi dvěma kalibrovanými hodnotami a velký důraz je také kladen na spolehlivost celého zařízení. Dalším dílčím úkolem je navrhnout mechanickou konstrukci celého zařízení a prozkoumat možnosti dalšího rozšíření. Srdcem navrhovaného zapojení je polovodičový optický zesilovač SOA od firmy Thorlabs [8].

Technologie SOA je poměrně nová a možnosti jejího rozšiřování a uplatnění jsou široké. Optické prvky, mezi které patří i optické zesilovače jsou velmi perspektivní obvodové prvky, které nachází uplatnění v moderních komunikačních technologiích. Při návrhu a konstrukci zařízení tohoto typu je velmi důležitá preciznost, jinak nelze dosáhnout požadovaných výsledků.

V dnešní době se na podobné aplikace využívají zejména zesilovače EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier), které jsou svojí cenou podobné SOA zesilovačům, ale je možné předpokládat, že v blízké době ceny SOA klesnou a tím se na poli optických zesilovačů zvýhodní. Jejich výroba je drahá a proto jen dostatečná poptávka po těchto zařízeních sníží jejich cenu. Ve své podstatě jsou jednoduché a nevyžadují takové množství přesných podpůrných obvodů jako EDFA. Naproti tomu SOA jsou malé, jejich podpůrné obvody nezabírají mnoho místa, tím se zjednodušuje návrh celého obvodového řešení a jejich tepelná ztráta je nízká.

Cílem práce je tedy sestavit zařízení optického zesilovače s obvodem SOA, které by bylo jednoduché, mělo modulární koncepci, bylo tepelně stabilní a s dlouhou životností. Další možnosti rozšíření jsou popsány v kapitole 3. Návrh zesilovače SOA.

Úvodní teoretická část byla zpracována na základě materiálů [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], a jsou v ní uvedeny základní poznatky nutné pro konstrukci vlastního zesilovače SOA.

1 OPTICKÉ VLÁKNO

Optické vlákno je ohebné a průhledné vlákno vyrobeno z oxidu křemičitého, ne většího než lidský vlas, které se chová jako vlnovod a tak přenáší světlo mezi dvěma konci vlákna. Tato vlákna v dnešní době nahrazují kovový drát jako přenosové médium ve vysokorychlostních komunikačních systémech, které dnes převádějí signál na světlo, které je následně přenášeno pomocí optického vlákna.

Alexander Graham Bell, americký vynálezce nejznámější pro vývoj telefonu, se poprvé pokusil komunikovat za pomoci světla v roce 1880. Avšak komunikace za pomoci světelných vln nebyla uskutečnitelná až do poloviny dvacátého století kdy se technika vyvinula natolik, aby poskytla dobrý zdroj optického signálu – laser a efektivní optické médium – optické vlákno. Laser byl objeven v roce 1960 a o šest let později výzkumníci v Anglii objevili první optické vlákno. V roce 1970 byl vyvinut nový typ laseru a první optická vlákna se začaly vyrábět komerčně.

V optických komunikačních systémech, vodiče vyrobené z optických vláken spojují přijímače a vysílače, které seskládají z laserů a detektorů světla. Pro přenos informace vysílač převede analogový elektrický signál (telefonní hovor, video...) na digitální pulzy laserového světla. Tyto pulzy putují přes optická vlákna do přijímače, kde detektor světla převede informace zpět na elektrický signál.

1.1 MATERIÁLY PRO VÝROBU OPTICKÝCH VLÁKEN

Optické vlákna sestávají hlavně z kysličníku křemičitého (SiO_2) i když se často přidává malé množství jiných chemikálií. Vysoce čistý křemičitý písek se používal v dnes už překonaném výrobním procesu, zatímco tekutý chlorid křemičitý (SiCl_4) v plynné páře čistého kyslíku (O_2), je hlavním zdrojem křemíku pro sedimentační metodu výroby, která je dnes nejrozšířenější. Jiné chemické sloučeniny jako například chlorid germaničitý (GeCl_4) a oxychlorid fosforečný (POCl_3) se můžou použít pro výrobu jádra optického vlákna ale i pláště.

Protože čistota a chemické složení skla použitého v optických vláknech určují nejdůležitější vlastnosti vlákna jako je míra útlumu, se výzkum zaměřuje na vyvinutí skel s nejvyšší možnou čistotou. Skla s vysokým obsahem flóru se zdají být nejslibnějšími pro vylepšení vlastností optických vláken, protože jsou průhledná pro téměř celé spektrum světelného záření. Toto z nich dělá velice vhodné kandidáty pro vícevidová optická vlákna, které můžou přenášet stovky diskretních světelných vlnových signálů souběžně.

1.2 PŘENOSOVÉ VLASTNOSTI OPTICKÝCH VLÁKEN

Přenosové vlastnosti optických vláken závisí především od druhu konstrukce vláken. Podle toho rozeznáváme tři typy vláken.

Vlákna mnohavidová s konstantním indexem lomu jádra a skokovou změnou indexu lomu pláště, která se vyznačují jednoduchou výrobou a manipulací, poměrně jednoduchým konstruováním. Jejich nevýhodou je větší útlum, disperze a malá přenosová kapacita. Vyznačují se většími průměry jádra a pláště.

Některé charakteristiky tohoto typu vlákna: $D_j = 50\text{--}200 \mu\text{m}$, $D_p = 120\text{--}300 \mu\text{m}$, disperze $50 \text{ ns} \cdot \text{km}^{-1}$, útlum $5\text{--}20 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$, šířka pásma 60 MHz .

Vlákna tohoto typu jsou nejvíce využívána pro spoje na krátké vzdálenosti, především pro automatizační účely, krátké přenosy dat, lokální sítě apod.

Vlákna mnohavidová s proměnným indexem lomu v příčném řezu vlákna, která se vyznačují menší disperzí, menším útlumem, částečně složitější výrobou a tím složitějším

konstruováním a spojováním vláken. Vláknem je normalizováno dle doporučení ITU-T, $D_j = 50 \mu\text{m}$, $D_p = 125 \mu\text{m}$.

Některé charakteristiky tohoto typu vlákna: disperze při $0,85 \mu\text{m}$ cca $1 \text{ ns} \cdot \text{km}^{-1}$, útlum $2,5\text{--}5 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$, šířka přenášeného pásma 600 MHz .

Vzhledem k uvedeným parametrům tento typ vlákna je výhodný především pro telekomunikační účely a to pro spoje na kratší vzdálenosti.

Vlákna jednovidová s konstantním indexem lomu jádra a skokovou změnou indexu lomu pláště, která se vyznačují velmi malou disperzí, velmi malým útlumem a vysokou přenosovou kapacitou, nacházejí uplatnění především pro dálkové přenosy. V tomto případě se vlákem šíří pouze jeden vid a to ve směru osy. Aby se tohoto stavu mohlo dosáhnout, je zapotřebí zmenšit průměr jádra na hodnotu rovnou jen několika vlnovým délkám světla. Průměry se pohybují $D_j = 7\text{--}9 \mu\text{m}$, $D_p = 125 \mu\text{m}$

Charakteristiky vlákna: disperze cca $0,3 \text{ ns} \cdot \text{km}^{-1}$, útlum $0,2 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$, při vlnové délce $1,55 \mu\text{m}$, šířce pásma 10 GHz .

V případech, kdy se index lomu mění skokem, je často použito označení světlovody vrstvé. V těchto případech je podstata přenosu založena na principu totálního odrazu na rozhraní jádro – plášť. U typu druhého světlovodu se spojitě proměnným indexem lomu tzv. gradientního světlovodu, má dráha paprsku tvar eliptické nebo kruhové spirály.

Vzhledem k tomu, že od průběhu rozložení indexu lomu jsou odvislé přenosové vlastnosti optických vláken, jsou různými výrobci aplikovány další varianty různých profilů indexu lomu [1].

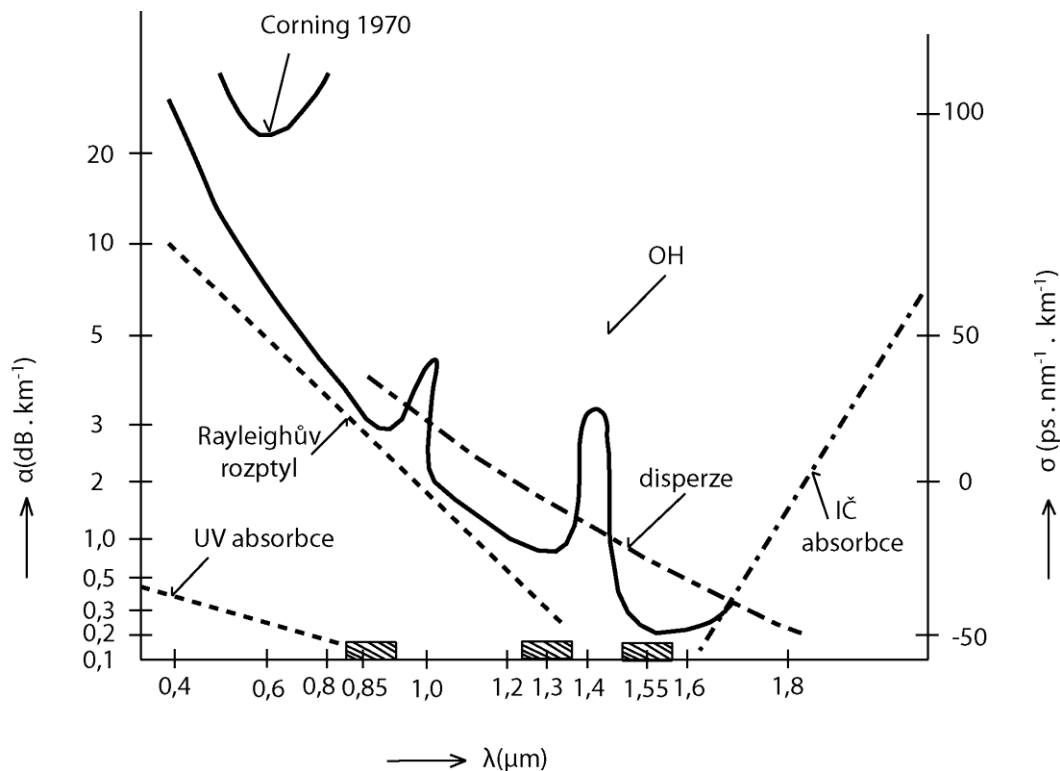
1.3 ÚTLUM OPTICKÝCH VLÁKEN

Útlum optických vláken je především způsobován:

- absorbcí prostředí, v němž se energie záření šíří,
- vyzařováním z vlákna,
- rozptylem na nehomogenitách.

Ztráty absorbcí v ultrafialové a viditelné oblasti jsou způsobeny přechody mezi atomárními a v infračervené oblasti mezi molekulárními úrovněmi základního materiálu, příměsí a nečistot, z nichž mají největší vliv ionty kovů Fe, Cu, Cr, jejichž rezonance na

určitých kmitočtech je provázena tepelnými ztrátami. Rezonanční kmitočet iontů OH, které tvoří hlavní podíl ztrát, odpovídá vlnové délce 2,8 μm , proto leží mimo pásmo využívané pro přenos na optických kmitočtech, avšak druhá harmonická 1,38 μm a třetí harmonická 0,94 μm spadají do oblasti využívaného pásma. Typické rezonanční křivky zapříčiněné ionty OH jsou zřejmé z obr. 1.1 [1]. Pro výrobu vláken o nízkém měrném útlumu je zapotřebí zajistit nízkou koncentraci iontů OH a iontů kovů.



Obr. 1.1 Útlum ve vláknových světlovodech

Ztráty vyzařováním jsou způsobeny lomem šířících se paprsků na rozhraní dvou dielektrických prostředí s různými vlastnostmi, při němž část energie proniká z jádra ven.

Ztráty rozptylem jsou způsobeny tím, že molekuly v amorfním materiálu jsou náhodně rozložené a tvoří mikronehomogenity v indexu lomu materiálu. Jsou-li tyto nehomogenity a drobné nečistoty rozměrově malé proti vlnové délce, pak rozptylovým ztrátám na nich vznikajícím říkáme Rayleighovy ztráty. Tyto ztráty jsou nepřímo úměrné čtvrté mocnině vlnové délky šířícího se záření a rostou velmi rychle směrem k UV oblasti. Charakteristikou Rayleighova rozptylu je jeho všesměrovost.

K uvedeným vyjmenovaným ztrátám se z praktického pohledu dále řadí ztráty způsobené porušením dokonalé geometrie, porušením tvarů a rozměrů hranice mezi jádrem a pláštěm.

Svoji roli sehrávají i trhlínky v materiálu jádra. V neposlední řadě tzv. mikroohyby, pod které zahrnujeme poruchy přímočarosti osy světlovodu.

Útlum, jako důležitou přenosovou veličinu, můžeme definovat následujícím způsobem. Výkon záření o vlnové délce ve vzdálenosti z od počátku vlákna při vstupním výkonu $P(0, \lambda)$ je dán vztahem:

$$P(z, \lambda) = P(0, \lambda) \exp \left[2x \int \gamma(\lambda \cdot z') dz' \right] \quad (1.0)$$

kde $\gamma(\lambda, z')$ je koeficient útlumu na jednotku délky, který obecně může záviset na vzdálenosti od počátku vlákna. Je proto výhodné zavést střední koeficient útlumu vlákna

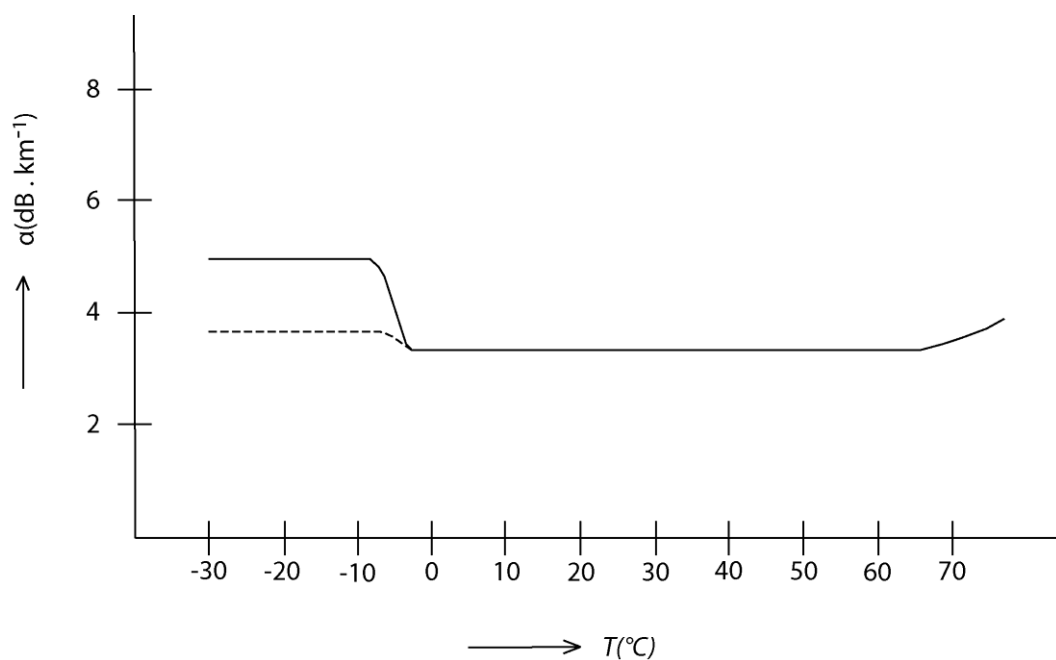
$$\bar{\gamma}(\lambda) = \frac{1}{2} \int \gamma(\lambda \cdot z') dz', \quad (1.1)$$

jímž se závislost (1.1) zjednoduší na přibližný vztah,

$$P(z, \lambda) = P(0, \lambda) \exp[-\bar{\gamma}(\lambda)z]. \quad (1.2)$$

Tento vztah je výchozí pro měření útlumu optického vlákna diferenciální metodou. Je-li zapotřebí měřit přesný výkon ve dvou různých vzdálenostech, dostaneme z rovnice (1.2) vztahy z nichž po úpravě dostaneme koeficient útlumu, který je pro praktické účely udáván v jednotkách $\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$ podle vztahu:

