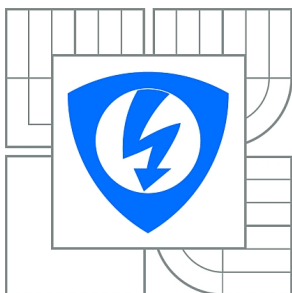


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

KONSTRUKCE POLOVODIČOVÉHO OPTICKÉHO ZESILOVAČE

DESIGN OF SEMICONDUCTOR OPTICAL AMPLIFIER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. RASTISLAV SOMORA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Mgr. KAREL SLAVÍČEK, Ph.D.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student: Bc. Rastislav Somora

ID: 115274

Ročník: 2

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Konstrukce polovodičového optického zesilovače

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Úkolem diplomové práce je navrhnout a sestavit jednoduchý optický zesilovač na bázi obvodu SOA. Zesilovač bude uživatelsky konfigurovatelný pro režim konstantního zesílení i konstantního výstupního výkonu. Úroveň výstupního signálu bude zobrazena na LCD displeji. Zesilovač bude montován do skříňe šířky 19", výšky 1 rack unit odpovídající příslušnému doporučení ETSI. Ovládání bude řešeno lokálně mechanickým přepínačem (DIP switch) s možností rozšíření o vzdálený přístup.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] FILKA, M. Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku. CENTA, Brno 2009.
[2] KREJČIŘÍK, A. Napájecí zdroje, BEN, 2002.

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 29.5.2013

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

Konzultanti diplomové práce:

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Diplomová práca sa zaoberá konštrukciou moderného polovodičového optického zosilňovača SOA. V prvej kapitole je popísaná optická komunikácia a použitie optických zosilňovačov. V ďalšej kapitole je podrobne popísaných niekoľko druhov optických vlákien, ich chemické zloženie a vlastnosti. Tretia kapitola sa venuje prehľadu optických zosilňovačov používaných dnes, popisuje ich výhody a nevýhody a vhodné nasadenie v optickej komunikácii. Štvrtá kapitola popisuje riešenie zadania, správne rozloženie jednotlivých blokov a ich zapojenie tak ako bolo použité v meraní. Piata kapitola popisuje použité súčiastky, popisuje ich základné parametre a vhodné použitie v obvode. Posledná kapitola vyhodnocuje výsledky merania a ich dopad na riešený problém.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

SOA, EDFA, WDM, LED, LD, Raman, Fabry-Perot, optické vlákno, útlm

ABSTRACT

Diploma thesis deals with the construction of a moder semiconductor optical amplifier SOA. In the first chapter optical comunication and the use of optical amplifiers is described. In the next chapter some types of optical fibers, their chemical composition and properties are described in detail. The third chapter overviews optical amplifiers, their use today, describes their advantages and disadvantages and their proper use in optical comunciations. The fourth chapter describes the solution of the objective, the right layout of separate blocks and connections used in measurements. Fifth chapter describes used components, describes their basic parameters and proper use in circuit. The last chapter evaluates outputs of measurements and their impact on the objective.

KEY WORDS

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

SOMORA, R. *Konstrukce polovodičového optického zesilovače*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 60 s. Vedoucí diplomové práce Mgr. Karel Slavíček, Ph.D.

Prehlásenie

Prehlasujem, že som svoju diplomovú prácu na tému „Konstrukce polovodičového optického zesilovače“ vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomové práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej diplomovej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto práce som neporušil autorské práva tretích osôb. Som si plne vedomí následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., započítanie možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia § 152 trestného zákona č. 140/1960 Sb.

V Brně dne

.....

podpis autora

PodĎakovanie:

Ďakujem vedúcemu diplomové práce Mgr. Karlu Slavíčkoví Ph.D. a doc. Ing. Václavu Zemanovi Ph.D. za vedenie pri riešení diplomovej práce..

V Brne dĎa

.....

podpis autora

OBSAH

ABSTRAKT	i
Prehlásenie	ii
Zoznam Skratiek	1
Zoznam obrázkov	2
Zoznam tabuliek	3
Úvod	4
1 Optická komunikácia	5
1.1 Potreba optického zosilnenia	6
2 Optické vlákno	7
2.1 Materiálová štruktúra optických vlákien	7
2.1.1 Kremík v optických vláknach	7
2.1.2 Fluoridy v optických vláknach	8
2.1.3 Fosfáty v optických vláknach	9
2.2 Prenosové vlastnosti optických vlákien	9
2.2.1 Druhy konštrukcie optických vlákien	9
2.2.2 Útlm optických vlákien	10
2.2.3 Optická prenosová trasa	12
3 Prehľad optických zosilňovačov	14
3.1 Optovláknové zosilňovače	14
3.1.1 EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier)	14
3.1.2 Ramanovské optické zosilňovače	16
3.2 Polovodičové zosilňovače	17
3.2.1 Krátka história polovodičových optických zosilňovačov	17
3.2.2 SOA (Semiconductor Optical Amplifier)	18
3.2.3 Princípy zosilnenia v SOA	19
4 Konštrukcia	21
4.1 Doska Analógového riadenia	22
4.2 Doska digitálneho riadenia	23
4.3 Ovládanie optického zosilňovača	24
4.3.1 Zapojenie s doskou analógového riadenia	24
4.3.2 Zapojenie s doskou digitálneho riadenia	26
5 Použité súčiastky	27
5.1 ATmega 328-AU	27
5.2 LTC2635-10bit DAC	27
5.3 TLC272D	27
5.4 PIN dióda	27
5.4.1 KPDE086S	28
5.5 TECA1-3V-3V-D	29
5.6 ATLS1A103	31
5.7 SOA1013S	32
5.8 MeanWell RS-25-3.3	33
6 Meranie a výsledky	34
6.1 Meranie kompaktným reflektomerom	34
6.2 Meranie spektrálnym analyzátorom	36
Záver	39
Použitá literatúra	41
Zoznam príloh	43

ZOZNAM SKRATIEK

Skratka	Anglicky	Slovensky
ADC	Analog Digital Converter	Analogovo digitálny prevodník
AlGaAs	Alluminium Gallium Arsenide	Arzenid gália a hliníku
AR	Anti Refelction	Bezodrazová vrstva
BER	Bit Error Rate	Bitová chybovosť
CB	Conduction Band	Vodivý pás
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing	Bežný vlnový multiplex
DAC	Digital Analog Converter	Digitálne analógový prevodník
DPSSL	Diode Pumped Solid-State Laser	Diódou vybudovaný polovodičový laser
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing	Hustý vlnový multiplex
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier	Zosilňovač s erbiom dotovaným vláknom
EDFFA	Erbium Doped Fluoride Fiber Amplifier	Zosilňovač s erbiom dotovaným fluoridovým vláknom
EMI	Electro-Magnetic Interference	Elektro-magnetické rušenie
FP-SOA	Fabry Perot SOA	Fabry Perot SOA
GaAs	Gallium Arsenide	Arzenid gália
HMFG	Heavy Metal Fluoride Glasses	Fluoridové sklá ťažkých kovov
InGaAsP	Indium Galium Arsenide Phosphate	Fosfát india gália arzenu
InP	Indium Phosphate	Fosfát india
LD	Laser Diode	Laserová dióda
LED	Light Emitting Diode	Elektroluminescenčná dióda
NIR	Near Infra Red	Blízko infračerveného spektra
ORR	Optical Rejection Ratio	Pomer optického potlačenia
PDFA	Praseodymium Doped Fiber Amplifier	Zosilňovač s prazeodýmom dotovaným vláknom
PIN Diode	Diode with intrinsic layer	Dióda s intrinsitnou vrstvou
POF	Plastic Optical Fiber	Plastové optické vlákno
QKD	Quantum Key Distribution	Kvantová distribúcia kľúču
SOA	Semiconductor Optical Amplifier	Polovodičový optický zosilňovač
TDFA	Thulium Doped Fiber Amplifier	Zosilňovač s túliom dotovaným vláknom
TEC	Thermo-Electric Cooler	Peltierov článok
TW-SOA	Travelling-wave SOA	Bezodrazové SOA
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter	Univerzálny asynchrónny prijímač a vysielateľ
VB	Valence Band	Valenčný pás
VOA	Variable Optical Attenuator	Variabilný optický útlmový článok
WDM	Wavelength Division Multiplexing	Vlnový multiplex
YDFA	Ytterbium Doped Fiber Amplifier	Zosilňovač s yterbiom dotovaným vláknom
ZBLAN	ZrF ₄ -BaF ₂ -LaF ₃ -AlF ₃ -NaF	ZrF ₄ -BaF ₂ -LaF ₃ -AlF ₃ -NaF

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1 Útlm a absorpcia v bežnom optickom vlákne	8
Obr. 2 a) optický konektor – pohľad, b) rez optickým konektorom	11
Obr. 3 Optická prenosová trasa – ilustrácia celkového útlmu.....	13
Obr. 4 Bloková schéma EDFA zosilňovača	15
Obr. 5 Energetické hladiny EDFA zosilňovača	15
Obr. 6 Bloková schéma ramanovského zosilňovača.....	17
Obr. 7 Absorpcia, spontánna emisia a stimulovaná emisia v SOA zosilňovači.....	19
Obr. 8 Závislosť vstupného výkonu na výstupnom výkone SOA zosilňovača.....	20
Obr. 9 Zapojenie modulov optického zosilňovača pre počiatočné nastavenie.....	24
Obr. 10 Nastavenie DIP prepínača SW1	24
Obr. 11 Zapojenie modulu optického zosilňovača SOA s digitálnym riadením.....	26
Obr. 12 Rez PIN diódou	27
Obr. 13 Bloková schéma TECA1-3V-3V-D	30
Obr. 14 Vnútoraná schéma ATLS1A103	31
Obr. 15 Rozmery a usporiadanie pinov u SOA1013	32
Obr. 16 Ukážka zapojenia merania pomocou kompaktného reflektometru	34
Obr. 17 Výkonová hysterézná krivka SOA zosilňovača.....	35
Obr. 18 Výkonová hysterézná krivka SOA zosilňovača.....	35
Obr. 19 Výkonová hysterézná krivka SOA zosilňovača.....	36
Obr. 20 Referenčné spektrum vstupného WDM signálu.	37
Obr. 21 Signál WDM po prechode SOA zosilňovačom na nízkej hladine zosilnenia.....	38
Obr. 22 Signál WDM po prechode SOA zosilňovačom, plné zosilnenie.	38

ZOZNAM TABULIEK

Tab. 1 Špecifikácie použitej PIN diódy	28
Tab. 2 Elektrické a optické charakteristiky použitej PIN diódy	28
Tab. 3 Základné parametre SOA1013	32
Tab. 4 Základné vlastnosti spínaného zdroja MeanWell RS–25–3.3	33

ÚVOD

Úlohou diplomovej práce bolo navrhnuť a skonštruovať zapojenie s obvodom SOA (Semiconductor Optical Amplifier). Požiadavky na návrhu boli voľba zosilnenia a operácia zosilňovača v režime konštantného výkonu, čo je zaistené spätnou väzbou z optického vlákna. Mechanická konštrukcia pozostáva hlavne z návrhu spoľahlivej a správne rozmiestnenej dosky plošného spoja a výrobe chladiča, ktorý musí byť špecificky upravený tak aby súčiastka SOA správne priliehala.

Technológia SOA je moderná technológia, ktorej uplatnenie a možnosti sú široké. Moderné komunikačné technológie budúcnosti si ich budú vyžadovať vo väčšej miere ako dnes. Pre pochopenie problematiky optických zosilňovačov je uvedený aj stručný prehľad optických zosilňovačov a princípov ich operácie. Tu sú spomenuté dnes najpoužívanejšie EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) zosilňovače. SOA svojou jednoduchosťou a dnes už aj cenou konkurujú EDFA zosilňovačom, avšak stále nemôžu byť nasadené všade a niektorými parametrami zaostávajú. Pri dobrom výbere nasadenia, môže byť SOA prínosné a výhodnejšie ako EDFA, čo závisí od mnohých faktorov.

V diplomovej práci, navrhujem sofistikovaný SOA zosilňovač, ktorý musí byť stabilný a flexibilný, čo sa týka použitia. Úvodná teoretická časť bola spracovaná na základe materiálov [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [14], [15], sú v nej uvedené poznatky potrebné pre konštrukciu zosilňovača s SOA.

1 OPTICKÁ KOMUNIKÁCIA

Komunikáciu pomocou optických vlákien dosiahneme využitím svetla ako nositeľa informácie. Za posledných dvadsaťpäť rokov sa exponenciálne rozšírilo ich kapacita a použitie v sieťach. Tento nárast bol možný vďaka vývoju nových optoelektronických technológií ktoré môžu byť využité na odkrytie obrovského potenciálu optického vlákna.

Technológia tzv. „hustého“ vlnového multiplexu DWDM patrí medzi najdokonalejšie systémy, ktoré sú v optoelektronike používané. Odstup medzi jednotlivými kanálmi je iba 0,8 nm, teoreticky až 0,1 nm (ultra DWDM). Z toho vyplýva, že umožňuje prenášať v jednom optickom vlákne desiatky kanálov. Kanály sú optickým vláknom prenášané paralelne a nezávisle na sebe. To niekoľkonásobne zvyšuje prenosovú kapacitu optického spoju. Dnešné DWDM umožňujú prenášať 2,5 až 10 Gbps v jednom optickom kanáli a využívať bežne 96 týchto kanálov na jednom fyzickom spoji [15].

Optická technológia je dominantný nosič svetových informácií. Takisto je to ústredná technológia realizácie budúcich sietí ktoré budú splňovať požiadavky spoločnosti. V zásade optické zosilňovače sa dajú rozdeliť do dvoch skupín: zosilňovače využívajúce optické vlákno a polovodičové zosilňovače. Skoršie zosilňovače využívajúce optické vlákno dominovali v konvenčných systémových aplikáciách ako sériového zosilňovania využívaného na kompenzáciu strát vo vlákne. Avšak vďaka pokrokom vo výrobe optických polovodičových súčiastok a návrhu obvodov za posledných päť rokov, ukazuje SOA veľký potenciál vo vyvíjajúcich sa optických sieťach.

Môže byť využitý ako bežný zosilňovač, ale aj ako optický spínač, modulátor a vlnový prevodník. Tieto funkcie v ktorých nie je žiadny prevod optického signálu do elektrickej domény, sú potrebné v takzvaných transparentných optických sieťach [1].

1.1 POTREBA OPTICKÉHO ZOSILNENIA

Optické vlákno trpí dvoma základnými limitujúcimi faktormi: útlmom a disperziou. Útlm vedie k strate výkonu signálu, ktorá obmedzuje prenosovú vzdialenosť. Disperzia spôsobuje rozšírenie optického impulzu a tým pádom spôsobuje medzysymbolové rušenie a vedie k nárastu bitovej chybovosti (BER). Disperzia podstatne obmedzuje šírku pásma. Útlm bežného jednomodového kremíkového vlákna je vidno na obr. 1, má minimá v oblasti 1550 nm, zatiaľ čo v oblasti 1300 nm je útlm vyšší.

Pretože útlm signálu a disperzia sa s narastajúcou vzdialenosťou vlákna zvyšujú, v istom mieste optického vlákna je potrebné signál regenerovať. Používajú sa buď 3R regenerátory alebo optické zosilňovače.

Použití 3R regenerácia má radu nevýhod. Po prvé, zahŕňa prerušenie čisto optického reťazca a tým pádom nie je opticky transparentná. Po druhé, proces regenerácie je závislý na signálovej modulácii formátovaní a bitovej rýchlosti a tak nie je ani elektricky transparentná. Toto spôsobuje ťažkosti ak je potreba linku upgradovať. Ideálne by mali upgrady liniek zahŕňať len výmenu vysielača alebo prijímača. Potretie, nakoľko sú regenerátory komplexnými systémami, ktoré sú umiestnené vo vzdialenej alebo neprístupnej lokalite, je ich spoľahlivosť ohrozená. V moderných optických prenosových systémoch je použitie optických zosilňovačov výhodnejšie. Je možné použiť sériový optický zosilňovač ako regenerátor. Nakoľko sériový zosilňovač, vykonáva len jednu funkciu a to zosilnenie signálu na vstupe. V porovnaní s plnou regeneráciou, je to spoľahlivejšie a lacnejšie zariadenie. V zásade ide o tri druhy aplikácie optických zosilňovačov[7].

1. **Booster** Je umiestnený hneď za optický vysielač a slúži k zosilneniu jeho signálu na maximálnu úroveň, ktorú možno do vlákna naviazať. Musí byť schopný spracovať pomerne vysoký vstupný signál z optického vysielača.
2. **In-line zosilňovač** Umiestnený na trase optického vlákna, zosilňuje malý vstupný signál na čo najväčší výstupný signál.
3. **Predzosilňovač** Používa sa na zosilnenie veľmi nízkych úrovní signálov na úroveň dostatočnú pre správnu funkciu optického prijímača na konci prenosovej trasy. U predzosilňovača je dôležitý nízky šum.

2 OPTICKÉ VLÁKNO

Optické vlákno je v oblasti optických komunikácií najčastejšie chápané ako ohybné a priehľadné vlákno najčastejšie vyrobené z oxidu kremičitého, hrubého asi 0,25 mm. Hlavná úloha optického vlákna je slúžiť ako vlnovod ktorý prenáša svetelnú informáciu medzi dvoma koncami.

Vysokorýchlostné komunikácie dnes, si už nie je možné predstaviť bez optického vlákna, ktoré nahradilo metalické spojenia. Dnes, v optických komunikačných systémoch, sa pomocou optického vlákna spájajú prijímače (detektory svetla, napr.: PIN diódy) a vysielajúce (napr.: laserové diódy, EDFA zosilňovače, atď). Je jasné že signál získaný z analógových vstupov je nutné previesť na digitálny a následne na optický a naspäť.

2.1 MATERIÁLOVÁ ŠTRUKTÚRA OPTICKÝCH VLÁKIEN

Optické vlákna založené na skle sa zväčša vyrábajú z kremíku, hlavne kysličníku kremičitého (SiO_2), ale využívajú sa aj materiály ako napríklad rôzne fluoridy a kryštalické materiály ako zafír, pre špecializované aplikácie. V počiatkoch sa využíval čistý kremičitý piesok, dnes sa využíva chlorid kremičitý (SiCl_4) v plynnej pare čistého kyslíku, to je hlavný zdroj kremíku pre dnes rozšírenú sedimentačnú metódu výroby. Plyny kremíku a fluóru majú index lomu približne 1,5 ale napríklad niektoré materiály ako napríklad chalkogenidy môžu mať index lomu až 3. Zvyčajne rozdiel indexu lomu jadra a obalu je menej ako 1 %.

Plastikové optické vlákna (POF z ang.: Plastic Optical Fiber) sú bežne multimodové vlákna s priemerom jadra 0,5 mm a viac. POF majú typicky väčší útlmový koeficient ako sklenené vlákna, $1 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$ alebo vyššie, čo obmedzuje dosah systémov využívajúcich tieto vlákna [2].

2.1.1 Kremík v optických vláknach

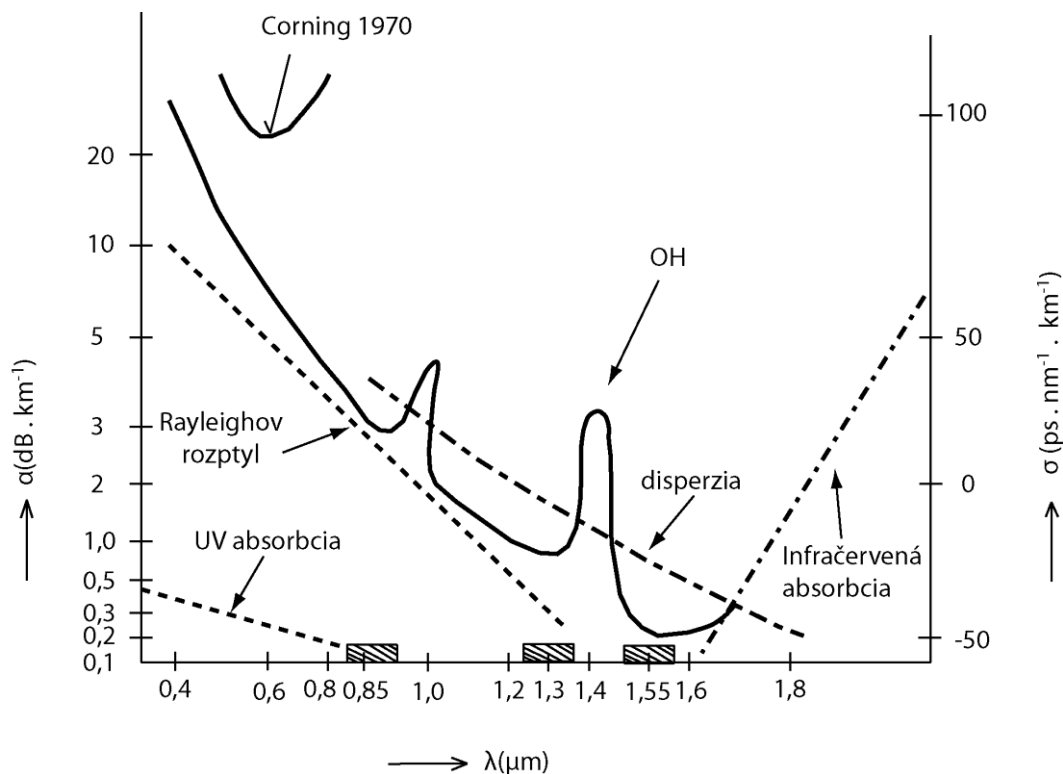
Kremík sa vyznačuje dobrou optickou prenosovou charakteristikou v širokom spektre vlnových dĺžok. V blízkosti infračerveného časti spektra, obzvlášť okolo 1500 nm, má kremík veľmi nízky útlm a stratu rozptylom. Takto nízke straty sú možné len vďaka super čistému kremíku, ktorý je základom pre výrobu integrovaných obvodov a tranzistorov. Vysoká priehľadnosť v oblasti okolo 1400 nm je dosiahnutá tým, že sú udržané nízke koncentrácie hydroxilových skupín (OH). Naopak zase vysoká koncentrácia OH je lepšia pre prenos

v ultrafialovej oblasti. To vidíme na obr. 1.

Kremičité sklo môže byť dopované rôznymi materiálmi. Dopujú sa hlavne kvôli zvýšeniu indexu lomu (napr.: Oxid germaničitý GeO_2 alebo oxid hliníka Al_2O_3) alebo znižovaniu (napr.: Fluór alebo oxid boritý B_2O_3).

Pre aktívne vlákna použité napríklad v EDFA zosilňovačoch nie je kremík vhodným hostiteľským sklom, nakoľko prejavuje malú rozpustnosť iónov vzácnych zemín. Toto vedie k zhlukovaniu dopovaných iónov.

Vďaka vlastnostiam kremíkových vlákien sa stali najpoužívanejšími v optických aplikáciách, ako napríklad komunikácie (okrem krátkych vzdialeností, kde sa používajú plastové vlákna), vláknové lasery, vláknové zosilňovače a vláknovo-optické senzory. Veľké snahy sú vkladané do vývoja rôznych typov kremíkových vlákien a to vedie k zvýšenej výkonnosti týchto materiálov oproti ostatným.



Obr. 1 Útlm a absorpcia v bežnom optickom vlákne

2.1.2 Fluoridy v optických vláknoch

Fluoridové sklo je triedou bez oxidových optických skiel zložených z fluoridov a rôznych kovov. Vďaka svojej nízkej viskozite je veľmi ťažké plne zabrániť kryštalizácii počas výroby a ťahania vlákna. Kvôli tomu sú tieto HMFG (t.j.: fluoridové sklá ťažkých kovov; ang.: Heavy Metal Fluoride Glasses) sklá aj keď s nízkym útlmom, sú náročné na

výrobu, sú krehké a sú málo odolné voči vlhkosti. Ich najlepšia vlastnosť je absencia pohltivého pásma asociovaného s hydroxylovými (OH) skupinami, ktoré sa vyskytuje skoro u všetkých skiel založených na oxidoch.

Príkladom fluoridového vlákna je skupina skiel ZBLAN zložených zo zirkónia, bária, lantánu, hliníku a fluoridu sodného. Ich hlavné technologické aplikácie sú optické vlnovody či už planárne alebo vo forme vlákna. Najvhodnejšie je ich využitie na vlnových dĺžkach 2000–5000 nm.

Vlákna typu HMFG boli v počiatkoch navrhované ako vhodné pre použitie v optike, nakoľko ich vnútorné straty v strede IR pásma mohli byť v princípe nižšie ako u kremíkových vlákien, ktoré sú priehľadné len do zhruba 2 μm . Avšak tak nízke straty sa nikdy nepodarilo v praxi dosiahnuť a krehkosť a vysoká cena fluoridových vlákien je to čo ich zaradilo až za vlákna kremíkové. Až neskôr sa objavili využitia fluoridových vlákien medzi ktoré patrí napríklad spektroskopia, senzory, meranie teploty, lasery a medicína.

2.1.3 Fosfáty v optických vláknach

Fosfátové sklá predstavujú triedu optických skiel zloženú z metafosfátov rôznych kovov. Namiesto SiO_4 štvorstenov ktoré sa nachádzajú v kremičitých sklách, je stavebný blok oxid fosforečný (P_2O_5) ktorý kryštalizuje najmenej do štyroch rôznych foriem. Najznámejší polymorf sa skladá z molekúl P_4O_{10} .

Fosfátové sklá majú viac výhod oproti kremičitým sklám pre optické vlákna s vysokou koncentráciou dopantov iónov vzácnych zemín. Mix fluoridového vlákna a fosfátového vlákna je takzvané fluorofosfátové vlákno.

2.2 PRENOSOVÉ VLASTNOSTI OPTICKÝCH VLÁKIEN

2.2.1 Druhy konštrukcie optických vlákien

Vlákna mnohovidové s konštantným indexom lomu jadra a skokovou zmenou indexu lomu plášťa, sú jednoduché svojou konštrukciou manipuláciou a hlavne výrobou. Medzi nevýhody patrí vyšší útlm, disperzia a malá prenosová kapacita. Plášť a jadro majú v porovnaní s inými väčšie. Využitie týchto vlákien je hlavne v spojoch na krátku vzdialenosť: automatizácia, prenosy dát, lokálne siete atď.

Charakteristiky: $D_j = 50\text{--}200 \mu\text{m}$, $D_p = 120\text{--}300 \mu\text{m}$, disperzia $50 \text{ ns} \cdot \text{km}^{-1}$, útlm $5\text{--}20 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$, šírka pásma 60 MHz.

Vlákna mnohovidové s premenným indexom lomu v pričnom reze vlákna, oproti ostatným majú nižší útlm a disperziu, avšak sú o to zložitejšie na výrobu, konštrukciu a spajovanie vlákien. Uplatnenie nachádzajú v telekomunikáciách a v spojoch na kratšie vzdialenosti.

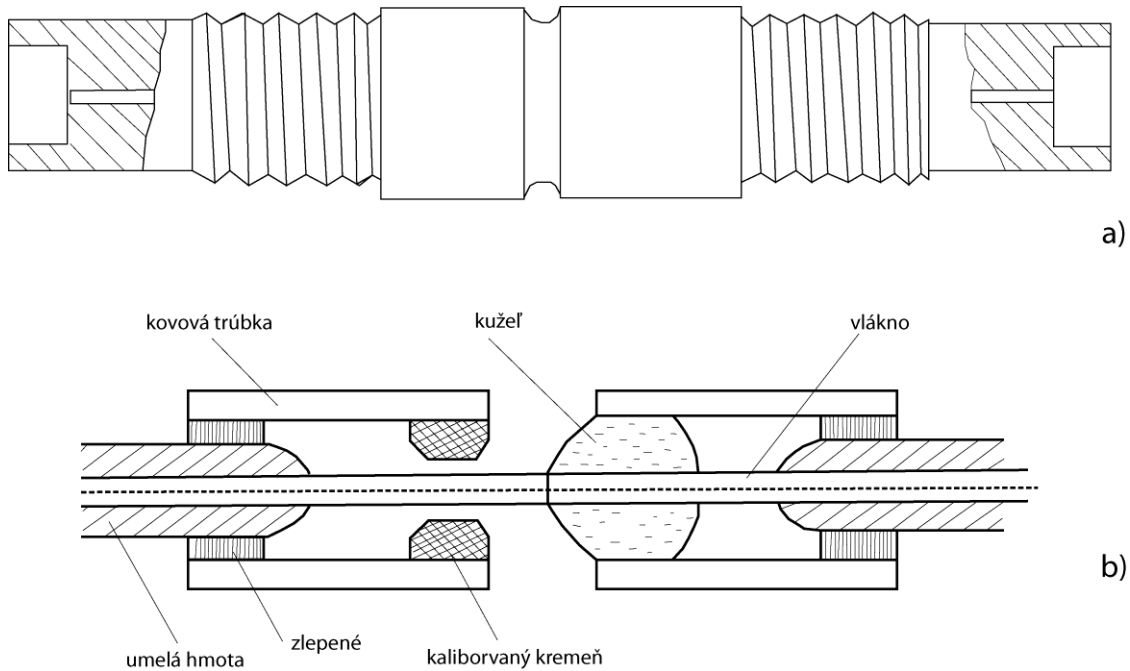
Charakteristiky: $D_j=50 \mu\text{m}$, $D_p=125 \mu\text{m}$, disperzia pri $0,85 \mu\text{m}$ cca $1 \text{ ns} \cdot \text{km}^{-1}$, útlm $2,5\text{--}5 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$, šírka pásma 600 MHz .

Vlákna jednovidové s konštantným indexom lomu jadra a skokovou zmenou indexu lomu plášťa, ide o vlákna najvhodnejšie pre vysokorýchlostné a diaľkové optické trasy, označujú sa aj ako vrstvomé a to kvôli skokovej zmene indexu lomu, tu je naproti ostatným odraz na rozhraní jadro – plášť absolútny. Avšak rôzni výrobcovia aplikujú na svoje vlákna rôzne profily indexov lomu, čím sledujú rôzne vlastnosti vlákien, či už náročnosť výroby, využitie len na krátke vzdialenosti, mechanickú odolnosť a podobne.

2.2.2 Útlm optických vlákien

Straty absorpciou sú v ultrafialovej a viditeľnej oblasti spôsobené prechodmi medzi atomárnymi a infračervenej oblasti medzi molekulárnymi úrovňami základného materiálu, prímiesí a nečistôt. Najväčší vplyv majú ióny kovov železa (Fe), meď (Cu) a chrómu (Cr), ktorých rezonancia na určitých kmitočtoch je sprevádzaná tepelnými stratami. Pre nás dôležitý rezonančný kmitočet iónov OH, ktoré sa najviac podieľajú na stratách, zodpovedá vlnovej dĺžke $2,8 \mu\text{m}$, čo leží mimo pásmo využívané na optický prenos, ale druhá harmonická $1,38 \mu\text{m}$ a tretia harmonická $0,94 \mu\text{m}$ už spadajú do oblasti využívaného pásma. Rezonančné krivky zapríčinené iónami OH sú zobrazené na obr. 1. Pri výrobe optických vlákien teda treba zaistiť nízku koncentráciu iónov OH a iónov kovov.

Straty vyžarovaním sú spôsobené lomom šíriacich sa lúčov na rozhraní dvoch dielektrických prostredí, s rôznymi vlastnosťami, pričom energia z jadra uniká do prostredia. Toto je typický prípad spájania optických vlákien pomocou konektora, či už čistého, alebo v horšom prípade znečisteného, kde môže dôjsť k „zhoreniu“ styčnej plochy a prerušeniu alebo veľkej chybovosti spojenia. Ilustráciu spoju konektorom typu SC na obr. 2.



Obr. 2 a) optický konektor – pohľad, b) rez optickým konektorom

Straty rozptylom sú spôsobené tým že molekuly amorfného materiálu sú náhodne rozložené v materiály optického vlákna a tak vytvárajú mikronehomogenity v indexu lomu materiálu. Ak sú tieto nehomogenity rozmerovo malé proti vlnovej dĺžke, tak rozptylovým stratám ktoré na nich vzniknú vravíme Rayleighove straty. Smerom k UV oblasti rýchlo narastajú.