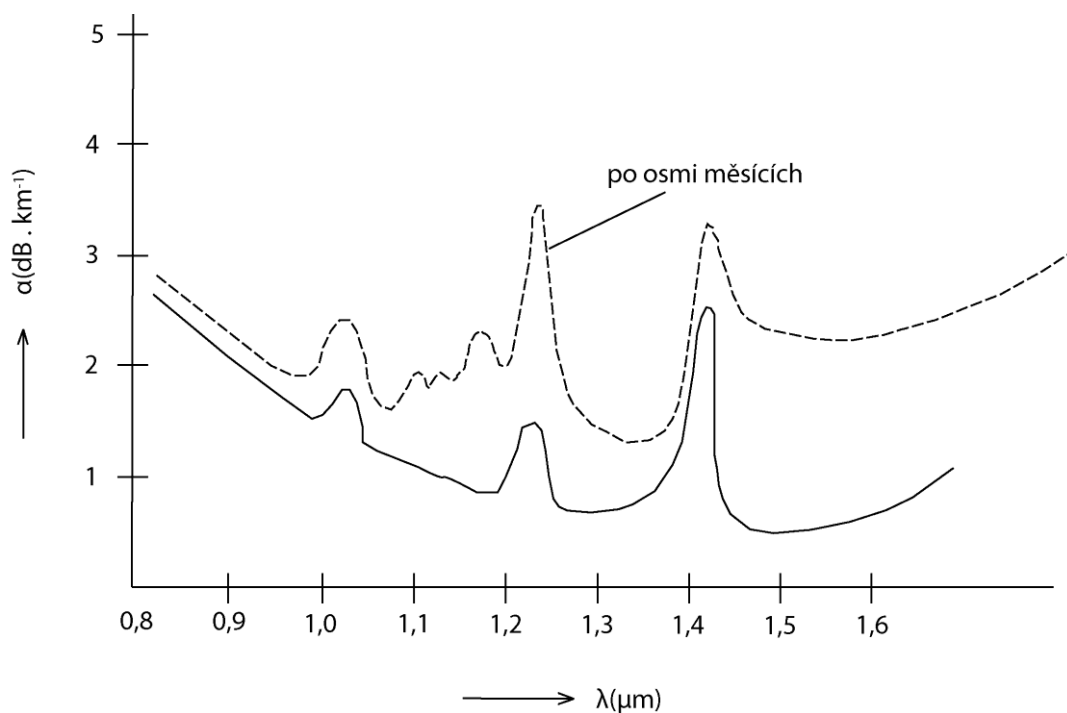
$$\alpha(\lambda) = \frac{1}{z_2 - z_1} 10 \log \frac{P(z_1, \lambda)}{P(z_2, \lambda)}. \quad (1.3)$$



Obr. 1.2 Závislost útlumu světlovodu na teplotě

Na útlumovou charakteristiku mají vliv i další parametry, například se změnou teploty v běžných provozních podmínkách nedochází k výraznému ovlivňování útlumu. Pouze při velkém mrazu vykazují některá vlákna vyšší útlum (při -30°C cca $2\text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$).

Jak vypadá průběh útlumu u vlákna „utopeného“ kabelu (tj. kabel zalitý–zaplavený vodou) po osmi měsících, znázorňuje Obr. 1.3 [1].



Obr. 1.3 Závislost útlumu světlovodu optického kabelu po 8 měsících Při „utopení“ kabelu

Závěrem shrňme získané poznatky o útlumu světlovodů se současnými trendy. Na obr. 1.4 je útlumová charakteristika již s eliminací OH na vlnové délce 1380 nm. Současně jsou popsána nová vlnová okna.

Okno (850 nm) spadá do mnohavidového šíření. Útlumová charakteristika je zde silně klesající a dosahované hodnoty měrného útlumu jsou pro využití zejména v dálkových přenosech příliš vysoké. Díky velmi levným zdrojům záření se přenos využívá u optických přístupových sítí.

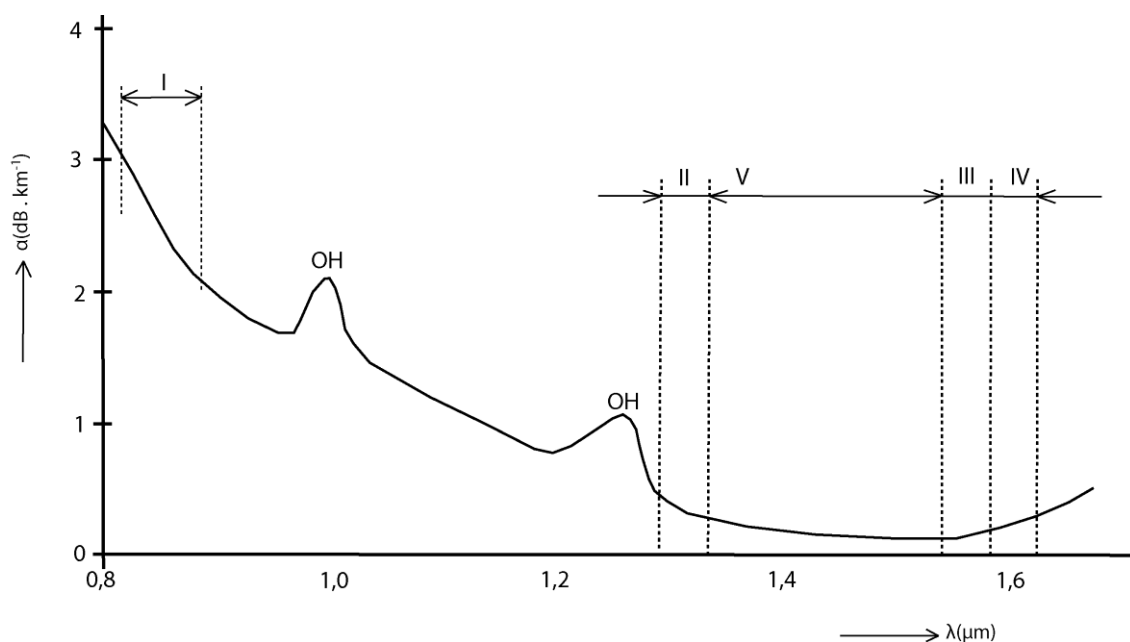
Okno (1280 až 1335 nm) je nejnižším historicky prvním oknem plně využitelným pro jednovidový přenos na vlákne s průměry 9/125 μm . Typicky dosahovaná hodnota měrného útlumu těsně pod $0,35 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$. Toto okno je využíváno pro dálkové přenosy.

Okno (1530 až 1565 nm) je oknem, ve kterém se u standardního křemenného vlákna nachází minimum měrného útlumu, typicky v hodnotách $0,19$ až $0,22 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$. Toto okno je využíváno pro dálkové přenosy (transportní a globální sítě).

Okno (1565 až 1625 nm) se nachází již za absolutním minimem měrného útlumu, které je však natolik ploché, že se útlumové parametry od III. okna liší jen minimálně. Právě pokrok v technice WDM a optických zesilovačů dovoluje při dálkovém přenosu spojeného spektra III. a IV. okna téměř zdvojnásobit přenosovou kapacitu.

Okno (1335 až 1530 nm) je pro přenosové využití dostupné teprve od konce 90. let, kdy byly zvládnuty techniky výroby optického vlákna, eliminující příměsi OH natolik, že se ztrácí lokální maximum útlumu na 1380 nm. Spojená II. až V. okna pak vytvářejí souvislý přenosový kanál o šířce pásma až 50 THz.

Současný trend v přenosu po optickém vlákne je charakterizován k přesunu do II., III., IV. a V. okna, při použití jednovidových světlovodů. Současný nárůst těchto přenosů v porovnání s mnohavidovými se neustále zlepšuje.



Obr. 1.4 Útlumová charakteristika optického vlákna

1.3.1 Typy optických vláken

Je zavedeno i nové značení pásem, jak uvádí tab.1.1. Pro tyto přenosy pak máme dle doporučení ITU-T (skupina G) tato jednovidová vlákna:

Vlákno typu G.652 je standardní optické jednovidové vlákno 9/125 μm , které je také někdy podle specifikace firmy Corning označováno zkratkou USF (Unshifted Fiber). Tato vlákna jsou nazývána Matched Cladding (MC), vzhledem k typické skokové změně indexu lomu na rozhraní jádra a pláště vlákna. Zvláštní skupinu tvoří vlákna s tzv. vnořeným indexem lomu, u kterých je index lomu pláště v okolí jádra nižší než v samotném plášti optického vlákna, které je vyrobeno z čistého křemičitého skla bez dodatečných příměsí.

Pásmo	Název	Rozsah [nm]
O	Original	1260-1360
O	Extended	1360-1460
S	Short	1460-1530
C	Conventional	1530-1565
L	Long	1565-1625
U	Ultra-long	1625-1675

Tab. 1.1 Jednotlivá pásma vlnových délek jednovidových optických vláken

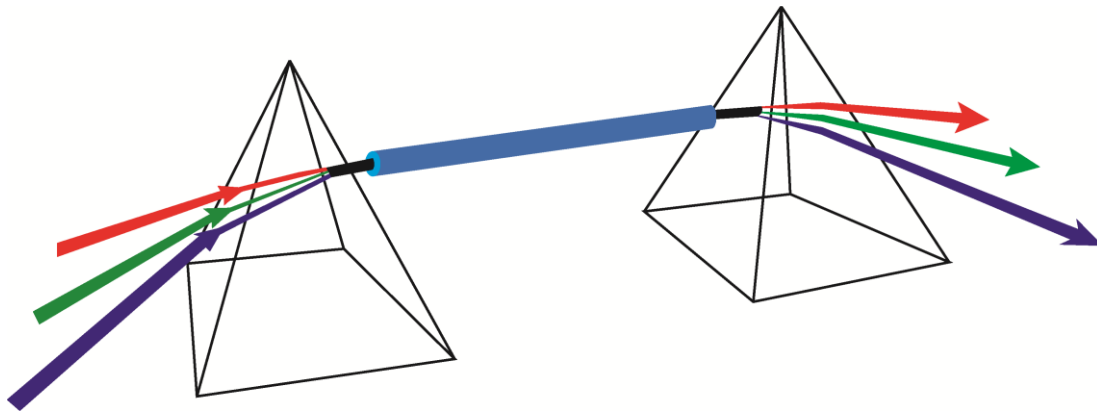
Vlákno typu G.652.C jako nový typ je dnes k dispozici vlákno typu G.625.C, které lze na rozdíl od běžného vlákna G.652 provozovat v celém rozsahu vlnových délek a využít všechna dostupná přenosová pásma, včetně pásma E (1360–1460 nm). To dříve nebylo možné využít, protože klasická optická vlákna mají v této oblasti zvýšený vložný útlum vlivem rezonancí na absorbovaných iontech vody OH^- , které se do vlákna dostaly při výrobě.

Vlákno typu G.652.D Allwave vlákno, je kompatibilní se všemi vlákny H.652.

Vlákno typu G.653 byla vyvinuta s cílem potlačení chromatické disperze pro vlnovou délku 1550 nm. Tato vlákna se označují jako vlákna DSF (Dispersion Shifted Fiber). Používají se pro vyšší přenosové rychlosti na velké vzdálenosti s jedinou provozovanou vlnovou délkou. Jakmile však bylo třeba nasazovat v praxi systémy vlnového duplexu DWDM s více vlnovými délkami, zjistilo se, že tato vlákna mají vedlejší efekt. Ten spočívá v překrývání jednotlivých vlnových délek a vytváření vedlejších parazitních kanálů a přeslechů.

Vlákna typu G.654 byla vyvinuta jako speciální varianta vláken G.652. Tato vlákna jsou optimalizována pro co nejnižší vložný útlum v pásmu 1550 nm a mají posunutou mezní vlnovou délku (vlnová délka, do které fungují jako jednovidová). Jsou nákladná, používají se téměř výhradně k extrémním dálkovým přenosům pro podmořské kabely bez zesilovače na trase.

Vlákna typu G.655 s posunutou nenulovou disperzí (NZ-DSF, Non Zero – Dispersion Shifted Fiber) jsou optimalizována pro přenosovou oblast v pásmu 1550 nm. Tato vlákna se dnes používají především v dálkových optických sítích a na rozdíl od vlákna typu G.653 nemají nulovou disperzi pro vlnovou délku 1550 nm. Malá nenulová disperze je nutná, aby se zde příliš neprojevovaly vedlejší nelineární efekty. Tento typ vlákna je určen k provozu technologie DWDM a pro vysoké přenosové rychlosti.



Obr. 1.5 Ilustrace vlnového multiplexu

Vlákna typu G.656 s posunutou nenulovou disperzí (NZ-DSF, Non-Zero Dispersion Shifted Fiber) jsou optimalizována pro přenosovou oblast v pásmu 1460–1625 nm. Tato vlákna jsou určena pro systémy vlnového multiplexu DWDM a CWDM. V pásmu S umožňují u systému DWDM až 40 kanálů. Maximální chromatická disperze je stanovena od 2 do 14 $\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, maximální polarizační disperze $0,20 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$.

Vlákno typu G.657.A pro vnitřní kabeláže a pro optické přístupové sítě.

Vlákno typu G.657.C nový typ vlákna, které je odolné na mikroohyby do poloměru 5 mm.

Při spojování vláken na konektorech a obecně na všech nehomogenitách ve vláknech vznikají odrazy. Vytvářejí se tak náhodné rezonátory o různých frekvencích, které mohou narušovat funkci laserů a optických zesilovačů, nebo způsobovat interferometrické šумы. Doporučení obecně připouštějí celkové odrazy trasy ne více než -27 dB.

Průběhy skutečných vláken se mohou lišit v závislosti na čistotě skla a použitých dopantech, avšak charakteristické průběhy na příslušných vlnových délkách budou zachovány [1].