K uvedeným stratám sa radia aj straty spôsobené porušením geometrie, tvarov a rozmerov hranice medzi jadrom a plášťom. Takisto aj mikroohyby, kde radíme poruchy priamočiarosti osy vlnovodu [4].

Útlm môžeme definovať nasledujúcim spôsobom. Výkon žiarenia o vlnovej dĺžke vo vzdialenosti z od počiatku vlákna pri vstupnom výkone $P(0, \lambda)$, je daný vzťahom:

$$(z, \lambda) = P(0, \lambda) \exp \left[2x \int \gamma(\lambda \cdot z') dz' \right], \quad (2.0)$$

kde $\gamma(\lambda \cdot z')$ je koeficient útlmu na jednotku dĺžky, zvyčajne závisí na vzdialenosti od počiatku vlákna. Preto zavedieme stredný koeficient útlmu vlákna

$$\bar{\gamma}(\lambda) = \frac{1}{2} \int \gamma(\lambda \cdot z') dz'. \quad (2.1)$$

Čím sa závislosť (2.1) zjednoduší na približný vzťah,

$$P(z, \lambda) = P(0, \lambda) \exp[-\bar{\gamma}(\lambda)z]. \quad (2.2)$$

Tento vzťah je kľúčový pre meranie útlmu optického vlákna diferenciálnou metódou. Po úpravách dostaneme z rovnice (1.2) vzťahy z ktorých dostaneme po úprave koeficient útlmu, ktorý je udávaný prakticky v $\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$ podľa vzťahu:

$$\alpha(\lambda) = \frac{1}{z_2 - z_1} 10 \log \frac{P(z_1, \lambda)}{P(z_2, \lambda)}. \quad (2.3)$$

2.2.3 Optická prenosová trasa

Návrh optickej trasy musí zohľadňovať vhodný typ vlákna, vysielača a prijímača pre danú aplikáciu. Činiteľ šírky pásma musí zodpovedať danej aplikácii, čiže prenosovej rýchlosti signálu.

Vlákno vykazuje určitú hodnotu merného útlmu A , vysielač poskytuje svetelný výkon s úrovňou L_{m1} , prijímač potrebuje výkon minimálnej hodnoty pre príjem signálu L_{m2} , z týchto hodnôt sa vyjadří parameter prekľuteľný útlm A_{\max} :

$$A_{\max} = L_{m1} - L_{m2} \quad [\text{dB}, \text{dBm}]. \quad (2.4)$$

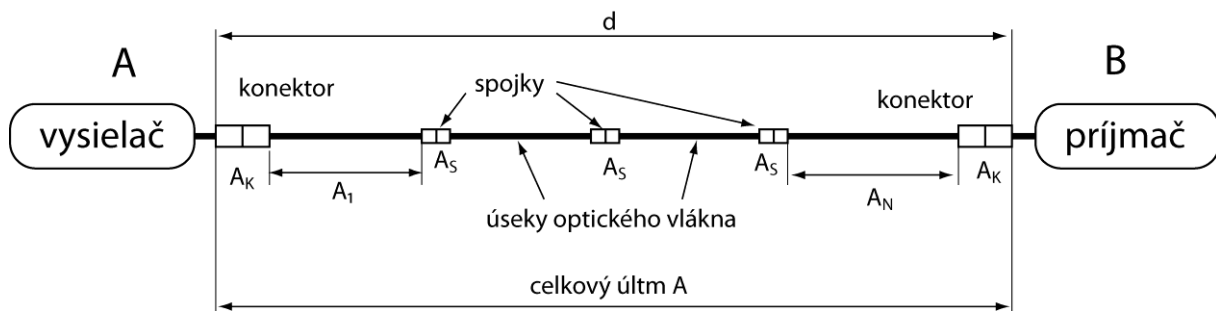
Celkový útlm trasy A s dĺžkou d a N úsekmi je:

$$A = d \cdot a + (N-1) \cdot A_s + 2Ak. \quad (2.4)$$

Kde: A je súčtom útlmov jednotlivých úsekov optických vlákien,
 A_s útlm spojok,
 A_k útlm optických konektorov.

Pre spoľahlivý prenos musí platiť že celkový útlm trasy zväčšený o rezervu A_{rez} musí byť najviac rovný hodnote prekľuteľného útlmu $A_{\max} = A + A_{\text{rez}}$

Dnešné optické systémy dokážu kvalitným jednovidovým vláknom prekľuť aj trasu dlhšiu ako 100 km, ak je vzdialenosť väčšia treba použiť zosilňovač.



Obr. 3 Optická prenosová trasa – ilustrácia celkového útlmu

Prenosové cesty za použitia optických vlákien majú viaceré výhody:

- Veľká šírka pásma, rádovo v THz, čo mnohonásobne prevyšuje možnosti metalických káblov (napr.: koaxiálny kábel – 500 MHz).
- Malé rozmery a váha, optické vlákna sa vyznačujú malým priemerom, čo uľahčuje narábanie s nimi, miniaturizáciu a pravdaže aj váhu.
- Elektrická izolácia, optické vlákna vyrábané z rôznych druhov skiel a plastov sú izolanty, pri prepojení nevznikajú iskry a pod.
- Odolnosť voči vonkajším interferenciám, ako napríklad elektromagnetické rušenie. Energia optického signálu sa prenáša jadrom vlákna, nevyžaruje sa do okolia, to zamedzuje medzikanálové presluchy.
- Nízke straty pri prenose, útlm sa pohybuje okolo $0,2 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ na vlnovej dĺžke 1550 nm, čo umožňuje prenos na dlhé trasy, nemusíme používať zosilňovač ako u metalických vedení.
- Relatívne malé náklady na výrobu, cena materiálu nie je daná nedostupnosťou základnej suroviny, sklo sa získava z kremičitých materiálov zo zdrojov, ktoré nie sú strategické. Cena je daná požadovanou čistotou.[5]

3 PREHĽAD OPTICKÝCH ZOSILŇOVAČOV

3.1 OPTOVLÁKNOVÉ ZOSILŇOVAČE

U týchto zosilňovačov je dôležité hlavne špeciálne vlákno ako médium v ktorom dochádza k požadovanému zosilneniu optického signálu. Optovláknové zosilňovače rady xDFA (EDFA, PDFA, TDFA, YDFA), sa delia na tie ktoré majú špeciálne vlákno vo vnútri zosilňovača a na ramanovské zosilňovače ktoré využívajú k zosilneniu optické vlákno prenosovej trasy. Bežne dostupné sú hlavne EDFA zosilňovače ktoré využívajú vlákno dopované erbiom (Er^{68}) a yterbiom (Yb^{70}). Oba prvky nachádzajú široké využitie v oblasti laserov, optiky a metalurgie. Zosilňujú v pásme C a L. Dnes sú dostupné aj PDFA s vláknom dopovaným prazeodymom (Pr^{59}), ktorý zosilňuje v O pásme (1280 – 1320 nm) a zosilňovače TDFA s vláknom dopovaným túliom (Tm^{69}) pre zosilňovanie v S pásme (1460 – 1490 nm).

3.1.1 EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier)

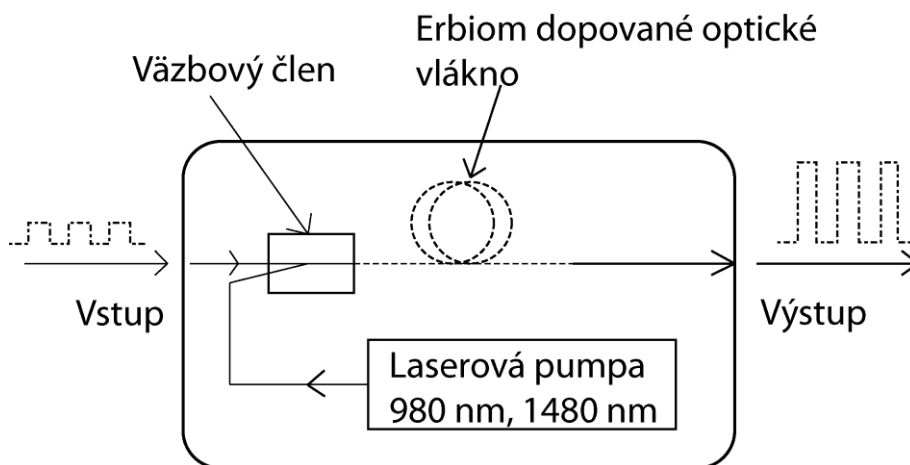
Tieto zosilňovače sa skladajú z optického vlákna niekoľko desiatok metrov dlhého ktoré je dopované vzácnou zeminou s erbiom Er^{+3} . Princíp EDFA bol objavený v roku 1960, ale až vývojom a ekonomikou bolo možné dosiahnuť nižšiu cenu laserových púmp a bolo ho možné komerčne nasadiť v oblasti optických sietí v deväťdesiatych rokoch dvadsiateho storočia.

EDFA systémy dovolili vzniku novej generácie optických komunikácií a systémov. Výhodou EDFA je zosilňovať optický signál súčasne na viacerých vlnových dĺžkach. Toto zvyšuje prenosovú kapacitu systému a vďaka možnosti prenosu viacerých vlnových dĺžok pomocou jednovidového vlákna využitie technológie optického multiplexu WDM. EDFA pomohlo k zníženiu cien na diaľkových trasách zvýšilo ich kapacitu. Namiesto jedného drahého optického zosilňovača pre jednu vlnovú dĺžku je použitý jeden optický zosilňovač pre celý rozsah vlnových dĺžok na jednom vlákne. WDM systémy s EDFA podporujú už od deväťdesiatych rokov dvadsiateho storočia, nárast kapacity optických sietí a dnes sa kapacita optického vlákna pohybuje na desiatkach Gbps.

S nástupom EDFA zosilňovačov sa začali vyskytovať nežiaduce javy, ktoré sú s veľkými prenosovými rýchlosťami späté. Jedným z nich je aj chromatická disperzia, ktorá je spôsobená rozdielnou rýchlosťou spektrálnych zložiek prenášaných signálov.

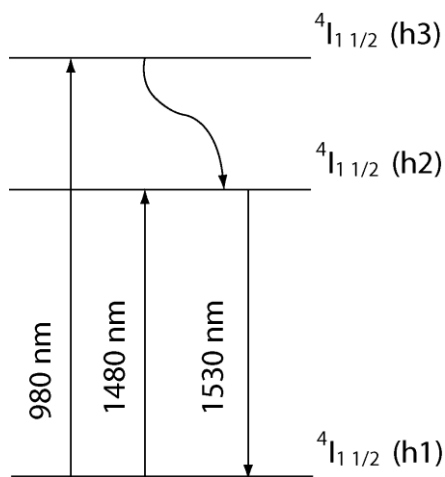
Dnes sú EDFA zosilňovače najpoužívanejšie v optických komunikáciách. Zaisťujú aj prenos dát cez atlantický oceán a inde, kde ležia tisíce kilometrov optického káblu a signál je

značne utlmený a musí byť zosilnený.



Obr. 4 Bloková schéma EDFA zosilňovača

Na obr. 4 je bloková schéma s optickým izolátorom, ktorý bráni spätnému odrazu časti zosilneného signálu. EDFA patrí z hľadiska princípu medzi optovláknové zosilňovače. Základom je optické vlákno dopované iontami erbia Er^{+3} . Vplyvom absorpcie fotónov z laserovej pumpy, ktorá pracuje na vlnové dĺžke 980 nm alebo 1480 nm do spomenutého špeciálneho vlákna o dĺžke niekoľko desiatok metrov. Tu dochádza k excitácii atómov dopovaného prvku na vyššie energetické hladiny h_3 (980 nm) alebo h_2 (1480 nm) zobrazené na obr. 5. Fotón po čerpaní na 980 nm veľmi rýchlo (7 μs) prechádza z hladiny h_3 do metastabilného stavu h_2 ako pri priamom čerpaní na 1480 nm. Na tejto rovnovážnej hladine zotrúva dlhšiu dobu približne 10 ms. To znamená že energia z laserovej pumpy je teraz uložená vo fotónoch. Uvoľnenie energie nastane pri prenose signálu, ktoré energia spôsobuje stimulovanú emisiu žiarenia o zhodnej vlnovej dĺžke a fáze s prenášaným signálom to spôsobuje koherentné žiarenie. Fotón optického signálu je koherentne zosilňovaný práve keď prevažuje stimulovaná emisia nad absorpciou fotónov, podobne ako u SOA.



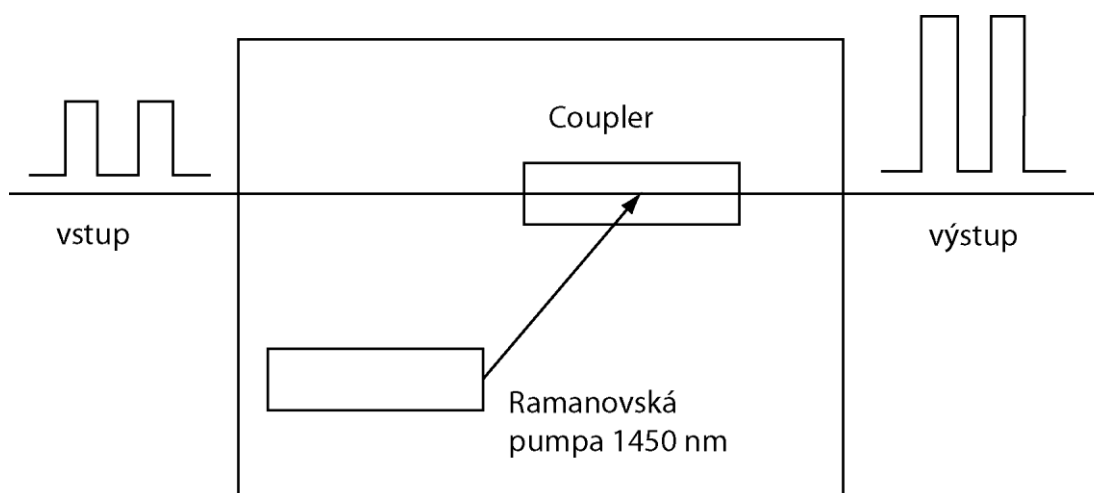
Obr. 5 Energetické hladiny EDFA zosilňovača

Pri použití laserovej pumpy o vlnovej dĺžke 1480 nm dosiahneme vyššieho zosilnenia ale nižšiu účinnosť zosilnenia a vyšší šum. Prvý stupeň EDFA zosilňovača využíva čerpanie pomocou 980 nm pumpy, ktorá zaistí dostatočný zisk a nízky šum a druhá časť tvorená 1480 nm laserovou pumpou zaistí vysoký výstupný výkon. Táto kombinácia zaistí nízky šum a vysoký výstupný výkon EDFA zosilňovača. V prípade výpadku jednej pumpy druhá pumpa zaistí základnú funkčnosť zosilňovača celého systému. Čo je dôležitá vlastnosť pri prenosoch na optických trasách kde musí byť komunikácia zabezpečená aj pri výpadku alebo poruche prístroja. Medzi vlákna je možné vložiť stratový element (ASE filter, disperzný filter), ktorý vylepšuje vlastnosti zosilňovača.

Šírka pásma vlnových dĺžok je pre xDFA zosilňovače dôležitá. To znamená že signály rozdielnych vstupných úrovní budú zosilnené rozdielne. Toto spôsobuje problém pri prenose väčšieho počtu vlnových dĺžok. Zosilňovaciú krivku možno vyrovnať použitím fluoridového vlákna namiesto kremíkového. Takýto zosilňovač sa nazýva EDFFA (Zosilňovač s erbiom dotovaným fluoridovým vláknom; z ang.: Erbium Doped Fluoride Fibre Amplifier). Tie dokážu dosiahnuť vyrovnanejšiu krivku zosilnenia v oblasti 1550 nm, ktorá je pre nás dôležitá. V týchto zosilňovačoch sa ale využíva už len jedna pumpa 1480 nm. Nevýhodou je aj náročné zaobchádzanie zo zariadením, hlavne kvôli krehkosti a neľahké prepojenie s kremíkovými vláknami. Druhá možnosť ako zaistiť vyrovnanejšiu zosilňovaciú krivku je použitie filtru vo vnútri EDFA zosilňovačov. Filtre obmedzia špičku zosilnenia ktorá sa nachádza na 1532 nm. EDFA zosilňovače umožňujú zosilnenie až 50 dB v C pásme. Nie sú závislé na polarizácii signálu (aktívne ionty sú náhodne orientované v sklenenej matici). Majú nízke šumové číslo (blíži sa limitu 3 dB) a sú odolné voči kanálovému presluchu. Avšak nevýhodou je ich obtiažna miniaturizácia a využiteľnosť len pre C a L pásmo. Pre ostatné pásme je nutné použiť fluoridové vlákna alebo ramanovské zosilňovače. EDFA zosilňovače je možno nasadiť rôzne.

3.1.2 Ramanovské optické zosilňovače

Začiatkom sedemdesiatych rokov dvadsiateho storočia R.H. Stolen a E.P. Ippen ako prvý použili ramanov rozptyl na zosilnenie optického signálu v optickom vlákne. Zo začiatku neboli brané vážne a ich miesto zastupovali EDFA zosilňovače. Ich nasadenie začalo až v deväťdesiatych rokoch dvadsiateho storočia. Dnes sa nasadzujú takmer do všetkých diaľkových trás. Príklad ramanovského typu zosilňovača pre zosilnenie optického signálu je na obr. 6.



Obr. 6 Bloková schéma ramanovského zosilňovača

Ide o laserový zdroj pripojený k optickej trase, kde sa zosilnenie signálu získava vďaka ramanovskému rozptylu na časticiach materiálu vlnovodu. Ramanovské zosilnenie je založené na ramanovskom rozptyle. Ramanov rozptyl označuje jav, kde fotón excituje vyššie vibračné módy molekúl SiO_2 a je tak rozptyľovaný do vlny, ktorá sa líši o energiu vibračného prechodu, pre kremenné sklo, použité v optických kábloch, je to 13,2 THz. Pri tomto rozptyle dochádza k presunu energie z nižších vlnových dĺžok (vlnová dĺžka žiarenia ramanovskej pumpy) na vyššie vlnové dĺžky prenášaného signálu a tak dochádza k zosilneniu. Avšak úroveň zosilnenia nedosahuje také hodnoty ako u EDFA, úroveň môžeme zvýšiť použitím tohto zosilňovača o 15 až 20 dB. Umiestňuje sa na koniec optického prenosového vlákna a zosilnenie vlnových dĺžok je závislé od vlnovej dĺžky laserovej pumpy [6].

3.2 POLOVODIČOVÉ ZOSILŇOVAČE

Medzi polovodičové zosilňovače sa radia moderné elektrotechnické súčiastky, ktoré využívajú pokročilé metódy vo vývoji polovodičových súčiastok. Jedná sa o špecificky usporiadané vrstvy polovodiču, ošetrované odrazovými čelami, tak aby vznikla stimulovaná emisia. Rozmanitosť princípov a usporiadaní, dovoľuje vysvetliť len niekoľko.

3.2.1 Krátka história polovodičových optických zosilňovačov

Prvé štúdie na SOA boli uskutočnené v čase vynálezu polovodičového laseru v šesťdesiatych rokoch dvadsiateho storočia. Tieto ranné zariadenia boli založené na homogénnych prechodoch GaAs (Arzenid gália) pracujúcich na nízkych teplotách. Príchodom

zariadení založených na dvojitej heteroštruktúre (t.j. štruktúra ktorá vznikne vypestovaním dvoch polovodičových materiálov vo forme sendviča) podnietili ďalší výskum vo využití SOA v optických komunikačných systémoch. V sedemdesiatych rokoch dvadsiateho storočia páni Zeidler a Personick pracovali na prvých SOA. V osemdesiatych rokoch dvadsiateho storočia došlo k ďalšiemu posunu v oblasti SOA čo sa týkalo najmä modelovania a dizajnu. Ranné štúdie sa zameriavali hlavne na AlGaAs (Arzenid Gália a Hliníku) SOA pracujúce na vlnovej dĺžke 830 nm. V neskorých osemdesiatych rokoch sa začali objavovať štúdie na InP/InGaAsP SOA navrhnutých tak aby pracovali na vlnových dĺžkach 1300 nm a 1550 nm. Pokroky vo vývoji bezodrazových povrchov umožnili výrobu takzvaných „travelling-wave“ SOA. Pred rokom 1989, mali SOA štruktúry založené na bezodrazových povrchoch asymetrickú vlnovodnú štruktúru, ktorá viedla k tomu že zosilnenie bolo silne závislé na polarizácii. Avšak v roku 1989 sa SOA začali vyrábať s viac symetrickými vlnovodnými štruktúrami, čo viedlo k zníženiu závislosti na polarizácii. To viedlo k SOA tak ako ich v menších obmenách poznáme dnes.

3.2.2 SOA (Semiconductor Optical Amplifier)

SOA je optoelektronické zariadenie, ktoré pri vhodných pracovných podmienkach dokáže zosilniť vstupný optický signál. Aktívna oblasť v zariadení dodáva zosilnenie vstupnému signálu. Externý elektrický prúd poskytuje zdroj energie ktorá umožňuje konečné zosilnenie optického signálu. Zabudovaný vlnovod ohraničí vstupný signál tak aby sa dostal do aktívnej oblasti. Avšak optické ohraničenie je slabé a časť signálu „pretečie“ do okolia a utlmí sa. Výstupný signál je sprevádzaný šumom, ktorý je zložený zo šumu vstupného signálu a šumu, ktorý vznikol procesom zosilnenia. Tento dodatočný šum je vytvorený samotným procesom zosilnenia a tak je zrejme že mu nemožno plne zabrániť. Čelá zosilňovača sú odrazové čo spôsobuje zvlnenie spektra zosilnenia.

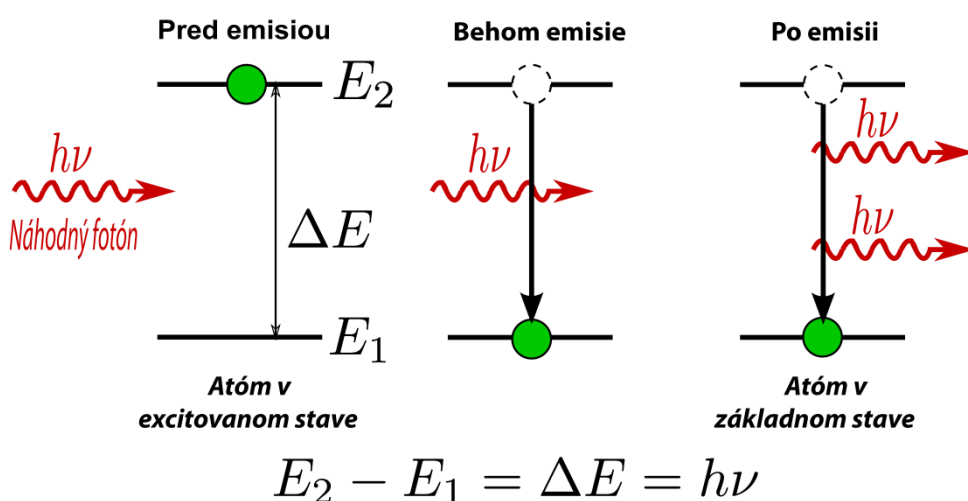
SOA možno rozdeliť na dva hlavné typy. Fabry Perot SOA (FP-SOA) kde odrazy z koncových čiel sú významné (t.j. signál absolvuje veľa prechodov zosilňovačom) a takzvané „travelling-wave“ SOA (TW-SOA) kde odrazy sú zanedbateľné (t.j. signál prejde zosilňovačom iba raz). Bezodrazové povrchy môžu byť použité k vytvoreniu SOA s odrazivosťou na čelách menšou ako 10^{-5} . TW-SOA nie je natoľko citlivé ako FP-SOA na fluktuácie pokojového prúdu, teploty a polarizácie signálu.

3.2.3 Princípy zosilnenia v SOA

V SOA elektróny (označované aj ako nosiče) sú injektované z externého zdroja prúdu do aktívnej oblasti. Tieto vybudené nosiče obsadzujú energetické hladiny vo vodivom páse (CB conduction band) aktívnej oblasti materiálu, zanechávajú za sebou diery vo valenčnom páse (VB valence band). V polovodiči sú možné tri mechanizmy radiácie. Pre materiál ktorého štruktúra pozostáva z dvoch energetických hladín je na obr. 7.

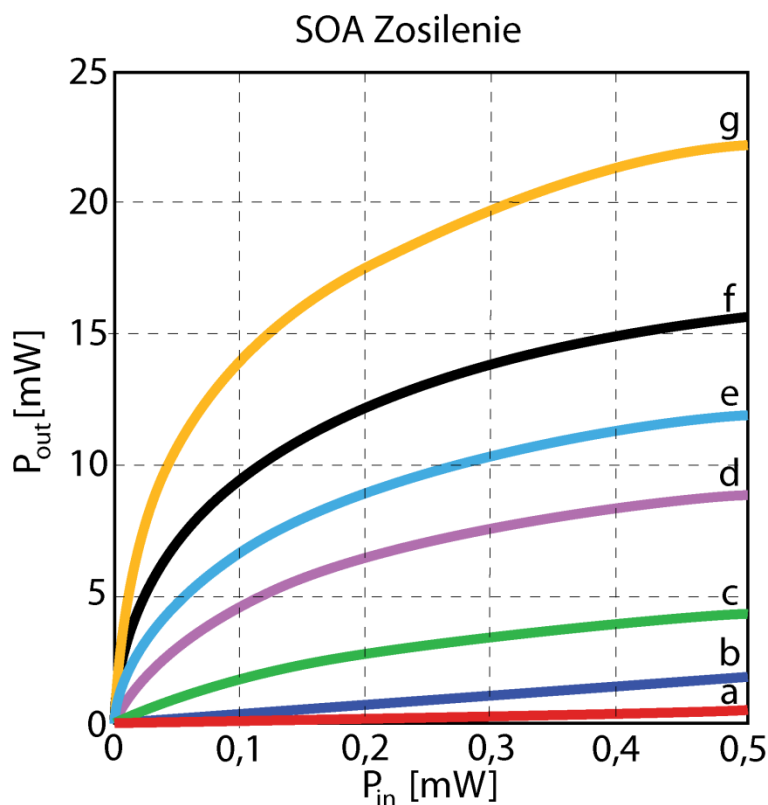
V stimulovanej absorpcii môže náhodný svetelný fotón s dostatočnou energiou stimulovať nosič valenčného pásu do vodivého pásu. V tomto procese náhodný fotón vyhasne.

Ak sa náhodný fotón svetla s dostatočnou energiou ocitne na polovodiči, môže stimulovať rekombináciu nosiča z vodivého pásu s dierou vo valenčnom páse. Rekombinačný nosič stratí svoju energiu vo forme fotónu svetla. Tento nový stimulovaný fotón bude identický vo všetkých aspektoch budiaceho fotónu (vrátane zhodnej fázy, frekvencie a smeru, t.j. koherentná interakcia). Oba, originálny fotón aj stimulovaný fotón, môžu vyvolať viac stimulovaných prechodov. Ak injektovaný prúd je dostatočne veľký, vtedy populačná inverzia (t.j. jav ktorý nastáva keď systém, ako napríklad skupiny atómov alebo molekúl, existujú v stave s viacerými členmi vo vybudenom stave, ako tých na nižších energetických hladinách) je vytvorená, keď populácia nosičov vo vodivom páse prekročí tú vo valenčnom páse. V tomto prípade pravdepodobnosť stimulovanej emisie je vyššia ako stimulovanej absorpcie a čo sa preukáže optickým zosilnením polovodiča.



Obr. 7 Absorpcia, spontánna emisia a stimulovaná emisia v SOA zosilňovači

V procese spontánnej emisie je nenulová šanca za jednotku času že nosič vo vodivom páse spontánne zrekombinuje s dierou vo valenčnom páse s následkom emitovania fotónu s náhodnou fázou a smerom. Spontánne emitované fotóny majú široké pásmo frekvencií. Spontánne emitované fotóny sú v zásade šum a podieľajú sa na redukovaní populácie nosičov dostupných pre optické zosilnenie. Spontánna emisia je priamy následok procesu zosilnenia a nemôžeme sa jej vyhnúť, to znamená bezšumové SOA nemožno vytvoriť. Stimulované procesy sú proporčné k intenzite budiaceho žiarenia zatiaľ čo spontánna emisia je od budiaceho žiarenia nezávislá [1].



Obr. 8 Závislosť vstupného výkonu na výstupnom výkone SOA zosilňovača. Injektovaný prúd odhora nadol: a) 160 mA, b) 200 mA, c) 240 mA, d) 300 mA, e) 340 mA, f) 400 mA, g) 520 mA [14].

Na obr. 8 sú zosilňovacie charakteristiky SOA pre inkoherentné svetlo, závislosť výstupného zosilnenia na vstupnom zosilnení. Zosilnenie SOA je takmer lineárne pri nízkych vstupných výkonoch a prehýba sa pri vstupných výkonoch na úrovňou saturácie. Celkový výstupný výkon stúpa s narastajúcim injektovaným prúdom. Vďaka spontánnej emisii je výstupný výkon nenulový aj pri nulovom vstupnom výkone [14].

4 KONŠTRUKCIA

Konštrukciou optického zosilňovača sa zameriavame na overenie možností optických zosilňovačov a ich využitie v akademických podmienkach rovnako ako v nasadení na skutočných linkách. Jedným z cieľov je umiestniť riadiacu elektroniku a modul s optickým zosilňovačom do normalizovaného rozmeru 2U (t.j. 3,50 palcu = 88,90 mm, z ang.: 2 Rack Unit) šírky typicky 19 palcov (482,6 mm). K dispozícii som mal integrovaný obvod optického zosilňovača SOA 1013 od firmy Covega (akvizovaná firmou Thorlabs).

Po zhodnotení zadaných podmienok a dostupných súčiastok som sa rozhodol použiť obvod ATLS1A103 ako zdroj konštantného prúdu pre SOA1013. Rovnako obvod TECA1-3V-3V-D je najvhodnejší ako kontrolér peltierovho článku a obvod zaručujúci tepelnú stabilitu vďaka spätnej väzbe z termistoru zabudovaného priamo v SOA1013. Zosilňovač je určený pre prácu v pásme C (Conventional) 1530–1565 nm. Pre linku na ktorú je plánované použitie je nutné nastaviť saturovaný výkon cca 10 dB, nakoľko pre trasy dlhé 100–150 km je ich útlm 30–38 dB, zatiaľ čo citlivosť detektorov je 30 dB.

Chladienie obvodu SOA je vyriešené dostatočne nadimenzovaným hliníkovým chladičom s rebrami. SOA bol pre lepšiu tepelnú vodivosť ošetrený teplovodivou pastou Cool Master HTK-002 s tepelnou vodivosťou $0,8 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$. Chladič je spojený so zemným potenciálom, tak ako je na to súčiastka SOA uspořobená.

Vybraný spínaný zdroj MeanWell RS25-3.3, je vysokej akosti a efektivity. Celé zariadenie si vyžaduje dostatočne *tvrdý* zdroj o napätí 3,3 V. Zariadenie je navrhnuté tak aby sa v prvej fáze dalo nastaviť jednoducho, len za pomoci niekoľkých trimrov a DIP prepínača.

V druhej fáze konštrukcie som pridal DPS (doska plošného spoja) digitálneho riadenia vybaveného mikrokontrolérom ATMega 328-AU.

4.1 DOSKA ANALÓGOVÉHO RIADENIA

Rozloženie súčiastok je odvodené od základnej schémy zapojenia s ohľadom na umiestnenie a orientáciu zariadenia v prístrojovej skrini, orientáciu konektorov, rozloženia tepelného zaťaženia a optimálneho prístupu k nastavovacím prvkom a prvkom prepojenia s DPS digitálneho riadenia. S ohľadom na veľkú mechanickú citlivosť a chladenie SOA1013, je obvod na oddelenej doske plošného spoja spojeného s chladičom. Ako konektory na prepojenie dosiek plošného spoja zosilňovača som zvolil konektory CANON CAN 9 V 90. Prepojenie je realizované viacžilovým tieneným vodičom s koncovkami CANON CAN 9 Z. Žili vodiča sú pospájané tak aby mal kábel dostatočnú prúdovú zaťažiteľnosť.