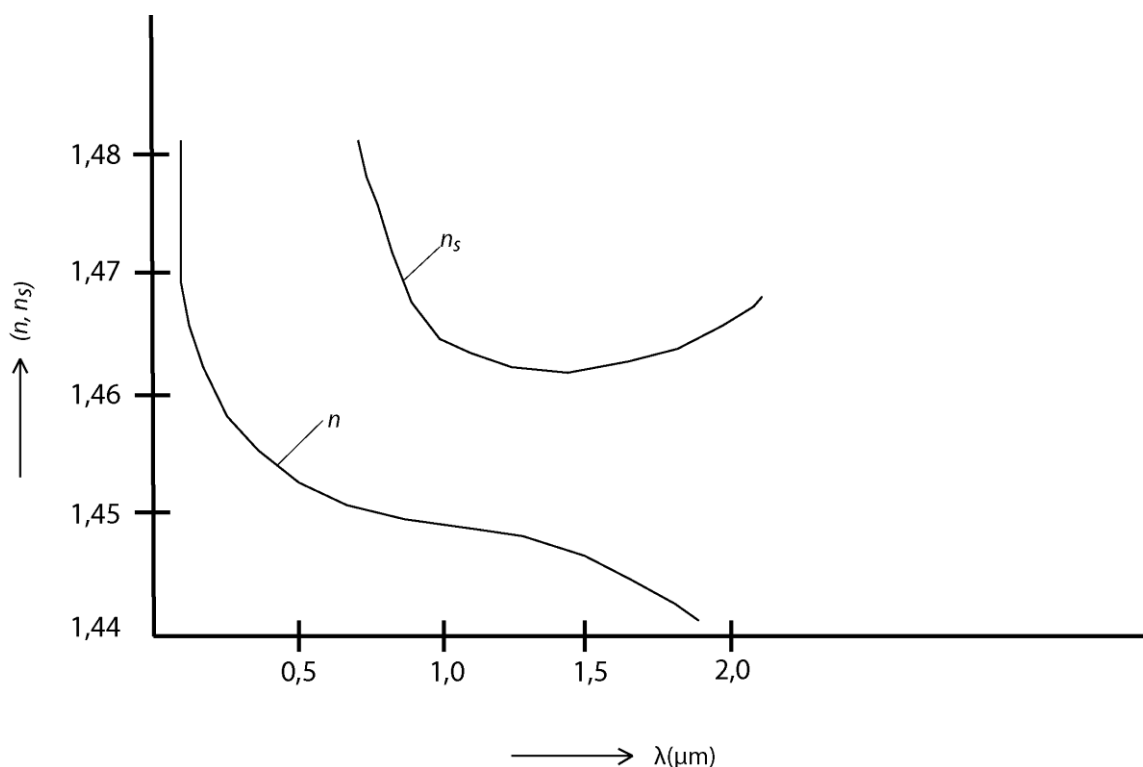
1.4 DISPERZE

Disperze vln v optických vláknech je hlavní příčinou zkreslení přenášeného signálu a definuje se jako rozdíl šířky impulsu v polovině výšky na konci a na začátku vlákna. Kmitočtová závislost indexu lomu, která vyvolává kmitočtovou závislost skupinové a fázové rychlosti šíření vlny v materiálu, z něhož je světlovod vyroben, je příčinou materiálové disperze.

Ve světlovodu se materiálová disperze vidu kombinuje s disperzí vlnovodovou, způsobenou změnami geometrie vidu a tím i změnami podélné skupinové i fázové rychlosti šíření při změně kmitočtu. Výsledný účinek materiálové a vlnovodové disperze bývá označován jako disperze chromatická.

Je-li šířící se energie rozdělena do více vidů, přistupuje k chromatické disperzi ještě disperze vidová, způsobená rozdílnou rychlostí šíření jednotlivých vidů. Zkreslení přenášeného signálu způsobené chromatickou disperzí lze zmenšit zúžením jeho kmitočtového spektra, vliv vidové disperze můžeme redukovat zmenšením počtu vidů účastnících se přenosu vhodnou volbou konstrukčních parametrů světlovodu, v mezním případě až na jeden vid – jednovidový světlovod.

Materiálová disperze je zapříčiněna rozdílnými rychlostmi šíření paprsků o různých vlnových délkách, což je způsobeno nelinearitou kmitočtového průběhu indexu lomu, jak je patrné z obr. 1.6 [1].



Obr. 1.6 Průběh kmitočtové závislosti indexu lomu na skupinovém indexu lomu n_s u SiO_2

Vlnová disperze způsobuje rovněž rozšiřování impulzů přenášených světlovodem. Příčinou je, že konstanta šíření je pro každý vid různá, tím se mění jeho kmitočet, což má za následek změnu rychlosti šíření. V mnohavidových světlovodech se skokovou i gradientní změnou profilu indexu lomu lze vliv vlnovodné disperze zanedbat. Musí však být uvažována v jednotlivých vláknech, kde se podstatně podílí na celkové disperzi tohoto vlákna. Hodnota disperze se pohybuje kolem $2 \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ při vlnové délce $1,3 \mu\text{m}$.

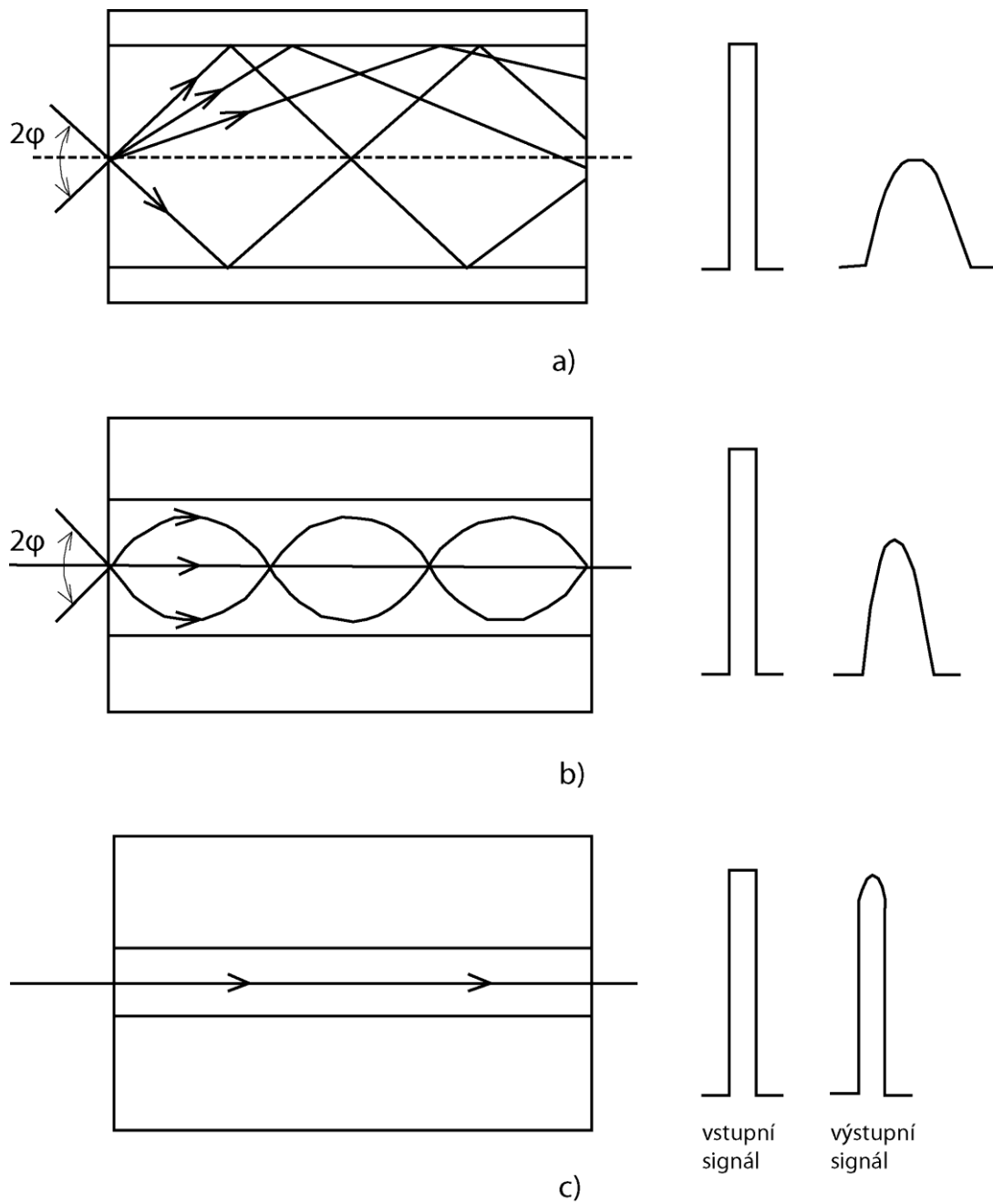
Chromatická disperze je tvořena disperzí materiálovou a vlnovodnou je tedy způsobena nelineární kmitočtovou závislostí skupinové rychlosti šíření vidu ve světlovodu. Šířka pásma světlovodu je nepřímo úměrná šířce pásma zdroje záření. Tak např. polovodičový laser s typickou hodnotou poměrné šířky spektra umožňuje přenášet 400 krát širší pásmo než luminiscenční dioda s typickou poměrnou šířkou spektra 0,04.

Pro světlovod lze volit takový kmitočet, že chromatická disperze ve středu přenášeného pásma je nulová. Praktickým důsledkem u SiO_2 jednovidového vlákna je přesunutí pracovního režimu z vlnové délky $1,28 \mu\text{m}$, při které je materiálová disperze nulová na vlnovou délku cca $1,33 \mu\text{m}$, kdy je nulová chromatická disperze. U jednovidových světlovodů lze tímto způsobem rozšířit přenášené pásmo.

Vidová disperze je hlavním činitelem, který omezuje šířku přenášeného pásma u mnohavidových světlovodů s homogenním jádrem. Vidovou disperzi u těchto světlovodů lze vysvětlit pomocí názorné metody geometrické optiky. Čím je úhel mezi trajektorií paprsku s osou světlovodu větší (čím vyšší vid), tím je delší jeho dráha mezi vstupem a výstupem světlovodu a jeho podélná rychlost ve směru osy světlovodu je menší. Z toho důvodu se vyšší vidy, které jsou blíže svému meznímu kmitočtu, šíří pomaleji než vidy nižší. Pak v jednotkové vzdálenosti od počátku světlovodu bude mezi jednotlivými vidy časový rozestup daný rozdílem jejich skupinových zpoždění.

U jednovidového světlovodu nehraje vidová disperze žádnou roli, jeho přenosové vlastnosti jsou dány jen materiálovou disperzí.

Výše uvedené náhledy na danou problematiku jsou informativně znázorněny na obr. 1.7. Je ukázán průběh vstupního a výstupního impulsu po průchodu jedním ze základních tří typů světlovodů [1].



Obr. 1.7 Šíření impulzů světlovodem: a) mnohovidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu, b) mnohovidové gradientní vlákno, c) jednovidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu

1.4.1 Chromatická disperze

Jak bylo uvedeno v předcházející kapitole, chromatická disperze se uplatňuje i u jednovidových vláken. Přenos jednovidovým vláknem je dán podmínkou přenosu prvního kořene Besselovské funkce, za podmínky

$$v = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \cdot NA \leq 2,405. \quad (1.4)$$

Vlnová délka je dána. Současné technologické možnosti nám umožňují měnit jádro a tím i ovlivňovat průběh chromatické disperze.

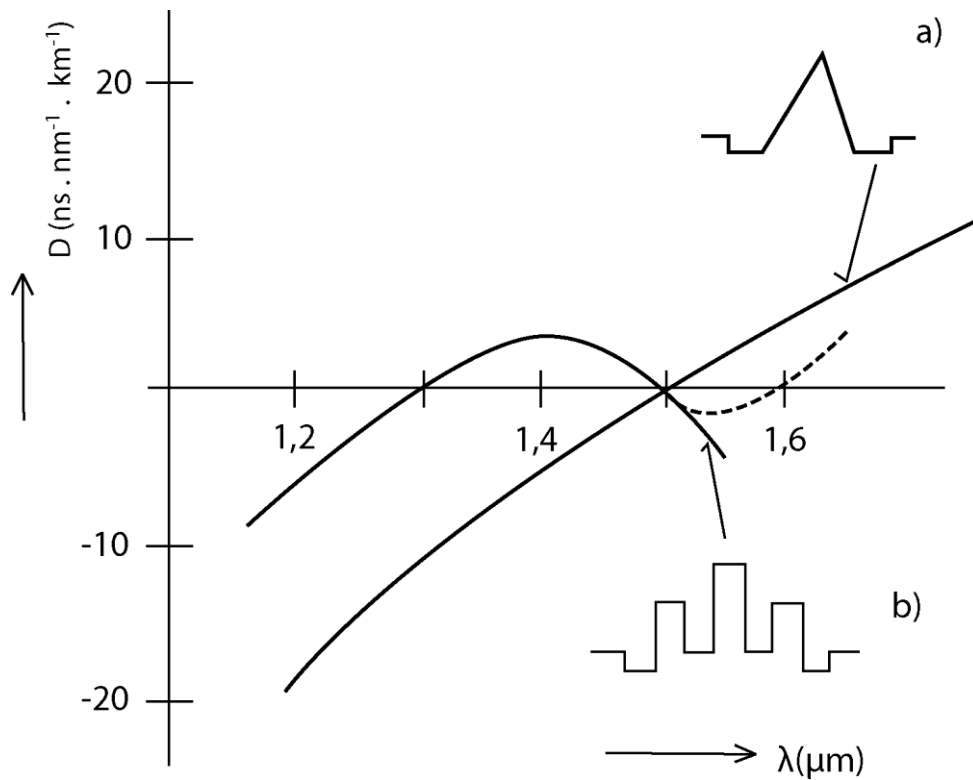
Chromatická disperze se v podstatě donedávna neměřila. Potřeba jejího měření začala vzrůstající potřebou přenosových kapacit a nástupem systémů, jež používají hustého vlnového multiplexu DWDM (Dense Wavelength Division Multiplex). Při takových přenosech se optickým vláknem najednou šíří různé spektrální složky signálu (odlišných vlnových délek) různou rychlostí. Signál vždy obsahuje více spektrálních složek. V tomto případě se nám budou některé složky vstupního impulsu signálu při průchodu optickým vláknem zpožďovat. Impuls se nám tedy bude průchodem optickým vláknem časově roztahovat a takto zdeformovaný impuls bude zasahovat do vedlejších bitových mezer a dojde ke zkreslení přenášené informace. Velikost chromatické disperze optického vlákna charakterizuje tzv. koeficient chromatické disperze

$$D(\lambda) = \frac{dt_g(\lambda)}{d(\lambda)} \quad (1.5)$$

Udávající změnu skupinového zpoždění signálu t_g při průchodu vláknem v závislosti na vlnové délce λ . Maximální hodnoty koeficientu udává rozšíření impulsu (Gaussovského) v ps, při užití zdroje záření se spektrální pološířkou 1 nm, po průchodu vláknem délky 1 km.