Snímanie správnej funkčnosti obvodov signalizujú zelené led diódy označené *LED1* a *LED2*. Ich umiestnenie je blízko použitého obvodu. Rovnako sú blízko obvodov umiestnené aj mikrospínače pre urýchlené vypnutie obvodu v prípade poruchy alebo nežiadaneho správania, označené *Shutdown S1* a *Shutdown S2*.

Chladenie je pre optický zosilňovač riešené pasívne pomocou robustného hliníkového chladiča. Z dôvodu chladenia ale aj mechanického rozmiestnenia je zosilňovač rozdelený na dve dosky plošného spoja.

Prvá doska je osadená obvodom ATLS1A103 ktorý slúži ako obvod konštantného prúdu a obvodom TECA1-3V-3V-D ktorý slúži ako kontrolér peltierovho článku. Doska je vyrobená tak aby mohla pracovať samostatne bez digitálneho riadenia, vtedy sa nastavuje analógovo, len za pomoci viacotáčkových trimrov a voltmetra. Všetky piny použitých obvodov sú dostupné na kolíkových lištách umiestnených blízko puzdra obvodu. Charakter dosky je vďaka tomu otvorený vývoju. Táto DPS sa pri laboratórnom meraní správala bezproblémovo, avšak nastavenie prúdu pomocou trimra vykazovalo malú zotrvačnosť a bolo nutné vyčkať na ustálenie napätia tak aby sa zhodoval s vypočítanou hodnotou. Priamo na zosilnenie SOA1013 táto vlastnosť nemala znateľný dopad.

Obvody od firmy Analog Technologies (ATLS1A103 a TECA1-3V-3V-D) sú dômyselne navrhnuté tak, že v našom návrhu, pre daný prúdový odber nevyžadujú chladič.

4.2 DOSKA DIGITÁLNEHO RIADENIA

Na DPS digitálneho riadenia je centrálné použitý 8 bitový mikrokontrolér ATmega 328-AU, ktorý pre dané použitie plne postačuje. Na DPS sa ďalej nachádza 16x2 LCD display, pre zobrazenie informácií o stave zariadenia, rotačný enkodér so spínačom pre ovládanie nastavenia a prehľadu hodnôt. Na DPS nechýba ani rozhranie SPI pre pripojenie ethernetového modulu arduino a nahratie počiatočného bootloderu mikrokontroléru. Rozhranie UART (z ang.: Universal Asynchronous Receiver Transmitter) slúži pre dodatočné ladenie programu ktorý bude mikrokontrolér využívať. Na DPS sa nachádza prepojenie s obvodom ATLS1A103 ktorý slúži na riadenie konštantného prúdu pre SOA1013, prepojenie s obvodom TECA1-3V-3V-D ktorý slúži k regulácii teploty pomocou peltierovho článku a termistoru a prepojenie s DPS PIN diódy. Z oboch obvodov možno odčítať hodnoty ale rovnako ich aj nastavovať pomocou DAC. Použité sú 10 bitové DAC LTC2635 od firmy Texas Instruments s ktorými možno komunikovať pomocou I2C rozhrania priamo s mikrokontrolérom ATmega 328-AU. DPS Pin diódy je riešená ako regulovaná proporcionálne integračná sústava. Jej osadenie súčiastkami je závislé od požadovaných výkonov ktoré má regulovať.

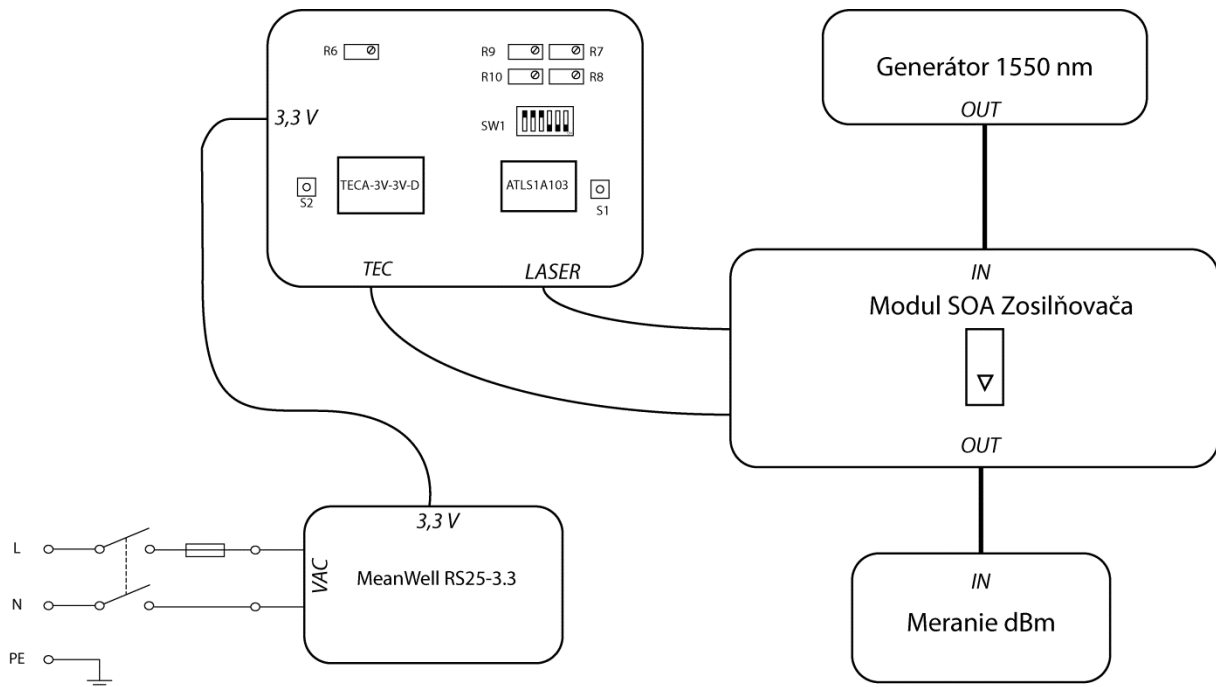
Mimo iného bolo zadaním umožniť zosilňovaču pracovať aj v režime konštantného výkonu, čo chceme dosiahnuť spätnou väzbou. Signál sa rozdelí pomocou optického rozdeľovača (tzv. „splitra“) a v pomere 95/5 sa 5% signálu odvedie do špeciálnej detekčnej PIN diódy.

V nasledujúcich stranách je opísaná ovládanie a súčiastková základňa na ktorej budujeme SOA optický zosilňovač.

4.3 OVLÁDANIE OPTICKÉHO ZOSILŇOVAČA

4.3.1 Zapojenie s doskou analógového riadenia

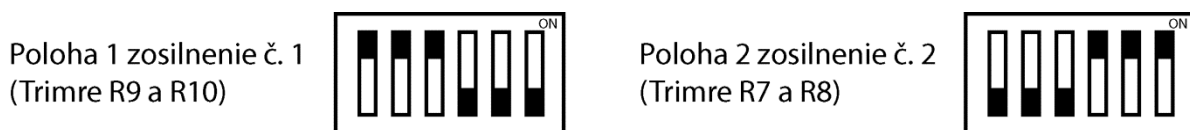
Na obr. 9 je zobrazené zapojenie modulu optického zosilňovača. Ovládacie prvky sú znázornené a označené.



Obr. 9 Zapojenie modulov optického zosilňovača pre počiatočné nastavenie

Optický zosilňovač nastavíme v niekoľkých krokoch.

- S odpojeným zdrojom zvolíme nastavenie č. 1 alebo č. 2 podľa kombinácií prepínača SW1 a pre dané nastavenie ďalej kalibrujeme.



Obr. 10 Nastavenie DIP prepínača SW1

- Obmedzenie výstupného prúdu sa nastaví trimrom R10, pre zosilnenie č. 1, a trimrom R8 pre zosilnenie č. 2. Tieto trimre nastaví výstupné napätie na pine 4, LILM, obvodu ATLS1A103, výstupný prúd potom:

$$I_{\text{out}} = \frac{1,1 \cdot V_{\text{LILM}}}{2,5} [\text{A}]. \quad (4.1)$$

Pin LILM by nikdy nemal byť plávajúci. Inak obmedzenie výstupného prúdu môže byť nastavené na vysokú hodnotu a tak poškodiť SOA nadprúdom.

- Výstupný prúd nastavíme trimrom R9, pre zosilnenie č. 1, a trimrom R7 pre zosilnenie č. 2. Tieto trimre nastaví napätie na pine 5, LIS, obvodu ATLS1A103.

Výstupný prúd potom:

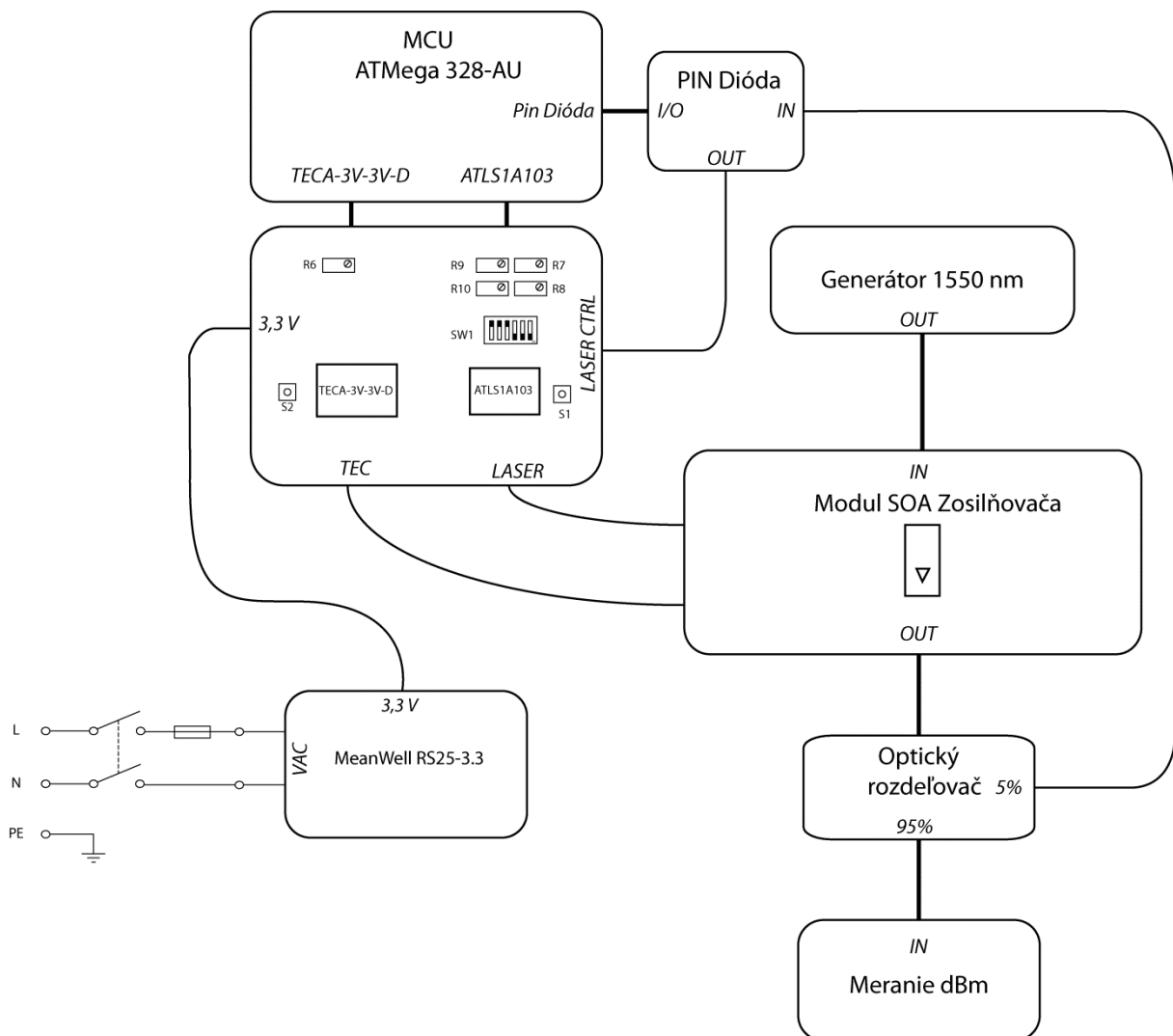
$$I_{\text{out}} = \frac{V_{\text{LIS}}}{2,5}[\text{A}]. \quad (4.2)$$

- Nastavenie obvodu TECA1-3V-3V-D v tomto zapojení je pomerne jednoduché, pin č. 3 (TEMPSP) nastavíme pomocou trimru R6 na 1,5 V čo bude odpovedať 25 °C.

4.3.2 Zapojenie s doskou digitálneho riadenia

Na obr. 10 je zobrazené zapojenie modulu optického zosilňovača spolu s digitálnym riadením. Ovládacie prvky sú znázornené a označené.

Navrhované riešenie sa však neskôr ukázalo ako neschodné, tak ako naznačujú merania. Pre udržanie konštantného výkonu je jediná možnosť pri module SOA 1013 zosilniť vstupný signál na maximum a vložiť do cesty signálu variabilný útlmový článok, VOA (z ang.: variable optical attenuator). Toto riešenie však celý zosilňovač zbytočne predražuje.



Obr. 11 Zapojenie modulu optického zosilňovača SOA s digitálnym riadením

5 POUŽITÉ SÚČIASTKY

5.1 ATMEGA 328-AU

Digitálne riadenie zaisťuje mikrokontrolér ATmega 328-AU od firmy Atmel v puzdre 32TQFP. Jedná sa o 8 bitový mikrokontrolér s architektúrou RISC. Je možné ho vybaviť bootloaderom, ktorý podporuje vývojové prostredie arduino. Mikrokontrolér je vybavený 10 bitovým A/D prevodníkom a digitálnymi výstupmi.

5.2 LTC2635-10BIT DAC

Ako DAC som zvolil obvod LTC2635HMSE-LMX1PBF od firmy Linear Technology. Primárne sa jedná o 10 bitový DAC so štyrmi výstupmi a s externou napäťovou referenciou, ktorá nastaví výstupný rozsah na hodnotu použitej napäťovej referencie.

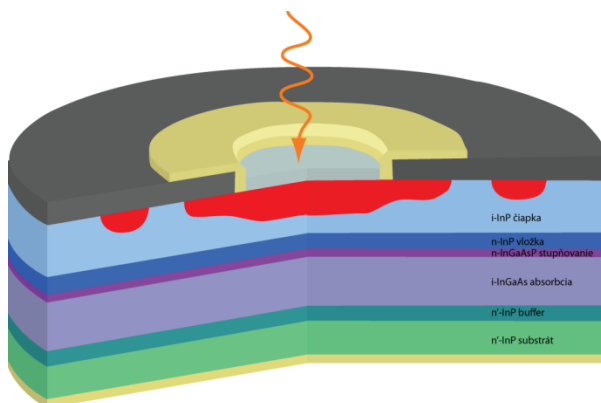
Tieto prevodníky komunikujú pomocou I2C rozhrania. Použité puzdro je 10-MSOP.

5.3 TLC272D

V obvode pre nastavenie režimu konštantného výkonu bolo nutné použiť kvalitný dvojitý operačný zosilňovač. Zvolil som TLC272D od firmy Texas Instruments. Použitý je v obvode regulovanej proporcionálne integračnej sústavy, ktorá priamo riadi obvod ATLS1A103 ktorý dodáva prúd SOA1013. Toto je nutné pre režim konštantného výkonu. Použité puzdro je 8-SOIC.

5.4 PIN DIÓDA

PIN diódy umožňujú množstvo aplikácií v spektre blízkom infračervenému (1000 nm až 1700 nm) si vyžaduje detekciu jednotlivých fotónov [8].



Obr. 12 Rez PIN diódou

5.4.1 KPDE086S

Jedná sa o úzkopásmovú fotodiódu založenú na Indium Gálium Arzenide (InGaAs), s prívlastkom NIR (t.j.: pracujúca blízko infračerveného spektra, z ang.: Near Infra Red) [12].

Parameter	Symbol	Hodnota	Jednotka
Záverové napätie	V_R	20	V
Maximálny výkon optického vstupu	$P_{I_{max}}$	50	mW
Priepustný prúd	I_F	50	mA
Pracovná teplota	T_{opr}	-40 do +85	°C
Teplota uskladnenia	T_{stg}	-40 do +85	°C

Tab. 1 Špecifikácie použitej PIN diódy

Parameter	Symbol	Hodnota			Jednotka	Podmienky
		Minimálna	Typická	Maximálna		
Citlivý rozmer	D		0,86 x 0,86		mm	
Citlivá vlnová dĺžka	λ	900		1700	Nm	
Odozva	R	0,9	1,0		A/W	$V_a=5$ V, $\lambda=1550$ nm
Šírka pásma	BW		30		MHz	$P_i=-10$ dBm, $V_R=5$ V
Uniformita odozvy	ΔR			0.5	dB	$\lambda=1530-$ 1610 nm, $T_{opr}=-10$ do $+85$ °C

Tab. 2 Elektrické a optické charakteristiky použitej PIN diódy

5.5 TECA1-3V-3V-D

Kontrolér Peltierovho článku (tzv.: TEC z ang.: Thermo Electric Cooler) od firmy Analog Technologies. Jedná sa o špecializovaný obvod zameraný na riadenie spomenutého Peltierovho článku a spätnú väzbu termistoru integrovaného v SOA zosilňovačoch. Nakoľko je určený na širšie použitie a Peltierove články rovnako ako aj termistory majú rôzne parametre, je nutné vyladiť jeho kompenzačnú sieť.

Z tohto dôvodu a z dôvodu napájania 3,3 V je zvolená verzia súčiastky TECA1-3V-3V-D čo znamená, že sa jedná o súčiastku napájanú 3,1~3,5 V, podľa katalógového listu. Prípona „-D“ znamená že sa jedná o verziu súčiastky s externou kompenzačnou sieťou, pre naše podmienky najvhodnejšia voľba.

K nastaveniu kompenzačnej siete je firmou Analog Technologies, doporučená vývojová doska TECEV104.

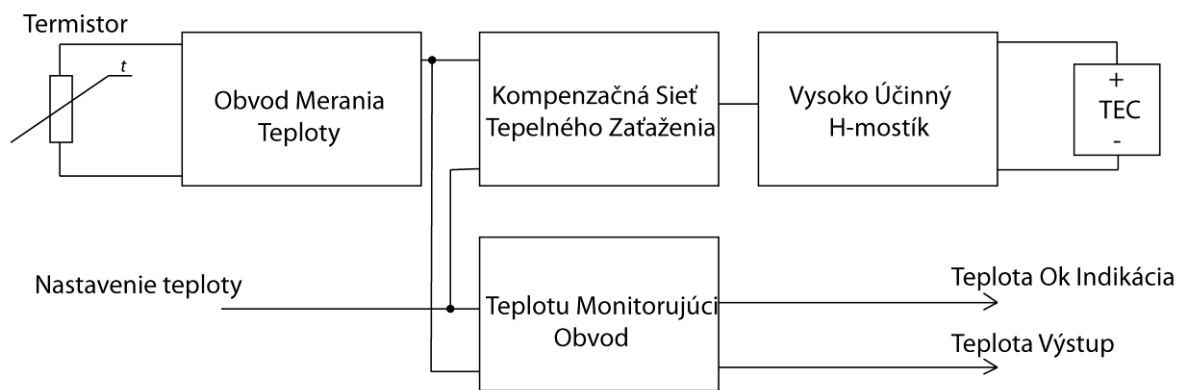
Obvod TECA1-3V-3V-D disponuje:

- vysokou účinnosťou: $\geq 90\%$,
- maximálnym výstupným prúdom: 2.5 A,
- monitorovaním teploty chladeného objektu,
- vysokou tepelnou stabilitou: 0.01°C,
- nulovou EMI.

Obvod poskytuje tieto funkcie:

- linearizácia T-R krivky termistoru,
- meranie a monitorovanie teploty,
- monitorovanie napätia TEC,
- oneskorenie zapnutia a vypnutia.

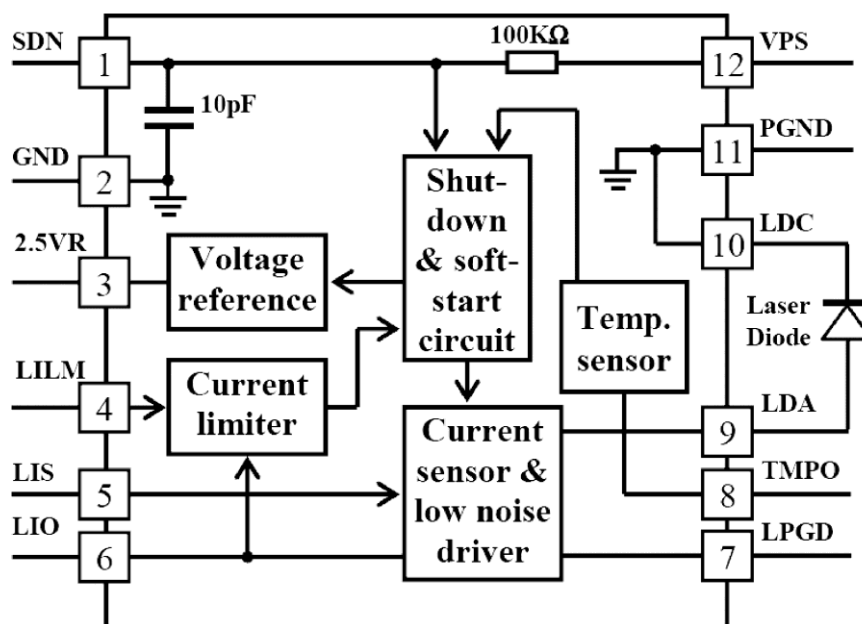
Teplotu je možno podľa katalógového listu nastaviť potenciometrom alebo pomocou DAC (digitálne analógového prevodníku; z ang.: Digital Analog Converter). Tu bude použitý mikrokontrolér, ktorý bude slúžiť jednak pre nastavenie teploty ale aj na snímanie aktuálnej teploty a napätia na TEC [10].



Obr. 13 Bloková schéma TECA1-3V-3V-D

5.6 ATLS1A103

Jedná sa o modul navrhnutý konkrétne na riadenie SOA, EDFA, laserových diód a podobne. Výstupný prúd môže byť až 1 A, nízky šum je zaistený technológiou DPSSL (Diode Pumped Solid-State Laser). V prípade prekročenia teploty 120°C sa kontrolér automaticky vypne, aby nedošlo k poškodeniu vnútorných obvodov. Vnútorne referenčné napätie je 2,5 V od ktorého je odvodené nastavenie výstupného prúdu. Toto referenčné napätie je možné použiť aj ako referenciu pre externý ADC (analogovo digitálny prevodník, z ang.: Analog Digital Converter), alebo pre DAC, ktoré sú určené na prevod analógových signálov ako napríklad LIO (indikácia prúdu laseru, z ang.: Laser Current Output Indication), ktorý reprezentuje výstupný prúd alebo na prevod digitálnych na analógové pre nastavenia napätí ako napríklad LIS (nastavený prúd laseru, z ang.: Laser Current Set), ktorý nastavuje výstupný prúd.[9]



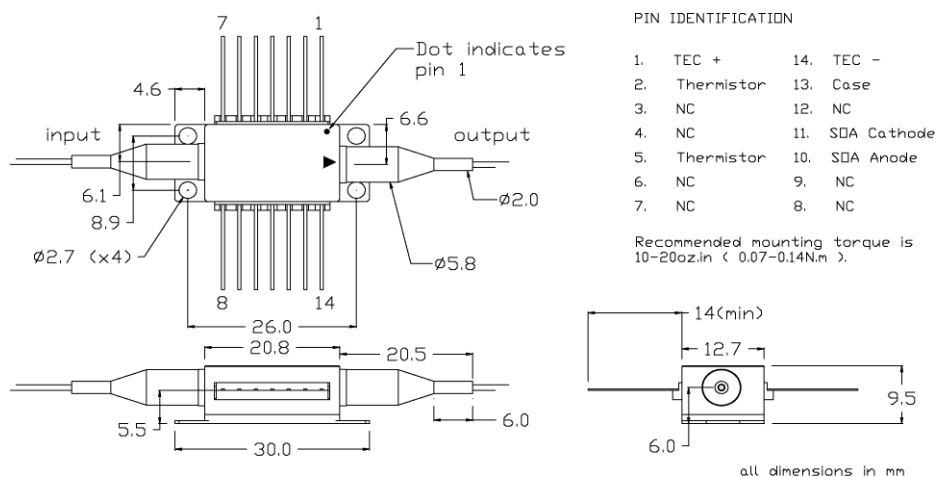
Obr. 14 Vnútorná schéma ATLS1A103

5.7 SOA1013S

SOA1013S od firmy Thorlabs, je optický zesilňovač typu SOA zapuzdrený v tzv. butterfly (z ang.: motýľ) puzdre. Tento zesilňovač a moderné technológie ktorými bol vyrobený zaručujú vysoký saturevaný výkon, nízky šum, a vysoké zosilnenie v širokom pásme spektra [11].

Typ obvodu	SOA1013S		
Parameter	Min	Typicky	Max
Pracovní prúd	–	500 mA	600 mA
Stredná vlnová dĺžka	1520 nm	1550 nm	1570 nm
Optická 3 dB šírka pásma	70 nm	74 nm	–
Saturevaný výstupný výkon (při -3 dB)	12 dBm	14 dBm	–
Plochosť zosilnenia	–	5 dB	7 dB
Kolísanie zosilnenia	–	0,1 dB	0,5 dB
Šumové číslo	–	8.0	9.5
Priepustné napätie	–	1.6 V	1.8 V
Prúd TEC	–	0.23 A	1.5 A
Napätie TEC	–	0.5 V	3.5 V
Odpor termistoru	–	10 k Ω	–

Tab. 3 Základné parametre SOA1013



Obr. 15 Rozmery a usporiadanie pinov u SOA1013

5.8 MEANWELL RS–25–3.3

Jedná sa o kvalitný spínaný zdroj s jedným 3,3 V výstupom.[13]

Vlastnosti:

- univerzálny sieťový vstup / plný rozsah,
- ochrana pred: skratom, preťažením, prepätím,
- chladenie pasívnym prúdením vzduchu,
- LED indikátor,
- vybavené kondenzátormi s dlhou životnosťou,
- vysoká pracovná teplota až 70°C,
- odolnosť proti otrasom,
- vysoká efektívnosť.

Model		RS-25-3.3
Výstup	Jednosmerné napätie	3.3 V
	Prúd	6 A
	Rozsah prúdu	0 ~ 6 A
	Výkon	19.8 W
	Zvlnenie a šum	80 mVp-p
	Nastavenie napätia	2,85 ~ 3.6 V
Vstup	Rozsah napätia	88 ~ 264 VAC
	Rozsah frekvencie	47 ~ 63 Hz
	Efektívnosť	73,5 %
	Striedavý prúd	0,4 A / 230 VAC

Tab. 4 Základné vlastnosti spínaného zdroja MeanWell RS–25–3.3

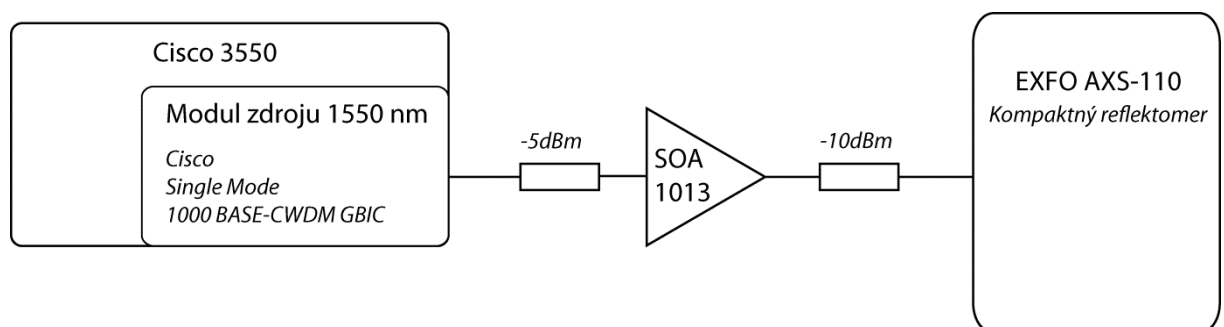
6 MERANIE A VÝSLEDKY

Meranie prebiehalo v štandardných podmienkach v počítačovom sále so stálou teplotou. V priebehu merania sa prejavili fyzikálne vlastnosti optického zosilňovača ktoré sú následne popísané, rovnako ako ich dôsledky vzťahujúce sa k zadaniu diplomovej práce.

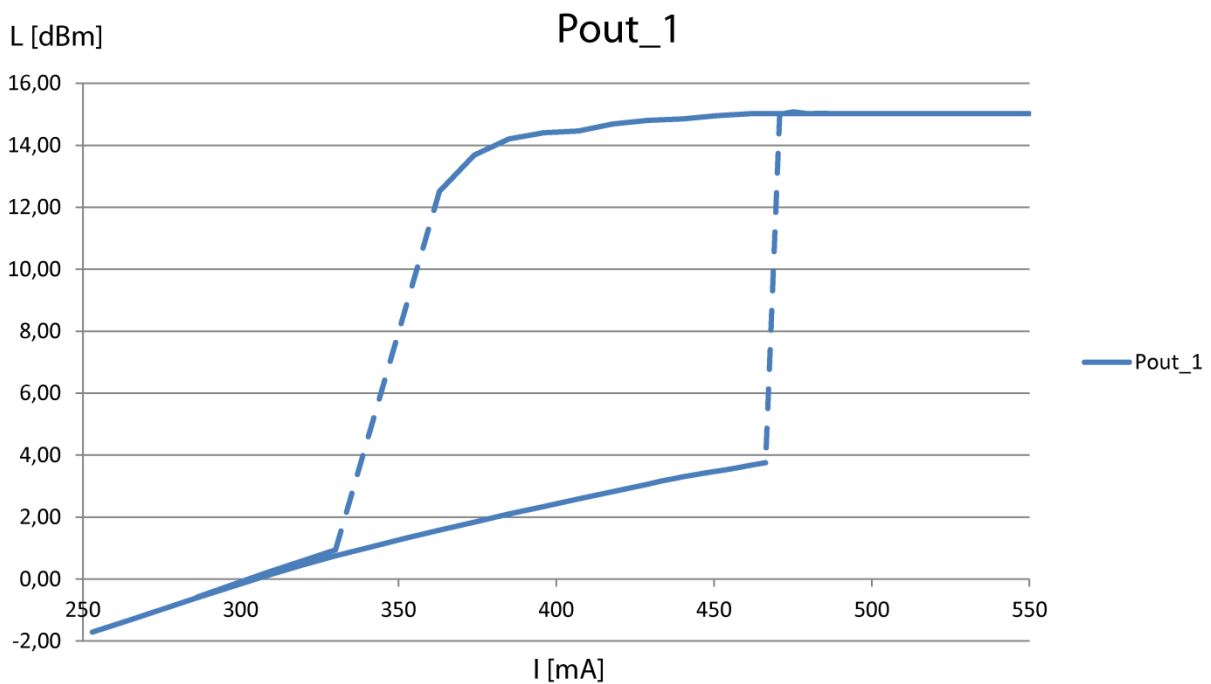
V prvej sade meraní bol použitý čistý 1550 nm signál z modulu CISCO 1000BASE-CWDM GBIC umiestnenom v prepínači CISCO 3550.