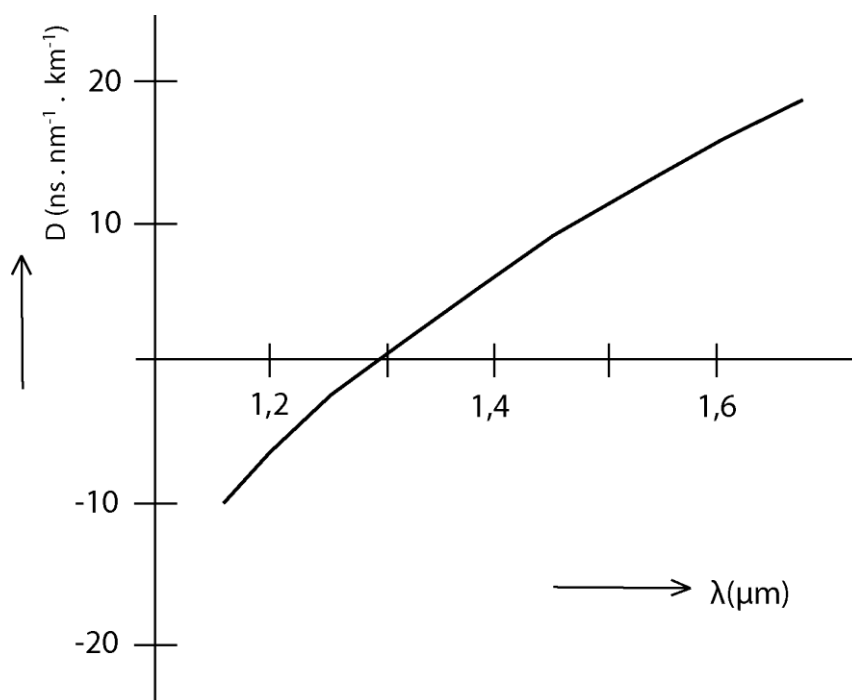
Vlnové délky λ [nm]	Koeficient chromatické disperze $D(\lambda)$ [ps · nm ⁻¹ · km ⁻¹]
1291-1351	5,7
1311-1371	6,8
1391-1451	11,5
1531-1591	19,9
1471-1611	21,1

Tab. 1.2 Limitní hodnoty chromatické disperze podle ITU-T G.695



Obr. 1.8 Průběh chromatické disperze u vláken s posunutou disperzní charakteristikou

Klasický průběh chromatické disperze je uveden na obr. 1.8. Jak bylo již řečeno, technologicky se dá připravit vlákno tak aby i v oblasti vlnové délky $1,55 \mu\text{m}$ se hodnoty disperze snížili k nule. Tyto případy vláken DS (Dispersion-Shifted), jsou uvedeny na obr. 1.9. Pod označením a) je tzv. vlákno s posunutou disperzní charakteristikou, pod b) vlákno s plochou disperzní charakteristikou [1].



Obr. 1.9 Průběh chromatické disperze konvenčního vlákna

1.5 NELINEÁRNÍ JEVY PŘI OPTICKÉM PŘENOSU

V posledních letech se začaly řešit jak po teoretické, tak i po praktické stránce problémy nelineárních jevů. Dále uvedeme jen základní pojmy, širší řešení by přesahovalo rámec této publikace.

Vznik nelineárních jevů je podmíněn velkými hustotami světelného výkonu ve vlákne. Problém je v tom, že vlákna mají velmi malý průřez jádra a s příchodem systémů vlnového multiplexu se do delších tras začaly začleňovat optické zesilovače, které několikanásobně zvyšují výkon ve vlákne. Pokud máme systém pracující s několika desítkami kanálů, tak výkon všech laserů se musí sečíst. Při návrhu tras s přenosovými rychlostmi $10 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ a víc na jeden kanál je nutno tuto problematiku řešit.

Stimulovaný rozptyl je nelineární fyzikální jev, při němž dochází k rozptylu světelné vlny srážkami s akusticky nebo tepelně kmitajícími atomy vlákna. Při rozptylu dochází i k mírnému posuvu vlnových délek směrem k vyšším hodnotám.

Brillouinův rozptyl je vyvolán podélnou akustickou vlnou vzniklou elektrostrikcí a rozptýlená vlna je spektrálně posunuta o cca 10 GHz. Jeho velikost závisí na úhlu rozptylu, maximum energie je rozptýleno ve zpětném směru. Brillouinův rozptyl je zvláště

významný pro signály s úzkou šířkou čáry, a proto je tento jev možné účinně potlačit snížením koherentní délky signálu, neboli rozšířením spektra signálu.

Ramanův rozptyl podstatou je vzájemná interakce světla šířícího se v určitém prostředí s tímto prostředím, jejímž důsledkem je frekvenční posuv. Rozptýlená světelná vlna se šíří oběma směry. Kritický výkon závisí opět na materiálu a dále na počtu, středním výkonu a vzájemném odstupu optických kanálů. Na praktické využití Ramanova jevu v telekomunikačních systémech však byla potřeba až do poloviny 80. let, kdy výzkum stimulovaného Ramanova jevu vyústil v jeho praktické nasazení jako zesilujícího prvku, v prostředí jednovláknových vláken.

Vlastní fázová modulace je výsledkem působení optického impulsu na sebe. Růst a pokles výkonu na hranách optického impulsu vede ke změnám jeho fáze šíření a tím k jeho tvarovému zkreslení a rozšíření jeho spektra, které můžeme v disperzním prostředí zpětně dále ovlivňovat jeho tvar. Při přílišném rozšíření impulsů pak dochází k jejich překrytí v mezisymbolové interferenci a následně k chybám přenosu.

Křížová fázová modulace je principiálně podobným jevem jako vlastní fázová modulace, avšak za podmínek, kdy signál jedné vlnové délky fázově moduluje signál vlnové délky jiné. Dochází proto k němu jen u vícekanálových optických systémů.

Čtyřvlnné směšování je nelineární jev, při němž interakcí signálů dvou a více vlnových délek vznikají signály nových vlnových délek. Je to obdobný efekt z elektrotechniky, kdy při modulaci vznikají intermodulační produkty [1].

2 ZDROJE SVĚTLA

Zdroje záření tvoří jednu ze základních optoelektrických částí telekomunikačního spoje. I když jako zdroj optického záření můžeme v zásadě použít jakýkoliv světelný zdroj, je například použití žárovky pro současné požadavky zcela nevhodné a to z důvodů malé energie a nevýhodné vyzařovací charakteristiky. Z toho důvodu byly a jsou v laboratořích zabývajících se zdroji záření velmi intenzivně studovány zdroje na bázi pevné fáze generující záření při pokojové teplotě, a to jsou polovodičové zdroje, z nich pak je zájem soustředěn především na luminiscenční diody a laserové diody.

Požadavky, které jsou kladeny na optické zdroje, jsou především tyto:

- co největší účinnost konverze elektrické energie na energii zářivou,
- generace záření na takových vlnových délkách, kde útlum stávajících optických vláken je nemenší,
- generují záření při pokojových teplotách,
- mají vysokou spolehlivost a životnost (otázka laserů),
- snadnou modulovatelnost v širokém rozsahu, především změnou injekčního (napájecího) proudu,
- vysokou monochromaticnost resp. koherenci generovaného záření,
- co nejužší směrovou charakteristiku vystupujícího záření,
- snadnou zapojitelnost generovaného záření na optické vlákno,
- v posledním řadě malé rozměry a váhu.

Pro optické telekomunikační přicházejí v úvahu tyto druhy zdrojů:

- nekoherentní – luminiscenční polovodičové diody (LED – Light Emitting Diode),
- koherentní – lasery: především polovodičové (LD – Laser Diode), pro speciální použití i lasery plynové, pevnolátkové a barvivové.

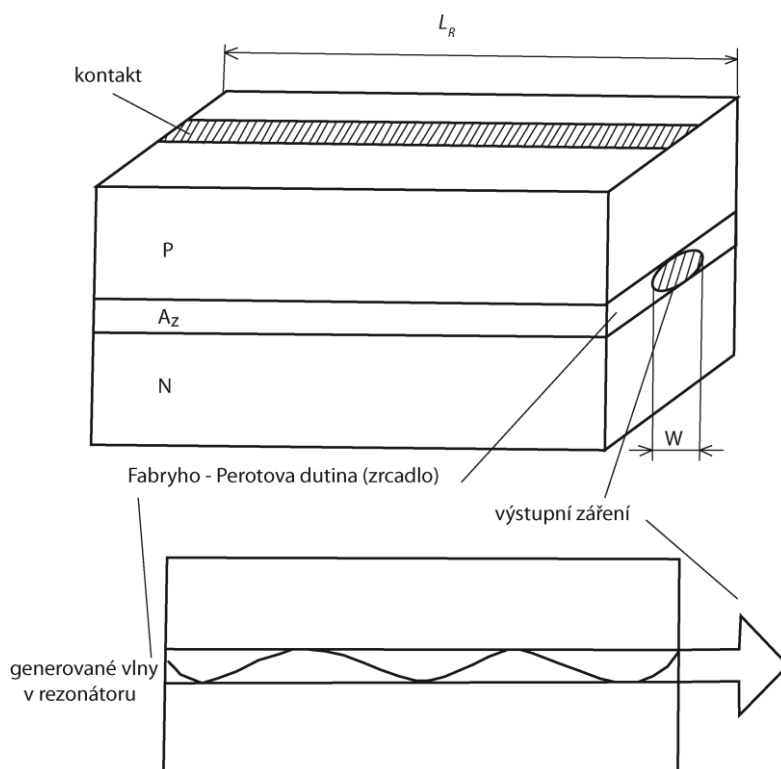
2.1 LUMINISCENČNÍ DIODY

Při prvním přiblížení luminiscenční diody (LED) jsou levné, lehce dostupné, mají dlouhou životnost, snadno modulují, mají však velkou divergenci výstupního svazku a vyzařují menší výkon (v porovnání s LD), na všech vlnových délkách vhodných pro telekomunikační přenosy.

2.2 LASEROVÉ DIODY

Laserové polovodičové zdroje (LD) se vyznačují vyšším vyzařovaným výkonem, menší spektrální šířkou, vysokou účinností vazby na vlákno, možností modulovat do vyšších frekvencí (GHz, $\text{Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$), na straně druhé však vyžadují vyšší napájení, teplotní stabilizaci, jsou nejpravděpodobnějším místem vzniku poruch na optických traktech (provádí se zálohování, jejich životnost se však neustále zvyšuje) a jsou dražší.

Oba prvky (LED a LD) jsou z pohledu malých rozměrů, snadného napojení na optická vlákna a snadné modulovatelnosti velmi používané v telekomunikační praxi. Pro méně náročné aplikace tam, kde není zapotřebí dodržet směrovost optického svazku a pro přenosy na kratší vzdálenosti tam, kde je zapotřebí vyzařovat v úzkém svazku, je zapotřebí přenášet více vlnových délek (vlnový multiplex – WDM), se v zapojení používají laserové polovodičové diody (LD) [1].

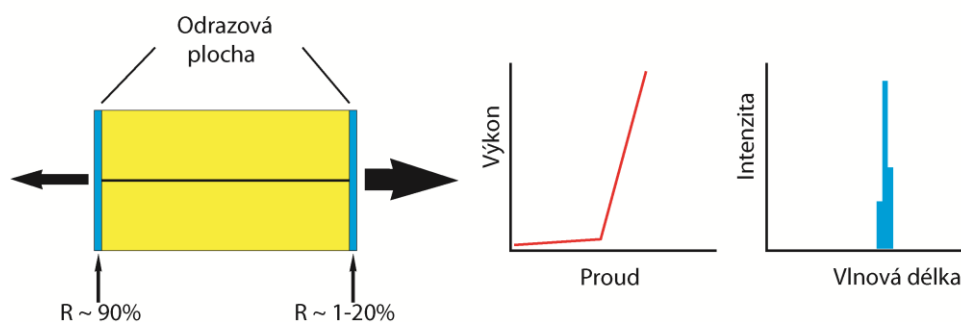


Obr. 2.1 Schéma polovodičového laseru

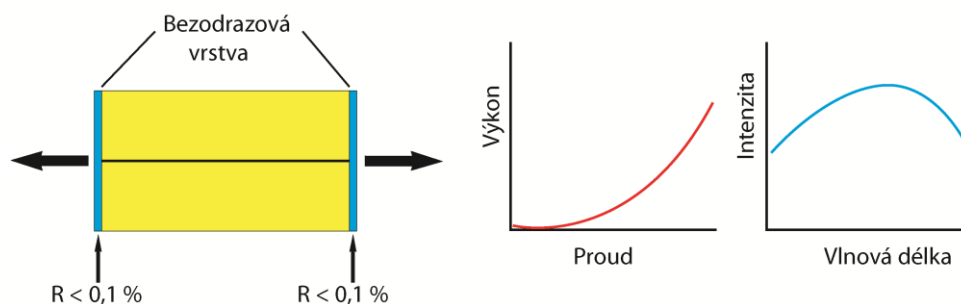
2.3 SOA

Polovodičové optické zesilovače (SOA) jsou podobné ve své konstrukci s Fabry-Perot laserovými diodami. Rozdíl spočívá v tom, že Fabry-Perot laserové diody mají odrazovou vrstvu na obou koncích polovodičového čipu. Optická zpětná vazba z konců vytvoří dutinu ve které může vznikat laserové záření. SOA mají však bezodrazovou vrstvu (AR-Anti Reflection) na obou koncích polovodičového čipu. Bezodrazové vrstvy omezují optickou zpětnou vazbu zpátky do čipu tak že se laserové záření navenek neprojeví.

Typická Fabry-Perot Laserová dioda



Polovodičový optický zesilovač

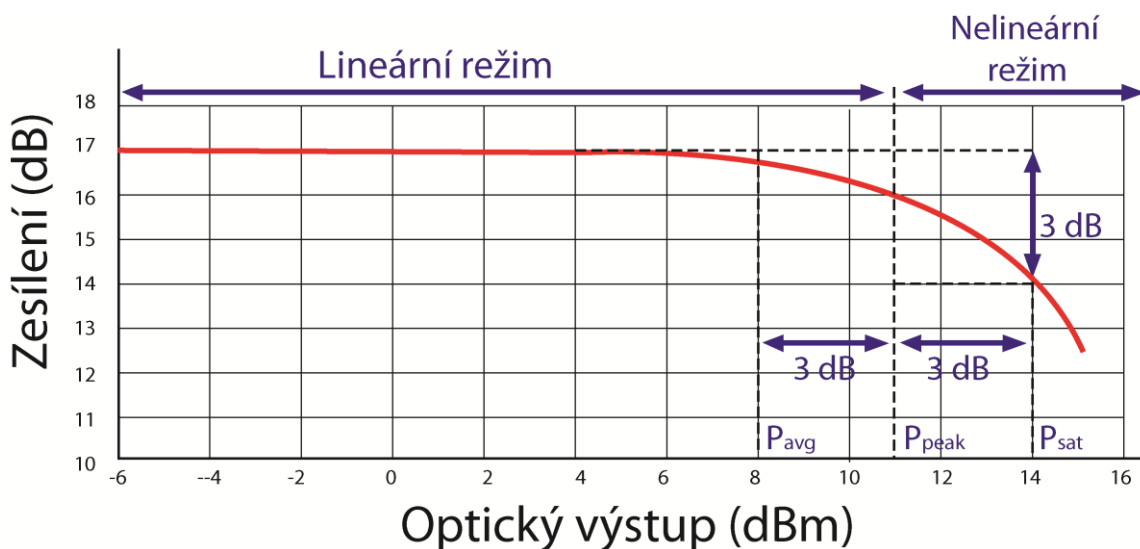


Obr. 2.2 Porovnání Fabry-Perot laserové diody s SOA

Tak jak všechny zesilovače i SOA mohou pracovat ve dvou režimech: lineární, plochý s konstantním zesílením, a stejně tak nelineární se saturovaným výstupem. Při použití na zesílení modulovaného signálu se běžně používá lineární režim pro odstranění vzorkovacího zkreslení, vícekanalových přeslechů a problémů s přechodní odpovědí častých na EDFA zesilovačích. Nelineární režim se používá pro získání vysoko nelineárních atributů polovodičového zesilovacího média (křížová zesilovací modulace, křížová fázová modulace)

pro převod vlnových délek, optické regenerace, detekce záhlaví, a u ostatních vysokorychlostních zpracováních signálu.

Pro vstupní signál spojitě vlny se množství výkonu, který může zesilovač dodat určí ze saturovaného výstupního výkonu (P_{sat}). P_{sat} je definován jako výstupní výkon, při kterém zesílení pokleslo o 3 dB. Maximální množství spojitěho výstupního výkonu, který je možno dodat, je přibližně o 3 dB vyšší jako saturovaný výkon.



Obr. 2.3 Závislost výstupního výkonu na zesílení u SOA

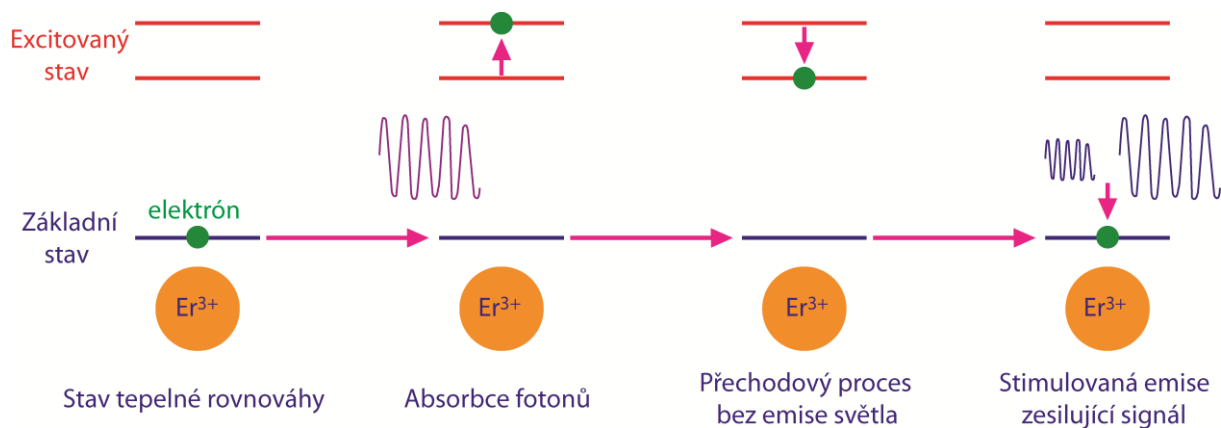
2.4 EDFA ZESILOVAČE

EDFA zesilovače dnes patří mezi nejpoužívanější zesilovače v optické komunikaci. Zajišťují přenos dat přes atlantický oceán i tichý oceán kde leží tisíce kilometrů optického kabelu a signál je tak značně utlumen a musí být zesílen.

Zjednodušené blokové schéma EDFA zesilovače je uvedeno na obr. 2.5 [8]. Je tvořen laserovým zdrojem záření, tzv. laserovou pumpou a speciálním optickým vláknem, které je dopované prvky vzácných zemin (Er/Yt).

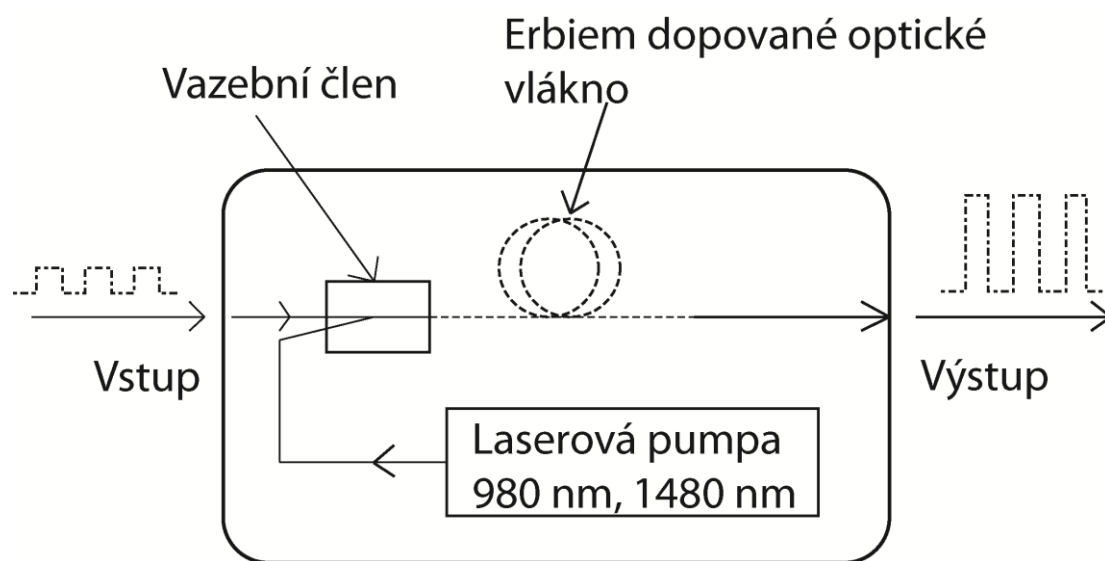
Vlivem navázaného záření z *laserové pumpy* (o vlnové délce 980 nm nebo 1480 nm) do speciálního vlákna o délce několika metrů, dochází k excitaci atomů dopovaného prvku na vyšší energetické hladiny. Tak je v nich dočasně uložena energie získaná ze záření laserové pumpy. K jejímu uvolnění dochází vlivem přítomnosti přenášeného signálu, jehož energie způsobuje stimulovanou emisi záření o shodné vlnové délce a fázi s přenášeným signálem.

Tím dochází k zesílení přenášeného optického signálu.



Obr. 2.4 Schéma stimulované emise v EDFA zesilovačích

Optovláknové zesilovače umožňují zvýšení úrovně signálu až o 50 dB (jeden kanál, C-pásmo). Vnitřním uspořádáním zesilovače lze dosáhnout velkého rozsahu zesilovaného pásma a tak zesilovat současně signál v C i L pásmu.



Obr. 2.5 Blokova schéma EDFA zesilovače

Z principu funkce EDFA vyplývají různé možnosti nasazení v optickém přenosovém systému. Zesilovače mohou být aplikovány v zásadě čtyřmi způsoby:

Booster se umísťuje hned za optický vysílač a slouží k zesílení jeho signálu na maximální úroveň, kterou lze do vlákna navázat. Musí být schopen pojmout poměrně velký vstupní signál z optického vysílače.

In-line zesilovač. Tento zesilovač je umístěn na trase optického vlákna, zesiluje malý vstupní signál na co největší výstupní signál.

Předzesilovač slouží k zesílení velice nízkých úrovní signálu na úroveň dostatečnou pro správnou funkci optického přijímače na konci přenosové trasy. U předzesilovače je kladen požadavek na jeho minimální vnitřní šum [8].

3 NÁVRH ZESILOVAČE SOA

Když jsem byl postaven před zadání konstrukci optického zesilovače s obvodem SOA, musel jsem zvážit několik základních věcí.

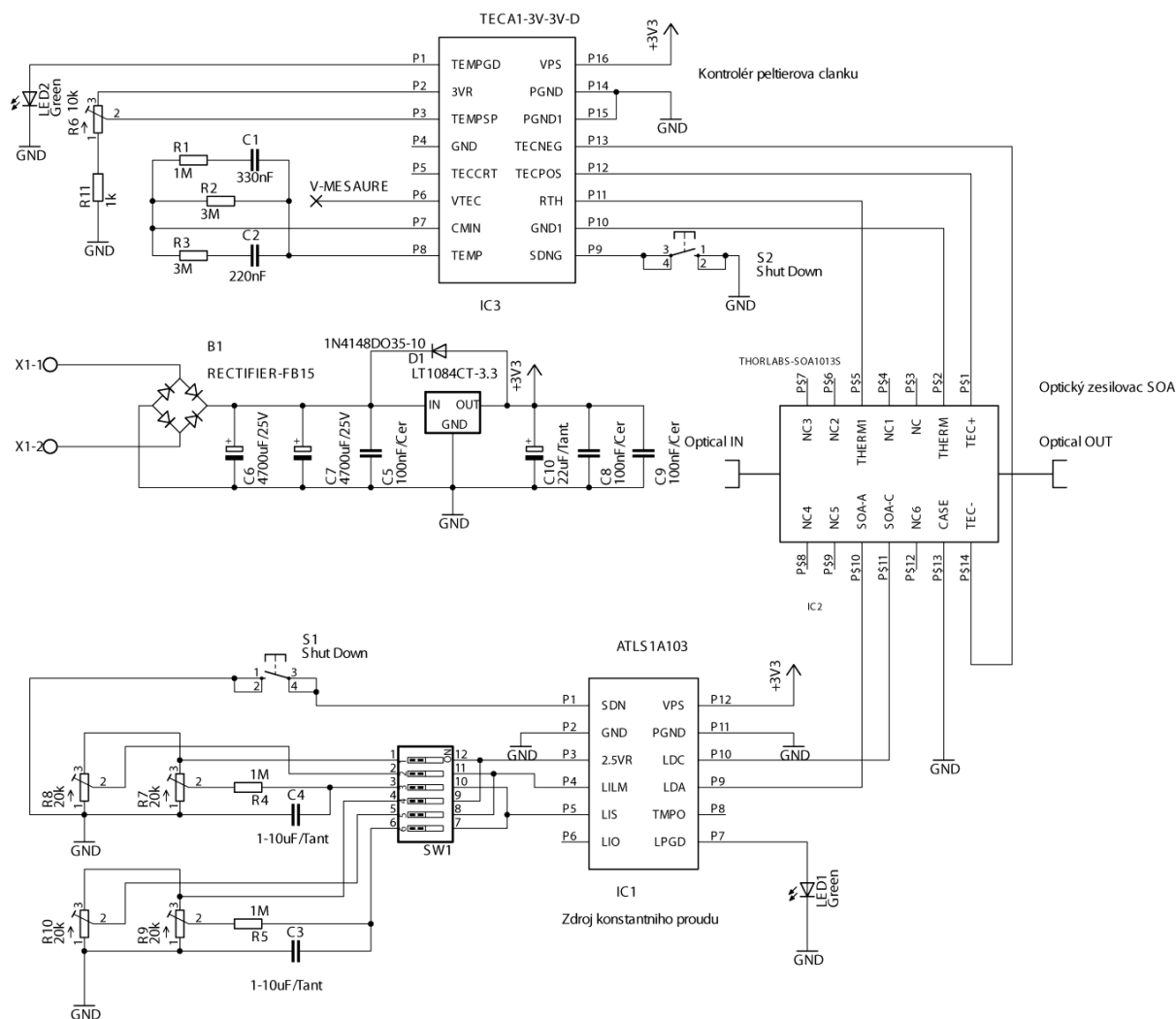
Cena. SOA moderní technologie a ceny jsou vysoké. Jedná se o specializovaný obvod, který musí splňovat vysoké parametry a požadavky pro přenos po optickém médiu. V závislosti na ceně SOA jsem vybral i podpůrní specializované integrované obvody. Ty mají ověřené a dobře zdokumentované parametry, nízké EMI (Electro Magnetic Interference) a dokonce nepotřebují při dané výkonové ztrátě chladicí prvky.

Stabilita. Další věc, kterou bylo třeba zvážit byla tepelná stabilita. Proto pro stabilizátor ve zdroji bude potřeba použít chladič. Při výběru externích součástek jsem zvolil odpory SMD $P_Z = 0,25 \text{ W Tol.} = 1 \%$. Stejně tak kde bylo možné, jsem použil tantalový kondenzátor, tak aby zařízení mělo dlouhou životnost.

Po pečlivém zvážení možností jsem se rozhodl pro obvody ATLS1A103 (zdroj konstantního proudu pro laser), TECA1-XV-XV-D (kontrolér Peltierova článku) a LT1084CT-3.3 (lineární 3.3 V stabilizátor pro napájení zesilovače). Tyto obvody jsou přímo určené pro použití v SOA zesilovači a svými vlastnostmi zaručí bezproblémový chod.

Zesilovač bude pracovat v pásmu C (Conventional) 1530–1565 nm. Pro linku na které má být zesilovač použit bude nutno nastavit saturovaný výkon cca 10 dB, nakolik pro trasy dlouhé 100–150 km je jejich útlum 30–38 dB a citlivost detektorů je cca 30 dB.

Chlazení samotného obvodu SOA je řešeno pomocí Peltierova článku, který je integrován přímo v součástce. Proto je nutné součástku připevnit na chladič a dostatečnou tepelnou vodivost zajistit pomocí tepelně vodivé pasty. Chladič může být spojený se zemním potenciálem. Pasivní chlazení by mělo postačovat, avšak kovová skříň, ve které bude zařízení umístěno, by měla být větrána pomocí ventilátoru.



Obr. 3.1 Schéma optického zesilovače

Zařízení je navrhováno robustné a spolehlivé. Mechanicky by mělo být uloženo v krabici 2U nebo 3U. S jediným zdrojem a dvěma pozicemi pro moduly optického zesilovače, pro budoucí rozšíření. SOA bude připevněno na dostatečně velkém chladiči a skříň bude větrána dvěma ventilátory, tak aby se zajistila teplotní stabilita celého přístroje.

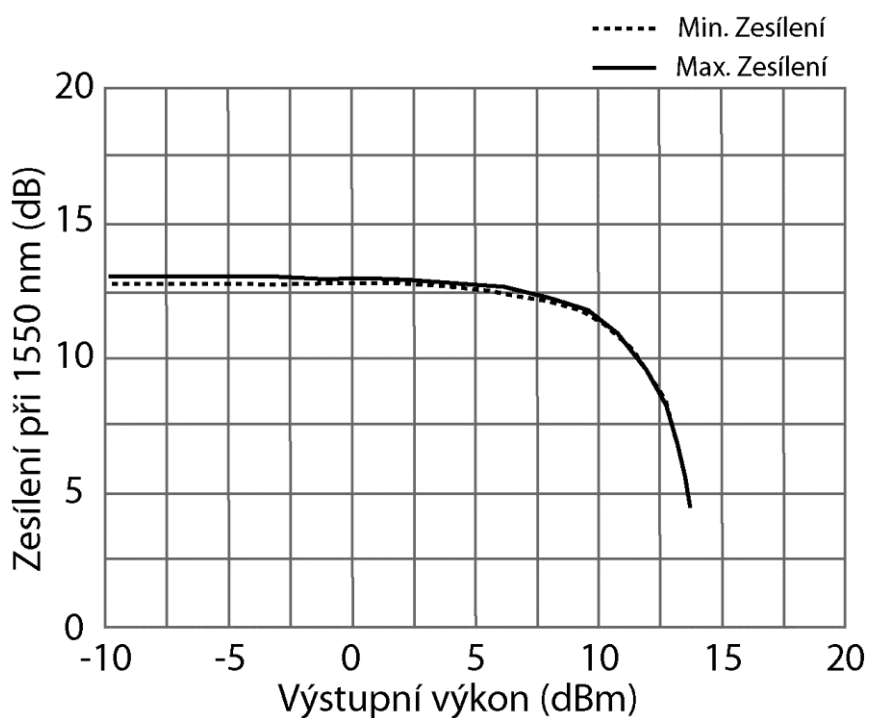
Zdroj je patřičně naddimenzován, použit bude zalíváný toroidní transformátor, aby se zamezilo jakémukoli rušení, které by mohlo vzniknout použitím spínaného zdroje.