6.1 MERANIE KOMPAKTNÝM REFLEKTOMEROM

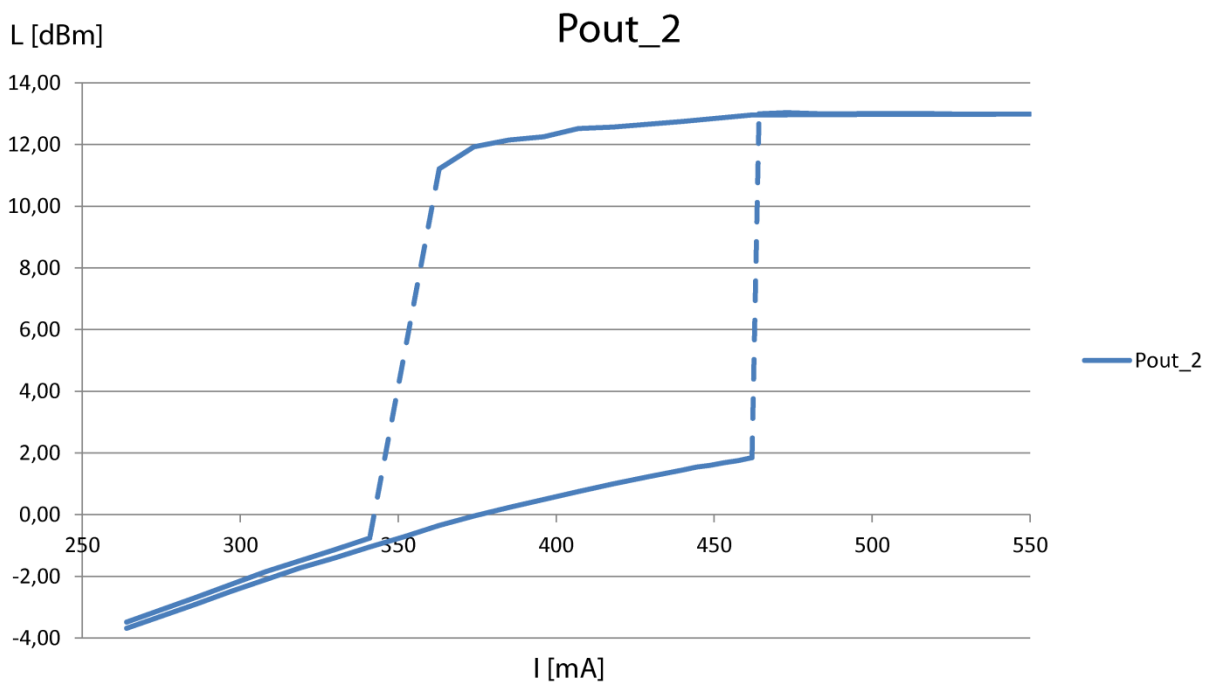
Ako prvé uvádzam meranie kompaktným reflektomerom EXFO AXS-110. Jedná sa o štandardné zariadenie určené k meraniu výkonu na optických vláknach. Nasledujúce grafy zobrazujú závislosť prúdu pretekajúceho cez polovodičovú štruktúru SOA na výstupnom výkone a priebeh hysteréznej krivky zosilňovača s obvodom SOA 1013.



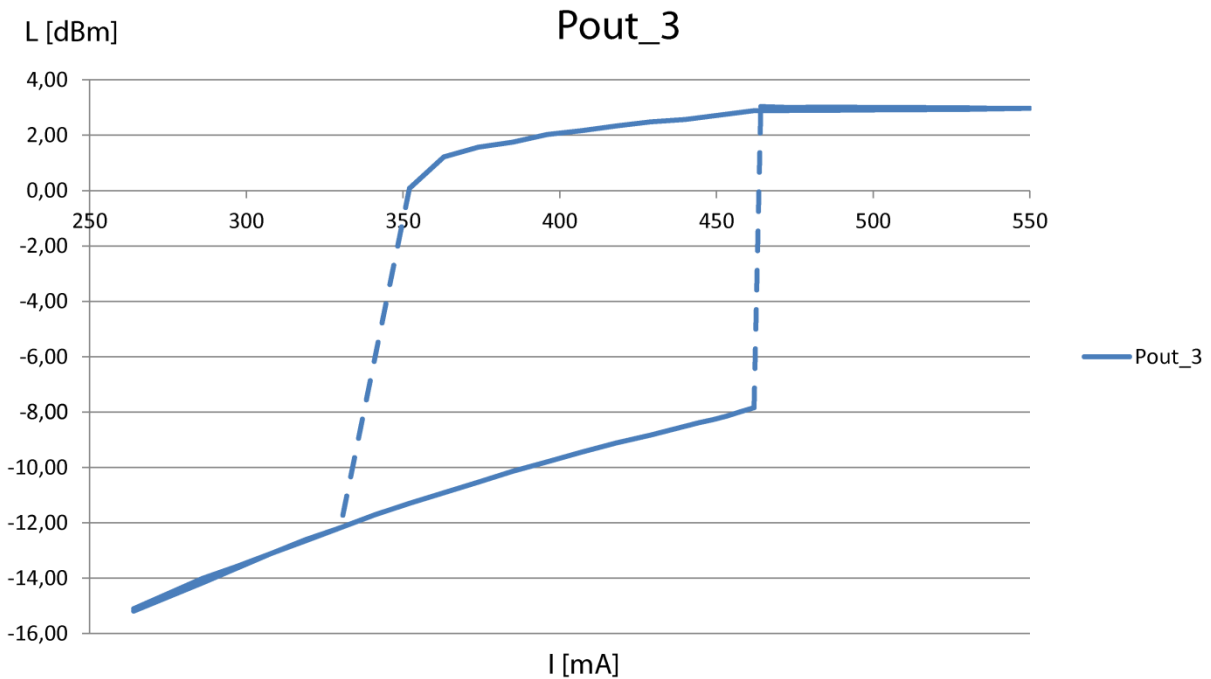
Obr. 16 Ukážka zapojenia merania pomocou kompaktného reflektomeru EXFOAXS-110 použitého pri meraní hysteréznej slučky SOA.



Obr. 17 Výkonová hysterézná krivka SOA zosilňovača. Meranie z výstupu generátoru bez útlmového článku, vstupný výkon= 2,24 dBm. Smernica nábežnej časti krivky: 0,0248.



Obr. 18 Výkonová hysterézná krivka SOA zosilňovača. Meranie z výstupu generátoru s kalibrovaným útlmovým článkom 5 dBm, vstupný výkon= -2,35 dBm. Smernica nábežnej časti krivky: 0,0271.



Obr. 19 Výkonová hysterézná krivka SOA zosilňovača. Meranie z výstupu generátoru s kalibrovaným útlmovým článkom 20 dBm, vstupný výkon= -18,57 dBm. Smernica nábežnej časti krivky: 0,0352.

Merania ukázali že zosilňovač s obvodom SOA1013 má priebeh výkonovej charakteristiky veľmi odlišný, napríklad od laserovej diódy. Charakteristika má tvar hysteréznej slučky. Z meraní je zrejme že smernica nábežnej časti krivky je strmšia s klesajúcim vstupným výkonom. Toto má spojitosť so závislosťou optického zosilňovača na vstupnom výkone a prúdom ktorý prechádza štruktúrou SOA ako je vidno na obr. 8.

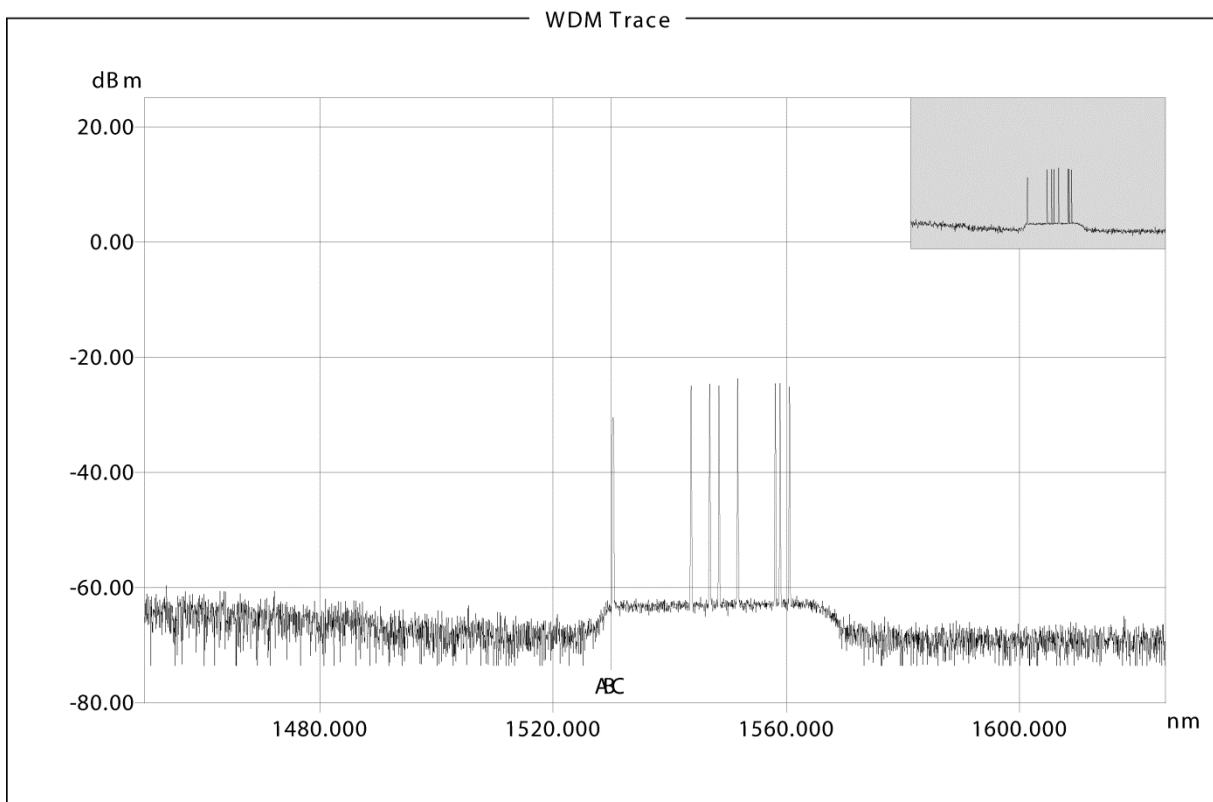
6.2 MERANIE SPEKTRÁLNYM ANALYZÁTOROM

Ako druhé uvádzam meranie spektrálnym analyzátorom EXFO FTB400 s optickým modulom FTB5240B. Optický modul má vysoký pomer optického potlačenia ORR (Optical Rejection Ratio) a veľkú šírku pásma s vysokým rozlíšením.

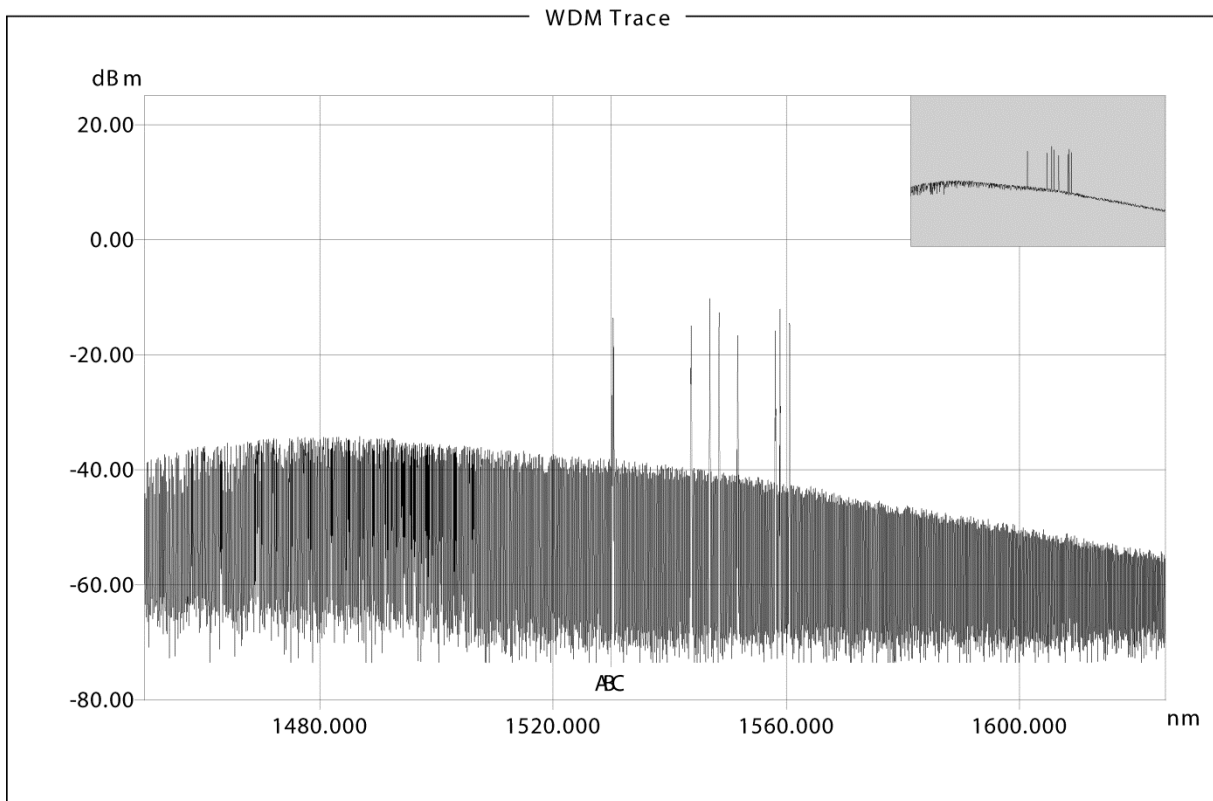
Pri meraní sme ako zdroj signálu sme použili monitorovací výstup DWDM systému siete CESNET.

Na nasledujúcich grafoch zobrazujúcich plochosť zosilnenia SOA zosilňovača je jasne vidieť nežiaduci šum pri nízkych hodnotách zosilnenia. So vstupným výkonom sa zväčšuje pomer medzi vynútenými (koherentnými) a náhodnými rekombináciami. Znižuje sa šum a rapídne narastá zosilnenie. Zisk odpovedá energetickému rozloženiu nábojov v rekombinačnej vrstve SOA. Zosilnenie samotného SOA závisí na populácii nosičov vo vodivom páse, tá musí prekročiť tú vo valenčnom páse. V tomto prípade je pravdepodobnosť stimulovanej emisie vyššia ako stimulovanej absorpcie, zosilňovač SOA zosilňuje obr.22.

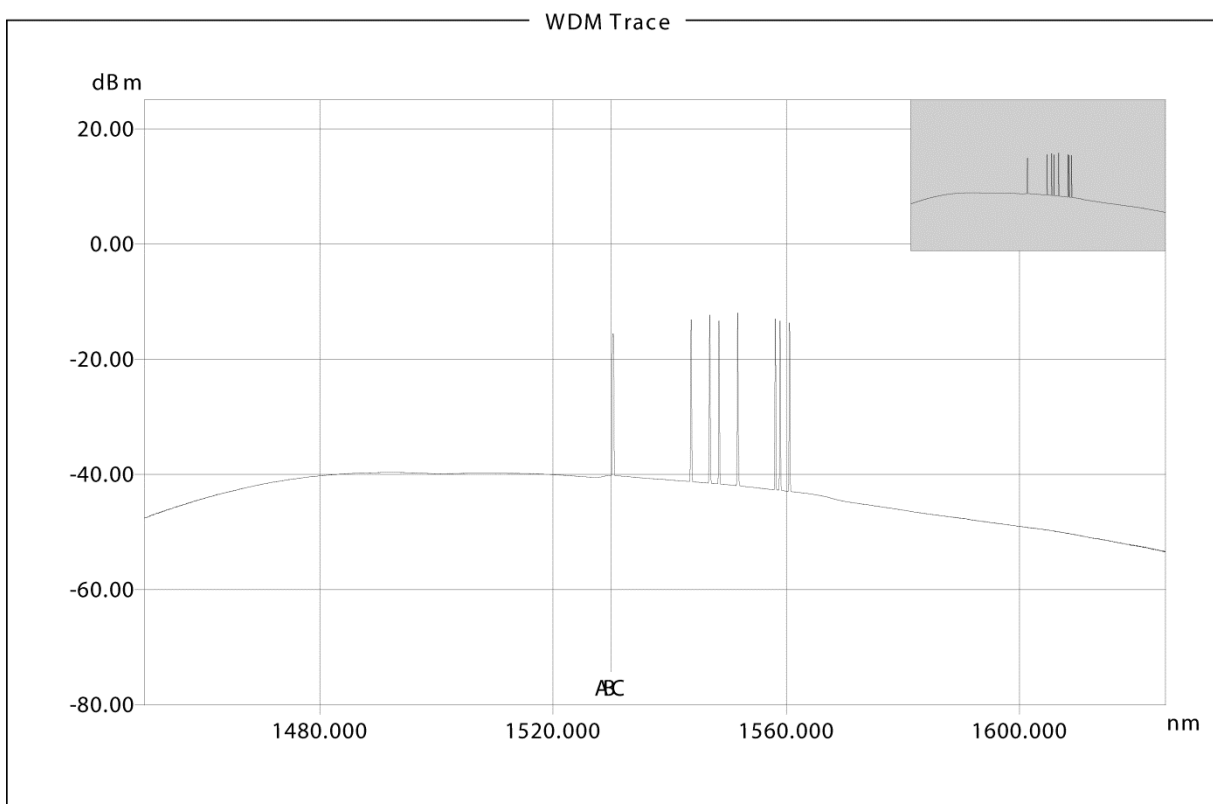
Náhodné rekombinácie, ktoré vznikajú pri nízkom prúde cez štruktúru SOA, spôsobujú šum, ktorý je v našej aplikácii nežiaduci. Dôsledky sú zreteľné na obr. 21. Požadované vlastnosti a vysoké zosilnenie až 15 dBm v C pásme (1530–1565 nm) je vidno na obr. 22.