Zařízení je navrženo tak, aby umožňovalo nastavit potřebné zesílení pro dvě nezávislé kalibrované úrovně, mezi kterými je možné přepínat pomocí DIP přepínače, při vypnutém přístroji.

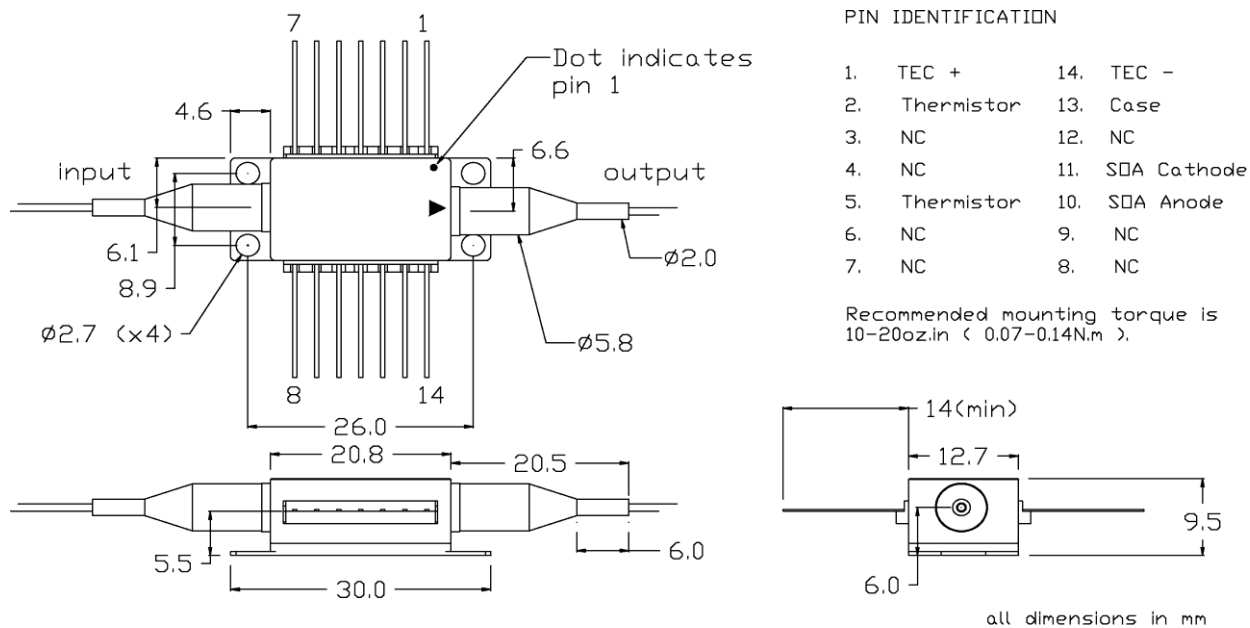
3.1 ROZBOR JEDNOTLIVÝCH OBVODŮ

3.1.1 THORLABS-SOA1013S

SOA1013S od firmy Throlabs je polarizačně necitlivý optický zesilovač zapouzdřený v standardním motýlkovém pouzdru. Vyspělé epitaxní „wafer-growth“ optoelektrické techniky dovolují ujistit vysoký saturevaný výkon, nízký šum, a vysoké zesílení v širokém pásmu spektra.



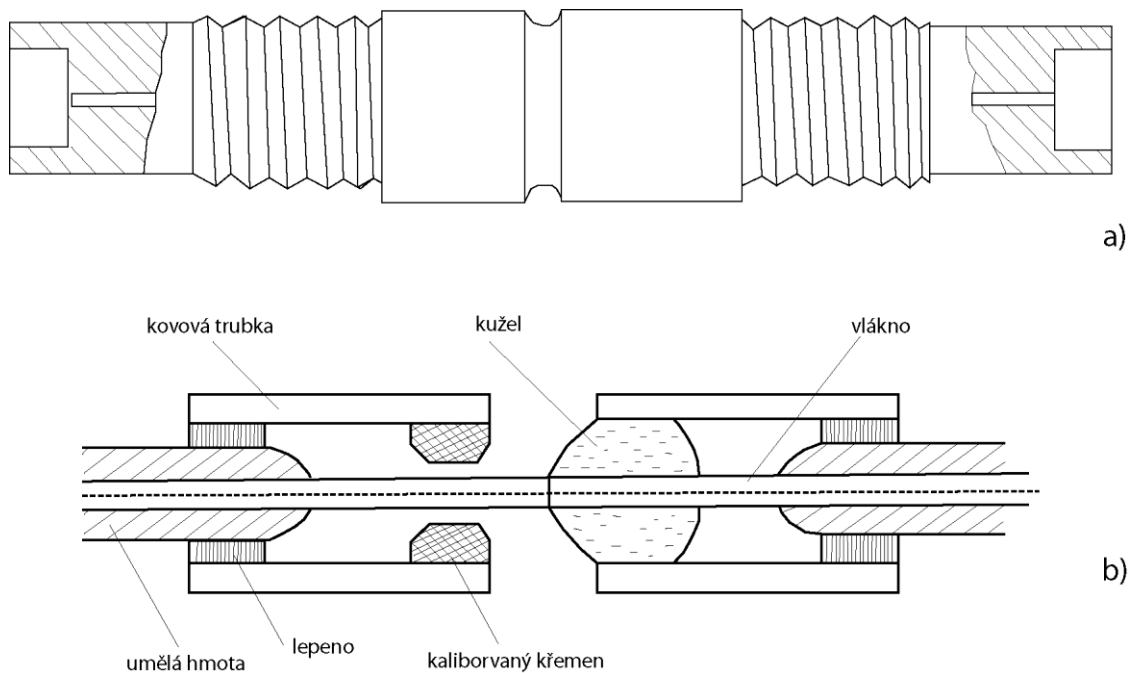
Obr. 3.2 Závislost výstupního výkonu SOA1013S na zesílení



Obr. 3.3 Butterfly pouzdro SOA1013S

Mezi některé z aplikací patří:

- optický booster a zesílení na lince ve WDM Metro Network Systems,
- kompenzátor optických ztrát,
- předzesilovač,
- vysokorychlostní optický on/off spínač[8].



Obr. 3.4 Optický konektor SOA, a) vnější stavba, b) vnitřní stavba

Typ obvodu	SOA1013S		
Parametr	Min	Typical	Max
Pracovní proud	–	500 mA	600 mA
Střední vlnová délka	1520 nm	1550 nm	1570 nm
Optická 3 dB šířka pásma	70 nm	74 nm	–
Saturovaný výstupní výkon (při -3 dB)	12 dBm	14 dBm	–
Plochosť zesílení	–	5 dB	7 dB
Kolísání zesílení	–	0,1 dB	0,5 dB
Šumové číslo	–	8.0	9.5
Propustní napětí	–	1.6 V	1.8 V
Proud TEC	–	0.23 A	1.5 A
Napětí TEC	–	0.5 V	3.5 V
Odpor termistoru	–	10 k Ω	–

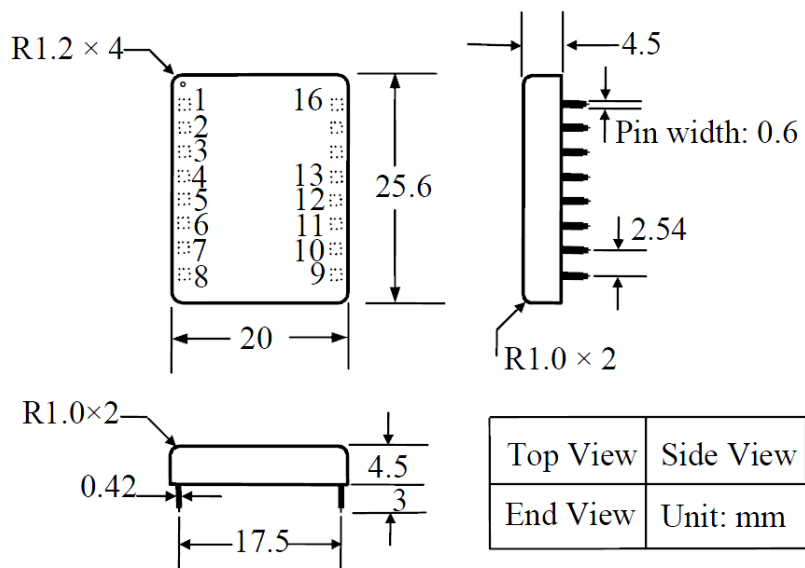
Tab. 3.1 Parametry optického zesilovače THORLABS SOA1013S

3.1.2 TECA1-3V-3V-D

Jedná se o TEC (Thermo Electric Cooler) kontrolér od firmy Analog technologies. Je určený jako řídicí prvek Peltierova článku integrovaného v SOA.

Obvod disponuje:

- vysokou účinností: $\geq 90 \%$,
- maximálním výstupním proudem: 2.5 A,
- monitorováním teploty chlazeného objektu,
- vysokou tepelnou stabilitou: 0.01 °C,
- nulovou EMI.



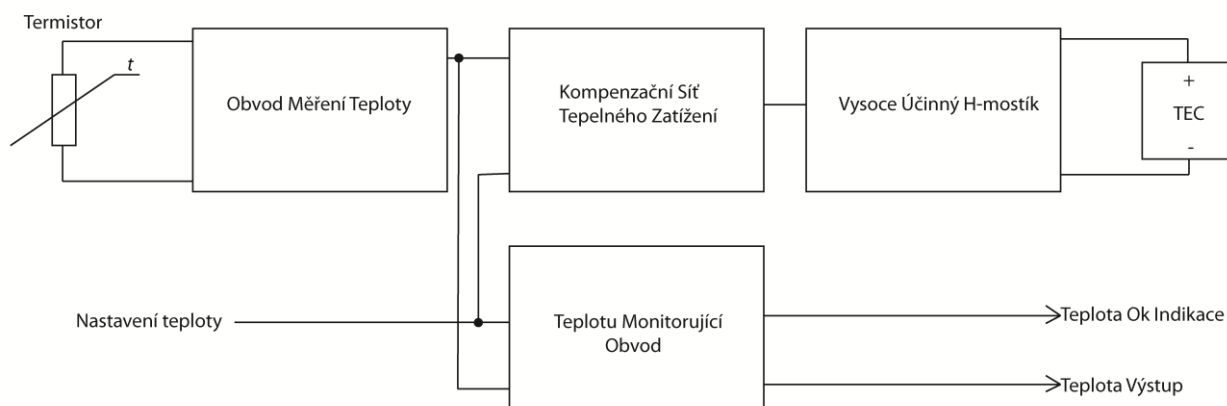
Obr. 3.5 Rozměry DIP pouzdra kontroléru TECA1-XV-XV-D

Obvod poskytuje tyto funkce:

- linearizace T-R křivky termistoru,
- měření a monitorování teploty,
- monitorování napětí TEC,
- zpožděné zapnutí a vypnutí.

Požadovaná teplota může být nastavená pomocí potenciometru nebo DAC (Digital Analog Converter) [7].

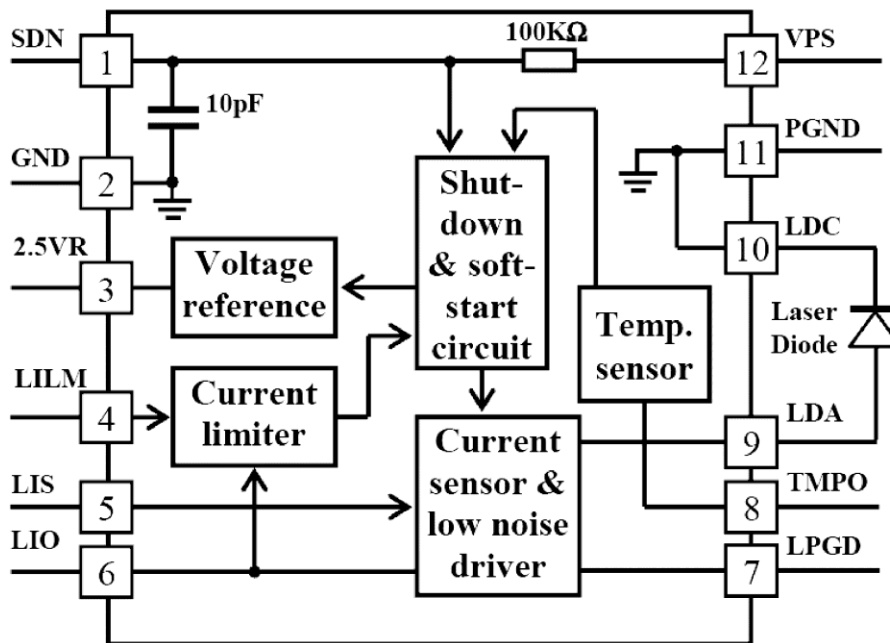
TEC kontrolér byl vybrán tak, aby byl patřičně dimenzován na potřeby SOA. Rezervy jsou zřejmé z tab. 3.1.



Obr. 3.6 Blokové schéma obvodu TECA1-3V-3V-D

3.1.3 ATLS1A103

ATLS1A103 je elektrický modul navrhnutý na napájení a řízení diodových laserů s proudem až 1 A a nízkým šumem u technologií DPSSL (Diode Pumped Solid-State Laser), EDFA, SOA a dalších. V případě že teplota kontroléru překročí 120 °C se kontrolér sám vypne, aby se předešlo poškození z důvodu přehřátí. Na základě vnitřního vysoce stabilního referenčního napětí 2,5 V je odvozeno nastavení výstupního proudu. Toto referenční napětí může být také použito jako reference pro externí ADC (Analog Digital Converter) nebo DAC, které jsou určeny na převod analogových signálů jakým je kupříkladu LIO (Laser current output indication), který reprezentuje výstupní proud, nebo převod digitálních na analogové pro nastavení analogových napětí jakým je kupříkladu LIS (Laser current set), který nastavuje výstupní proud [6].

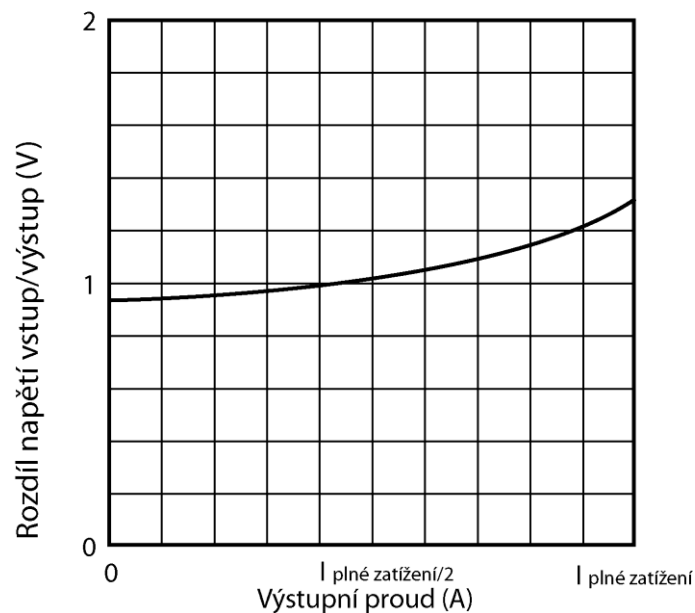


Obr. 3.7 Vnitřní schéma obvodu ATLS1A103

3.1.4 LT1084CT-3.3

LT1084 patří do rodiny třívývodových regulátorů, které se jednoduše používají a mají všechny bezpečnostní ošetření, které se při vysoce kvalitních napěťových regulátorů očekávají. Mají ochranu před zkratem a při stoupaní teploty na přibližně 165 °C se vypnou. Obvod použitý v rodině LT1084 vyžaduje výstupní kondenzátor jako součást frekvenční kompenzace obvodu. Pro všechny operační podmínky, 150 μF hliníkový elektrolytický nebo 22 μF tantalový kondenzátor zajistí stabilitu. Výstupní kapacita může zvýšená bez omezení a vyšší hodnoty výstupní kapacity opět zlepší stabilitu a přechodovou odezvu LT1084 regulátoru [9].

Rozdílový napětí a výstupní proud



Obr. 3.8 Low-Dropout charakteristika obvodu LT1084

3.2 KONSTRUKCE

3.2.1 Návrh zdroje

Při volbě zdroje se bylo nutné rozhodnout z několika variant, napětí i provedení zdroje. Po pečlivém zvážení jsem se rozhodl pro zdroj s transformátorem a jednotným napětím 3,3 V, jednak pro relativní jednoduchost konstrukce, ale hlavně proto, abych zamezil rušení, které by mohlo vznikat použitím spínaného zdroje, při citlivých součástkách, které můžou být velice náchylné na rušení. Důležité bylo také zajistit kompaktnost země, to se realizovalo prokovením dvouvrstvé desky ve více místech.

Na desce je umístěný 5 A Graetz můstek, pro usměrnění střídavého napětí. Dva elektrolytické kondenzátory s kapacitou 4700 μF každý, pro vyhlazení napětí z usměrňovače. Pro stabilizaci napětí na 3,3 V jsem použil obvod LT1084CT-3.3 od firmy Linear. Jedná se o lineární stabilizátor s maximálním proudem až 5 A a zajímavou vlastností LOW-DROPOUT, vyšší efektivností než jiný produkt na trhu a to všechno v pouzdru TO-220. Na rozdíl od PNP regulátorů kde až 10% výstupního proudu je ztraceného jako klidový proud u LT1084CT-3.3 teče klidový proud do zátěže a tím se zvyšuje efektivita. Stabilizátor je zapojen podle katalogového listu s 22 μF tantalovým kondenzátorem těsně u pouzdra. Stabilizátor jsem

opatřil ale i ochranní diodou 1N4148. Dále je napájení rozvedeno k jednotlivým obvodům a u pouzdra ze spodní strany opatřeno blokovacím keramickým kondenzátorem 100 nF. Zdroj je řešen standardně, avšak koncepce je robustní s dlouhou životností.

3.2.2 Rozložení součástek

Rozložení součástek bylo odvozeno ze základního schématu a vztahů mezi součástkami. Základní schéma jsem odvodil z katalogových listů jednotlivých prvků a obvodů. Nakolik jsou použity obvody nepřímo navrhnuté pro danou aplikaci optického zesilovače, jejich vývody definují jejich umístění na desce a vztah k modulu SOA.

Oba specializované obvody ATLS1A103 i TECA1-3V-3V-D podporují své nastavení a snímání veličin pomocí pasivních součástek (rezistor, potenciometr) i pomocí D/A, A/D převodníků, které lze řídit kupříkladu mikrokontrolérem. Pro první verzi zařízení jsem zvolil možnost nastavení pomocí precizního trimru, který se na daný účel dokonale hodí.

Snímání správné činnosti je řešeno externími LED diodami zelené barvy umístěnými pod příslušnými obvody. Tlačítka pro nouzové vypnutí obvodů jsou umístěny také blízko obvodů.

3.2.3 Chlazení

Při umístění zařízení do racku 1U, na které byl brán ohled od počátku návrhu, je nutno počítat s chlazením jednotlivých prvků na desce a odvodu tepla ze skříně pomocí větráku.

Ze zdrojové části potřebujeme chladit obvod od firmy Linear LT1084CT-3.3, chladič byl zvolený běžný pro stabilizátor v pouzdře TO-220. Výkonová ztráta je nízká a chladič dostačující.

Obvody od firmy Analog Technologies (ATLS1A103 i TECA1-3V-3V-D) jsou důmyslně navrženy tak, že při daném proudovém odběru nepožadují chladič. Tím se zjednoduší konstrukční část a sníží se náklady na výrobu. Jsou rovněž umístěny v patičích a tak se volným průtokem vzduchu ochlazují pouzdra i ze spodní strany.

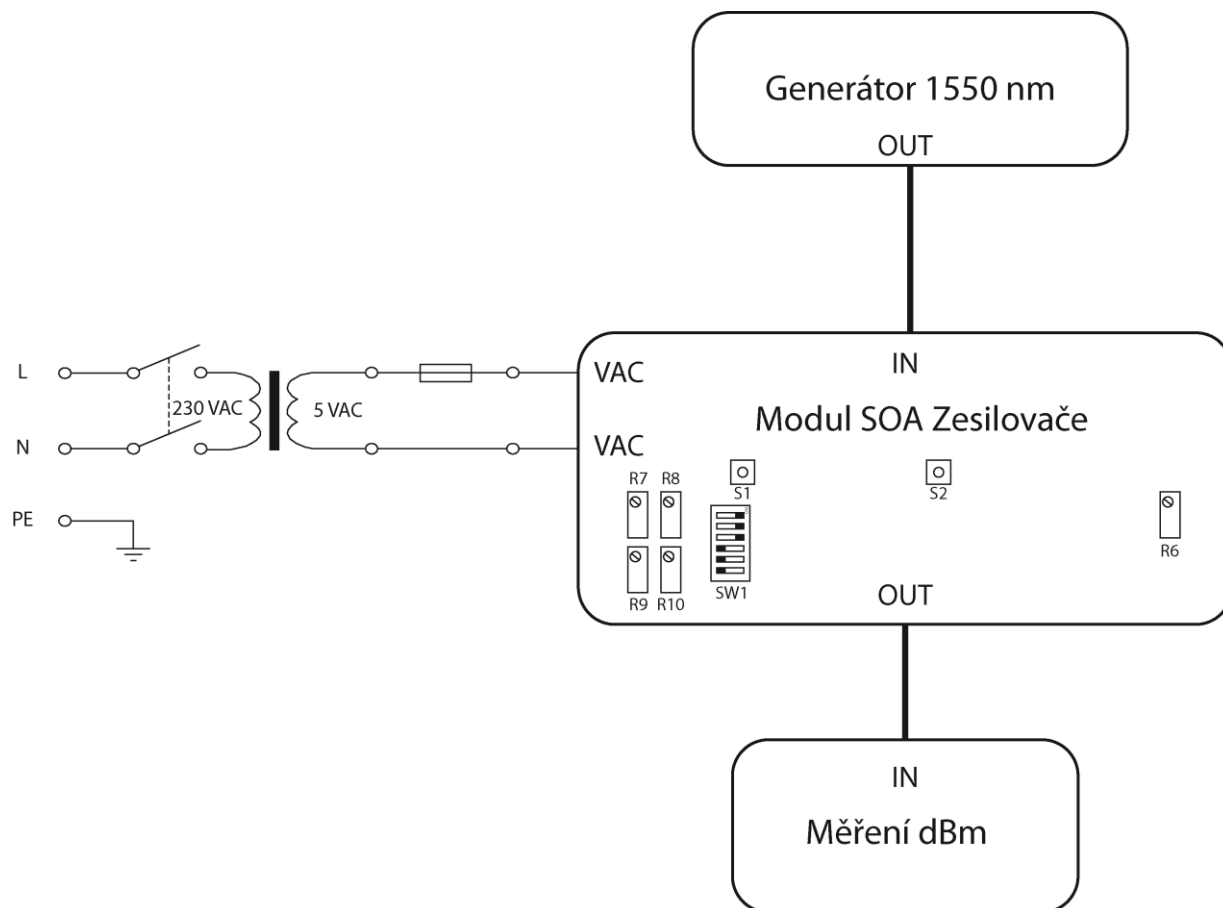
Hlavní modul od firmy Thorlabs (SOA1013S) požaduje chladič ze spodní strany pouzdra.

Modul se upevní k chladiči pomocí čtyř šroubů. Na zvýšení tepelné vodivosti se použije teplovodivá pasta.

Toroidní transformátor ve zdrojové části má samostatné vinutí 12 V / 1 A, který je možné použít pro napájení větráků v přístrojové skříni. Samostatné vinutí zamezí přenosu rušení do vinutí pro zdrojovou část zesilovače SOA.

4 OVLÁDÁNÍ A NASTAVENÍ OPTICKÉHO ZESILOVAČE

Na obr. 4.1 je znázorněno zapojení stávajícího modulu polovodičového optického zesilovače SOA při počáteční kalibraci. Ovládací prvky jsou znázorněny a označeny.

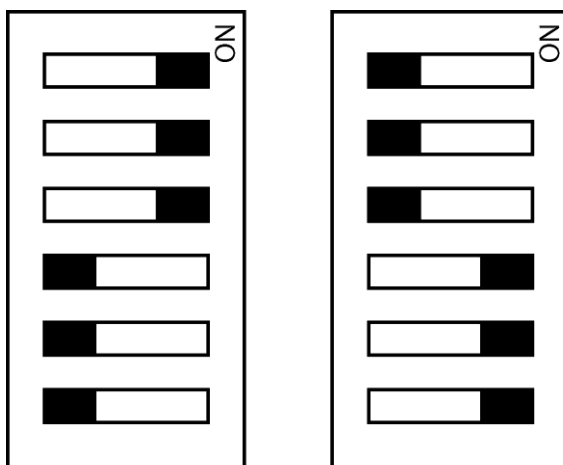


Obr. 4.1 Kalibrovací zapojení modulu SOA

4.1.1 Nastavení modulu optického zesilovače

Nastavení modulu zesilovače SOA probíhá v několika krocích.

- S odpojeným zdrojem zvolíme nastavení č. 1 nebo č. 2 podle kombinací DIP přepínače SW1 a pro to dále kalibrujeme podle následujících kroků.



Poloha 1 zesílení č. 1
(Trimry R7 a R8)

Poloha 2 zesílení č. 2
(Trimry R9 a R10)

Obr. 4.2 Nastavení DIP přepínače SW1

- Omezení výstupního proudu se nastaví trimrem R7, pro zesílení č.1, a trimrem R9 pro zesílení č.2. Tyto trimry nastaví vstupní napětí na pinu 4, LILM, obvodu ATLS1A103. Výstupní proud bude potom:

$$I_{\text{out}} = \frac{1,1 \cdot V_{\text{LILM}}}{2,5} [\text{A}]. \quad (3.1)$$

Pin LILM by nikdy neměl být plovoucí. Jinak omezení výstupního proudu může být nastaveno na vysokou hodnotu, která může poškodit laserovou diodu nadproudem.

- Samotný výstupní proud je nastaven trimrem R8, pro zesílení č.1, a trimrem R10 pro zesílení č.2. Tyto trimry nastaví vstupní napětí na pinu 5, LIS, obvodu ATLS1A103. Výstupní proud potom bude:

$$I_{\text{out}} = \frac{V_{\text{LIS}}}{2,5} [\text{A}]. \quad (3.2)$$

Jestliže není za potřeby modulace, doporučuje se použít filtr, dolní propust, na snížení šumu z napájení, filtr je na desce použit. Časová konstanta by se měla pohybovat v rozmezí několika sekund. Čím vyšší časová konstanta, tím nižší šum, avšak delší čas bude trvat stoupnout výstupnímu proudu [9].

- Nastavení obvodu TECA1-3V-3V-D v tomto zapojení je poměrně jednoduché, pin č. 8 (TEMP) nastavíme pomocí trimru R6 na 1,5 V co bude zodpovídat 25 °C na Peltierově článku a tak dostatečně chladit obvod SOA.
- Spínače S1 a S2 slouží k nouzovému vypnutí obvodů. Obvody se vrátí do výchozího stavu po vypnutí a zapnutí celého modulu zesilovače.

Před nastavením modulu optického zesilovače si pozorně prostudujeme dokumentaci k použitému SOA, hlavně co se týká vývodů, maximálního proudu a zesílení. Modul popisovaný v této práci je navrhnout specificky pro SOA1013S od firmy Thorlabs, pracujícího v režimu konstantního zesílení.

ZÁVĚR

Optický zesilovač je možné realizovat několika způsoby a jako perspektivní se jeví použití integrovaného optického zesilovače SOA. Hlavní výhodou tohoto zesilovače je vysoký satureovaný výkon a nezávislost na protokolu přenosu. V průběhu bakalářské práce jsem se seznámil s problematikou optického přenosu a v literatuře ale i prakticky jsem se seznámil s použitými prvky v optické síti. Jednalo se o různé konektory a přípravy kupříkladu na odposlech na optické lince, co vedlo k lepšímu pochopení problematiky a přípravy zesilovače.

Zesilovač je navrhován tak aby byl přehledný, v budoucnu lehký rozšiřitelný a aby byli jednotlivé moduly standardní velikosti tak aby byli lehké vyměnitelné. Rovněž tyto moduly bude možné v budoucnu obohatit o mikrokontrolér pro jednoduché nastavení výstupního výkonu a sledování parametrů, které jsou na výstupu pomocných obvodů.

Deska plošného spoje je řešena robustně, prokoy byla zajištěna kompaktnost země, kvůli elektromagnetickému rušení, které může vznikat v okolí optického zesilovače. Zapojení je vytvořeno za pomoci katalogových listů výrobců jednotlivých obvodů, které jsou vzájemně velice dobře kompatibilní a tak vytváří stabilní podpůrný obvod pro SOA zesilovač.

Zesilovač jsem navrhl podle zadání, avšak byl problém s dodáním potřebných součástek, a tak se mi nepodařilo zařízení změřit a otestovat.

Nakonec bych chtěl dodat, že podle mého názoru má dané zařízení s danými použitými součástkami veliký potenciál, nakolik bude schopné konkurovat cenově i svými parametry podobným výrobkům.

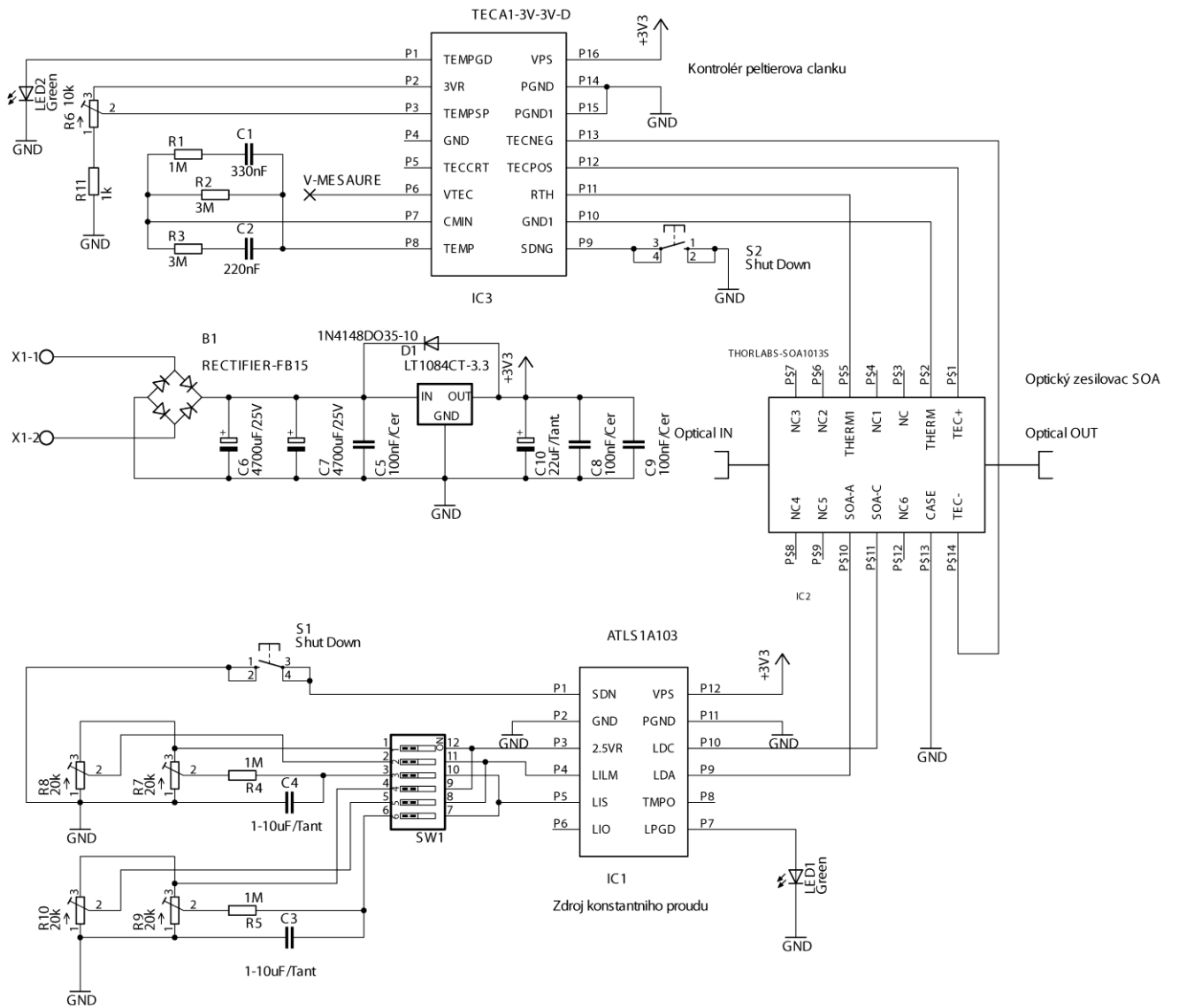
POUŽITÁ LITERATURA

- [1] FILKA, Miloslav. *Optoelektronika pro telekomunikace a infomatiku*. Brno : Doc. Ing. Miloslav Filka, 2009. 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.
- [2] ZÁHLAVA, CSC., Ing. Vít. *Návrh a konstrukce desek plošných spojů*. Praha : Česká Technika – nakladatelství ČVUT, 2005. 77 s. ISBN 80-01-03351-1.
- [3] KREJČÍŘÍK, Ing. Alexandr. *Napájecí Zdroje I.* Praha : BEN – technická literatura, 1997. 351 s. ISBN 80-86056-03-1.
- [4] KREJČÍŘÍK, Ing. Alexandr. *Napájecí Zdroje II.* Praha : BEN – technická literatura, 1997. 351 s. ISBN 80-86056-03-1.
- [5] *Safibra.cz* [online]. 2009 [cit. 2011-05-29]. EDFA zesilovače. Dostupné z WWW: <<http://www.safibra.cz/cesky/produkty/zsilovace/edfa.html>>.
- [6] *Analogtechnologies.com* [online]. 2011-22-3 [cit. 2011-05-29]. ATLS1A103. Dostupné z WWW: <<http://www.analogtechnologies.com/document/ATLS1A103.pdf>>.
- [7] *Analogtechnologies.com* [online]. 2011-18-2 [cit. 2011-05-29]. TECA1-XV-XV-D. Dostupné z WWW: <<http://www.analogtechnologies.com/document/TECA1-XV-XV-D.pdf>>.
- [8] *Thorlabs.de* [online]. 2010 [cit. 2010-12-14]. SOA1013S. Dostupné z WWW: <<http://www.thorlabs.de/catalogpages/v20/1153.pdf>>.
- [9] *Linear.com* [online]. 2009 [cit. 2011-05-20]. LT1084CT-3.3. Dostupné z WWW: <<http://www.linear.com/docs/Datasheet/1083ffd.pdf>>.
- [10] *Made How* [online]. 2008 [cit. 2011-05-28]. OpticalFiber. Dostupné z WWW: <<http://www.madehow.com/Volume-1/Optical-Fiber.html>>.

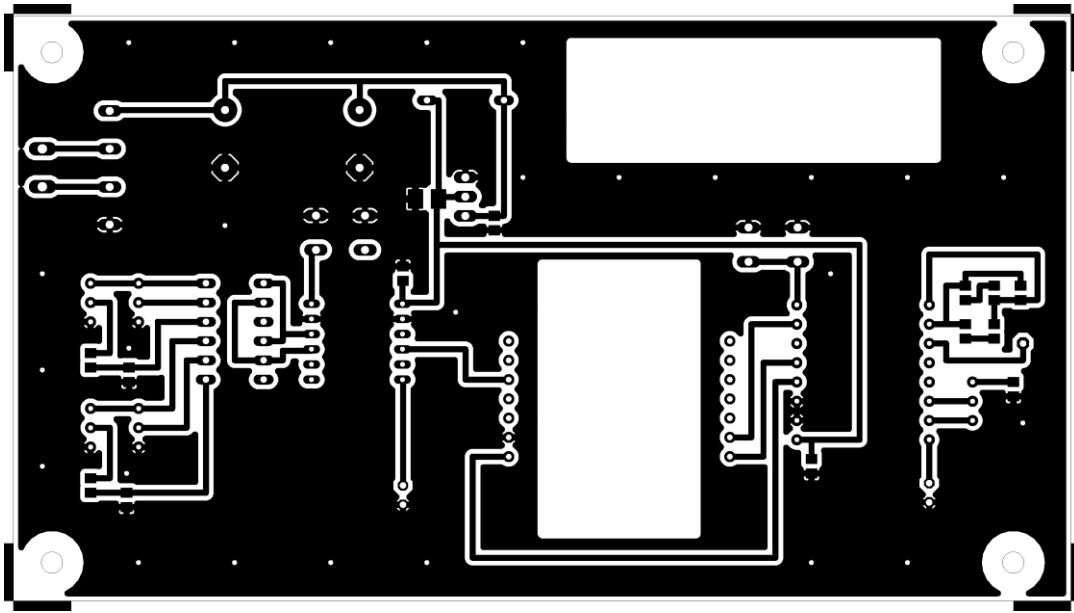
SEZNAM PŘÍLOH

A	Schéma optického zesilovače	46
B	Předloha plošného spoje spodní strana.....	47
C	Osazení plošného spoje spodní strana	47
D	Předloha plošného spoje vrchní strana	48
E	Osazení plošného spoje vrchní strana	48
F	Seznam součástek.....	49

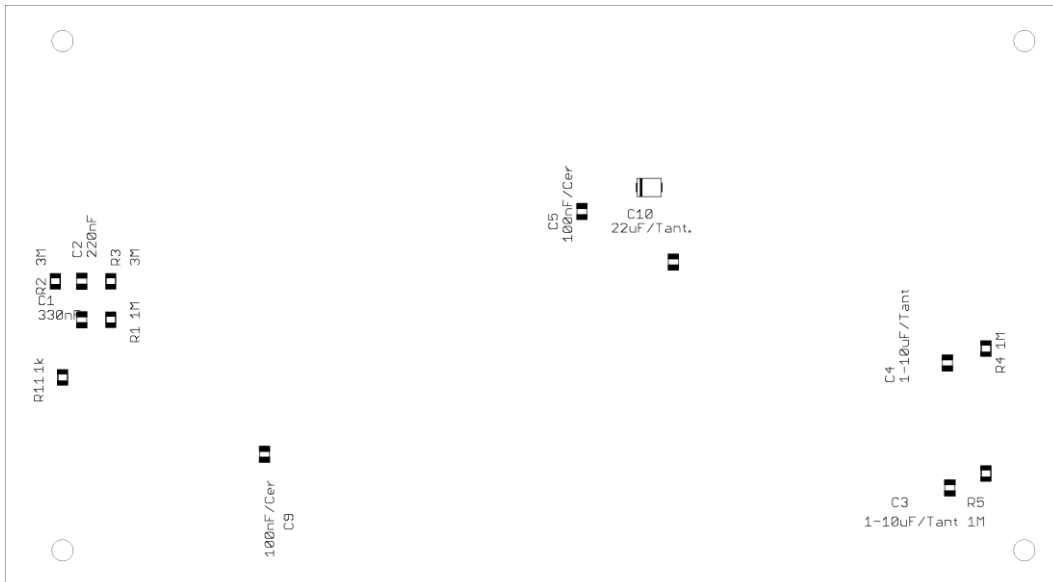
A Schéma optického zesilovače



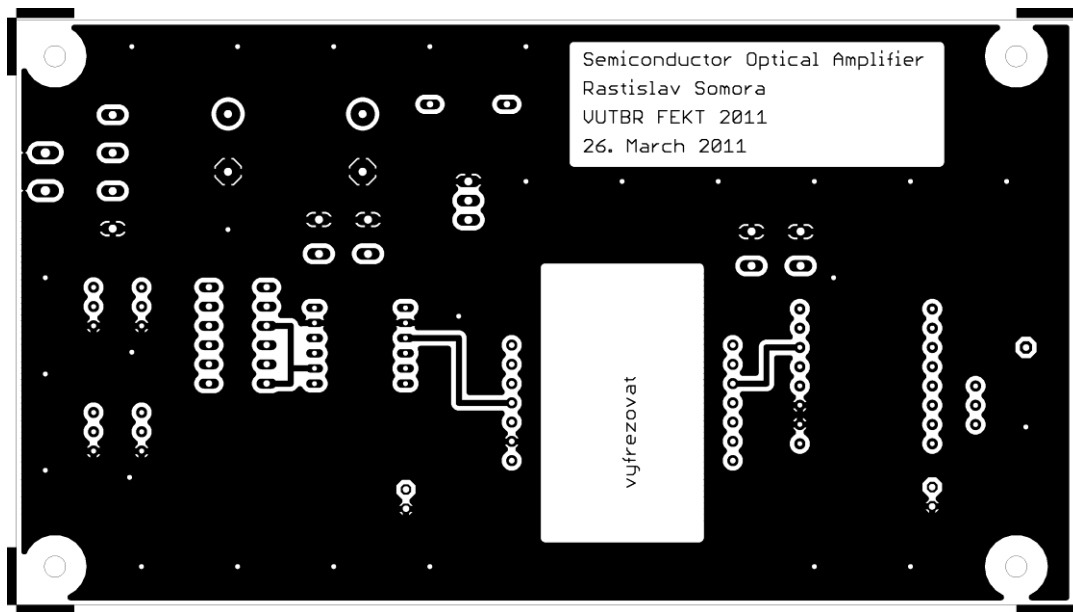
B Předloha plošného spoje spodní strana



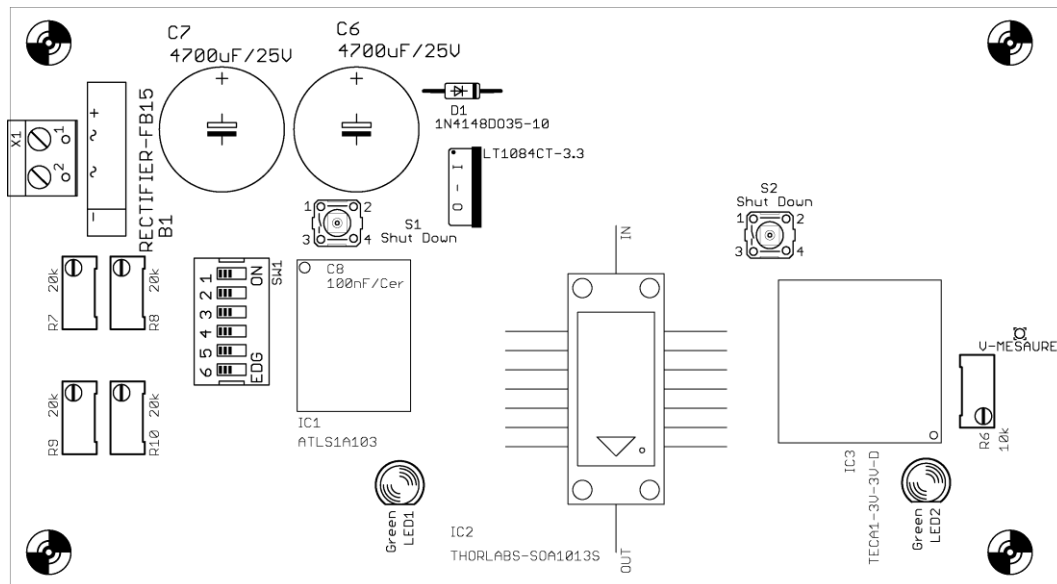
C Osazení plošného spoje spodní strana



D Předloha plošného spoje vrchní strana



E Osazení plošného spoje vrchní strana



F Seznam součástek

Součástka	Hodnota	Označení	Pouzdro
IC1		ATLS1A103	
IC2		THORLABS-SOA1013S	
IC3		TECA1-XV-XV-D	
R1	1M		R0805
R2	3M		R0805
R3	3M		R0805
R4	1M		R0805
R5	1M		R0805
R6	10k		RTRIM64W
R7	20k		RTRIM64W
R8	20k		RTRIM64W
R9	20k		RTRIM64W
R10	20k		RTRIM64W
R11	1k		R0805
B1		RECTIFIER-FB15	FB15
C1	330nF		C0805
C2	220nF		C0805
C3	1-10uF/Tant		C0805
C4	1-10uF/Tant		C0805
C5	100nF/Cer		C0805
C6	4700uF/25V		E7,5-16
C7	4700uF/25V		E7,5-16
C8	100nF/Cer		C0805
C9	100nF/Cer		C0805
C10	22uF/Tant.		B/3528-21R
D1		1N4148DO35-10	DO35-10
LED1	Zelená	LED5MM	LED5MM
LED2	Zelená	LED5MM	LED5MM
LT1084CT-3.3		LT1084CT-3.3	TO-220
S1	Shut Down		B3F-10XX
S2	Shut Down		B3F-10XX
SW1			EDG-06
X1		W237-102	W237-102