Obr. 20 Referenčné spektrum vstupného WDM signálu.



Obr. 21 Signál WDM po prechode SOA zosilňovačom na nízkej hladine zosilnenia, tu pôsobí stále spontánna emisia, ktorá spôsobuje vysokú hladinu šumu. Odpovedá nábežnej časti krivky hysteréznej slučky.



Obr. 22 Signál WDM po prechode SOA zosilňovačom, plné zosilnenie.

ZÁVER

Optický zosilňovač realizujú rôzni výrobcovia rôznymi spôsobmi. Perspektíva SOA sa ukazuje až v posledných rokoch, nakoľko dopyt po lacnejších a výkonnejších zariadeniach je obrazom našej doby. V priebehu diplomovej práce som sa zoznámil s problematikou a konštrukciou optického zosilňovača, využívajúceho dostupné prvky pre malovýrobu. Teoretický základ a samotný návrh a konštrukcia sú úzko späté a nemožno realizovať jedno bez druhého. Znalosť skutočných súčiastok a teórie popisujúcej ich funkciu mi pomohla skonštruovať prototyp optického zosilňovača na ktorého základe bude možno ďalej budovať a vylepšovať vlastnosti, aj vďaka otvorenosti a prehľadnosti návrhu tak ako aj robustnej konštrukcii.

Zariadenie som rozdelil na dva oddelené moduly, modul SOA s konektormi a modul riadiacej jednotky s konektormi a podpornými obvodmi. Jedná sa o osvedčené riešenie, ktoré sa vyskytuje u mnohých renomovaných výrobcov.

Po zvážení bol použitý spínaný zdroj vysokej akosti, ktorý zaručuje bezproblémový chod zosilňovača a nízke rušenie zo zdrojovej časti, čo je v mojej aplikácii dôležité.

Mechanická konštrukcia zaručuje bezchybný kontakt SOA s chladičom, čo bolo potrebné riešiť prakticky, nakoľko päťica pre obvod je netradičná a dokumentácie jednotlivých výrobcov nekorešponovali. Diplomová práca mi aj týmto dala náhľad na rôzne netradičné konštrukčné riešenia a o prenesení návrhu do skutočnosti, čo nie je vždy samozrejmosť.

V ďalšej časti práce, avšak nepoužitej, v konečnom riešení, som navrhol dosku digitálneho riadenia a odčítania hodnôt pre SOA zosilňovač a jeho pomocné obvody. Navrhol som aj dosku pre požadovanú PIN diódu zamýšľanú na použitie v obvode ako optickú spätnú väzbu pre režim konštantného výkonu.

Meraním a hlbším preskúmaním parametrov a fyzikálnych vlastností SOA1013 som dospel k záveru že spätnú väzbu nemožno použiť tak ako napríklad u laserovej diódy. Šum v nízkych úrovniach zosilnenia a hysterézná charakteristika so zanedbateľnou strmou vo vysokých úrovniach zosilnenia mi bránili riešenie spätnej väzby použiť. Celé zariadenie sa správalo najlepšie pri typických katalógových hodnotách, kedy dosahovalo maximum zosilnenia.

Riešením by bolo použitie variabilného útlmového článku, to by však celé zariadenie predražilo. Celé zariadenie je uložené v štandardizovanej skrini „Rack“ 2U a je pripravené na používanie.

POUŽITÁ LITERATÚRA

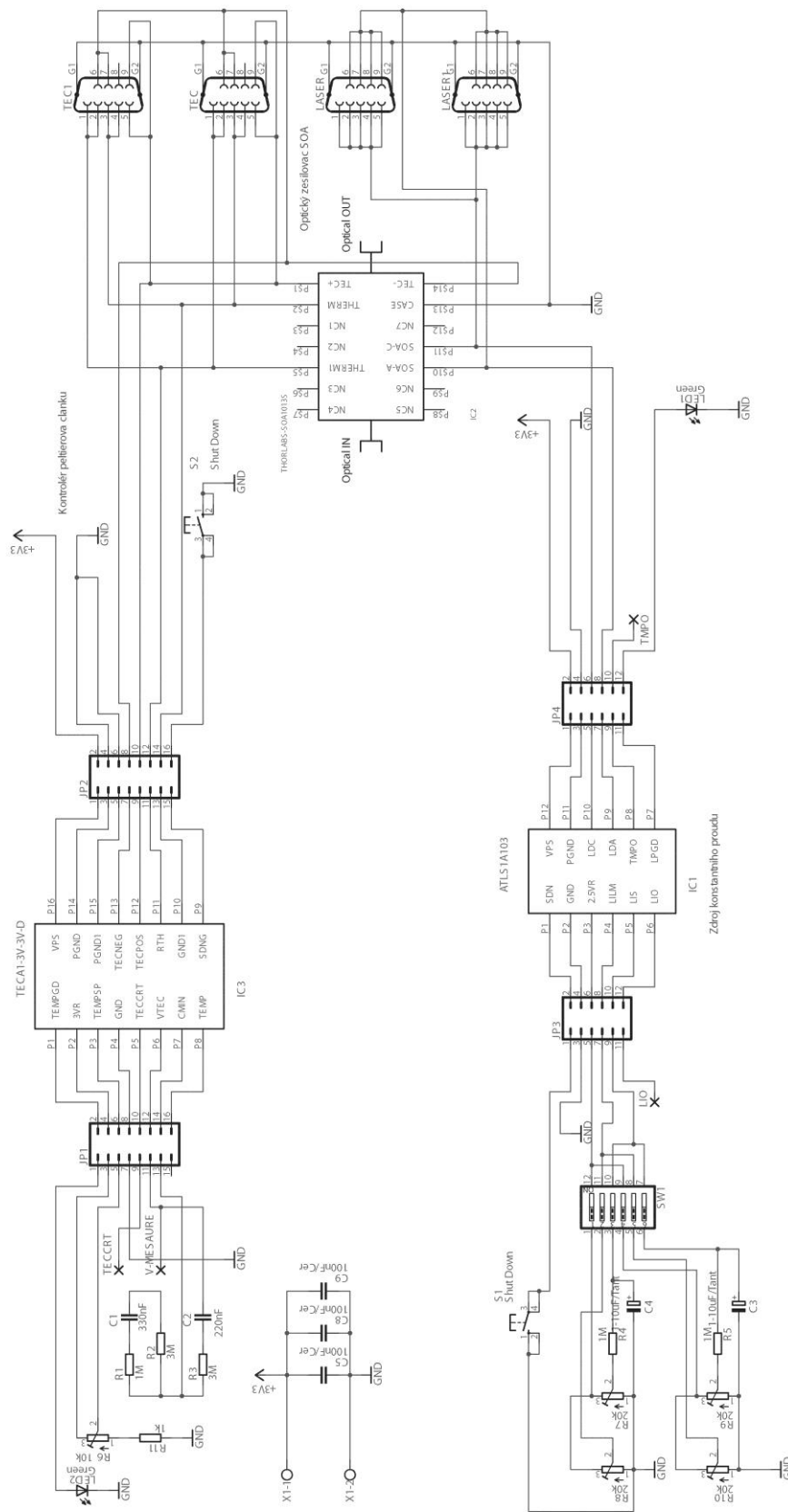
- [1] J. CONNELLY, Michael. *Semiconductor Optical Amplifiers*. New York: Kluwer Academic Publishers, 2002. ISBN 0-7923-7657-9.
- [2] AGRAWAL, Govind. *Fiber-Optic Communication Systems*. 4. dopl. vyd. New York: WILEY, 2010. ISBN 9780470505113.
- [3] HECHT, Jeff. *Understanding fiber optics*. 4. dopl. vyd. New Jersey: Prentice Hall, 2002. ISBN ISBN 0-13-027828-9.
- [4] FILKA, Miloslav. *Optoelektronika pro telekomunikace a infomatiku*. Brno : Doc. Ing. Miloslav Filka, 2009. 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1
- [5] Telekomunikácie. ZSPŠ [online]. [cit. 2012-12-12]. Dostupné z: <http://www.spsnmnv.sk/prace/janis/stranka3.html>.
- [6] MLEJNEK, Zbyněk. *Optické Zesilovače*. Brno, 2008. Bakalářská práce. VUT, Fakulta Elektrotechniky a Komunikačných Technologíí.
- [7] RAMASWAMI, Rajiv, Kumar SIVARAJAN a Galen SASAKI. Burlington: Morgan Kaufmann, 2002. ISBN 0123740924.
- [8] ZAPPA, Franco, Alberto TOSI a Alberto DALLA MORA. InGaAs SPAD. [online]. [cit. 2012-12-07]. Dostupné z: <http://www.everyphotoncounts.com/device-ingaas.php>
- [9] *Analogtechnologies.com* [online]. 2011-22-3 [cit. 2011-05-29]. ATLS1A103. Dostupné z WWW: <<http://www.analogtechnologies.com/document/ATLS1A103.pdf>>.
- [10] *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>>.
- [11] *Thorlabs.de* [online]. 2010 [cit. 2010-12-14]. SOA1013S. Dostupné z WWW: <<http://www.thorlabs.de/catalogpages/v20/1153.pdf>>.
- [12] KYOSEMI. *KPDE086S* [online]. 2012 [cit. 2012-12-08]. Dostupné z: http://www.kyosemi.co.jp/en/sensor/nir_photodiode/kpde086s
- [13] MEAN WELL RS-25 series. [online]. 2011, 2011-08-19 [cit. 2012-12-08]. Dostupné z: www.meanwell.com/search/RS-25/RS-25-spec.pdf
- [14] DUPORT, François, Bendix SCHNEIDER, Anteo SMERIERI, Marc HAELTERMAN a Serge MASSAR. All-optical reservoir computing. In: *OpticsInfoBase* [online]. 2012 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.opticsinfobase.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-20-20-22783>

- [15] ŠIFTA, R. DWDM v přístupových sítích. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 99 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

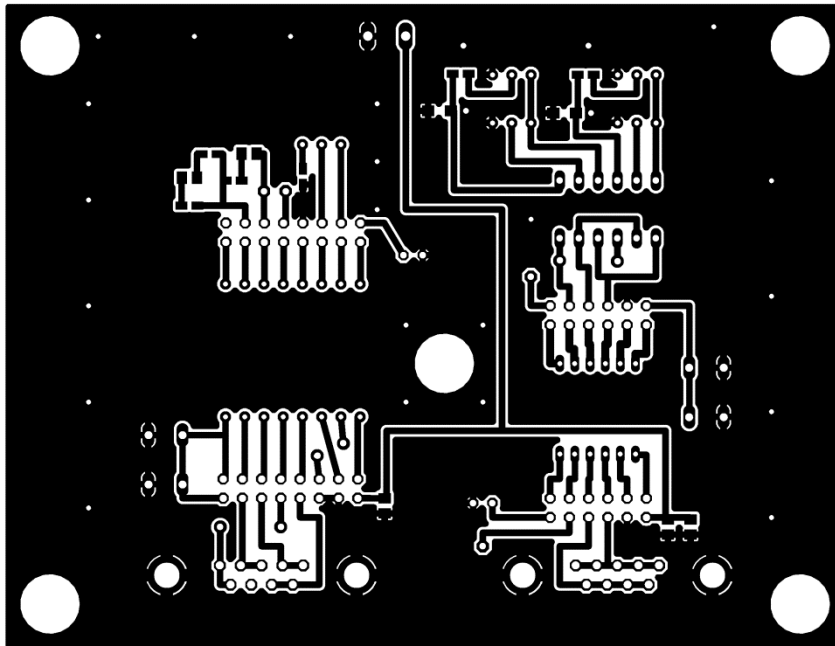
ZOZNAM PRÍLOH

A	Schéma optického zosilňovača – doska analógového riadenia a modul SOA.....	45
B	Schéma optického zosilňovača – doska digitálneho riadenia a modul pre PIN diódu.....	46
C	Predloha plošného spoja č.1 spodná strana	47
D	Predloha plošného spoja č.1 vrchná strana.....	48
E	Osadenie plošného spoja č.1 spodná strana	49
F	Osadenie plošného spoja č.1 vrchná strana	50
G	Predloha plošného spoja č.2 spodná strana	51
H	Osadenie plošného spoja č.2 vrchná strana	52
I	Predloha plošného spoja č.3 spodná strana	53
J	Predloha plošného spoja č.3 vrchná strana.....	54
K	Osadenie plošného spoja č.3 spodná strana	55
L	Osadenie plošného spoja č.3 vrchná strana	56
M	Predloha plošného spoja č.4 vrchná strana.....	57
N	Osadenie plošného spoja č.4 vrchná strana	57
O	Fotografia hotového produktu	57
P	Zoznam súčiastok pre dosku analógového riadenia a modul s SOA	58
Q	Zoznam súčiastok digitálnej dosky riadenia a modul s PIN diódou	59

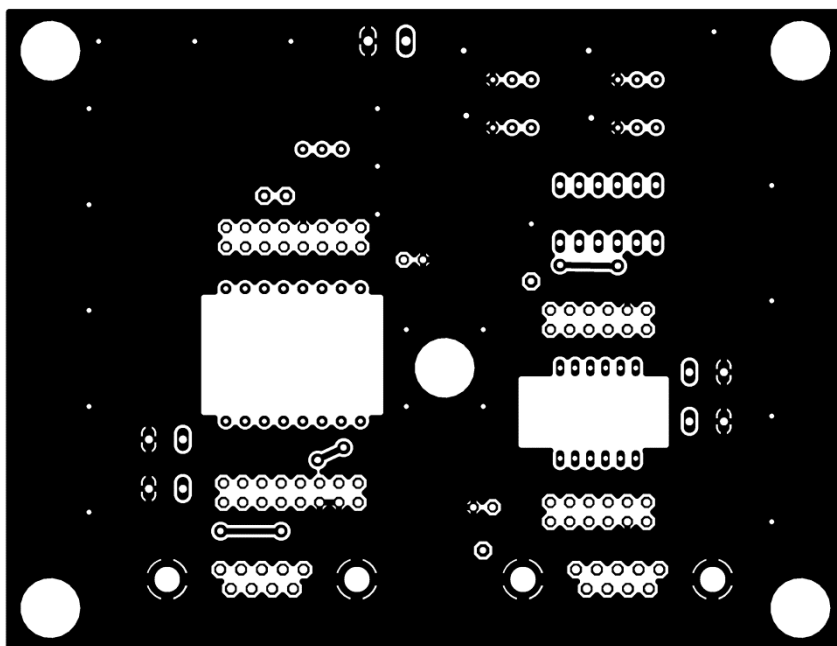
A Schéma optického zosilňovača – doska analógového riadenia a modul SOA



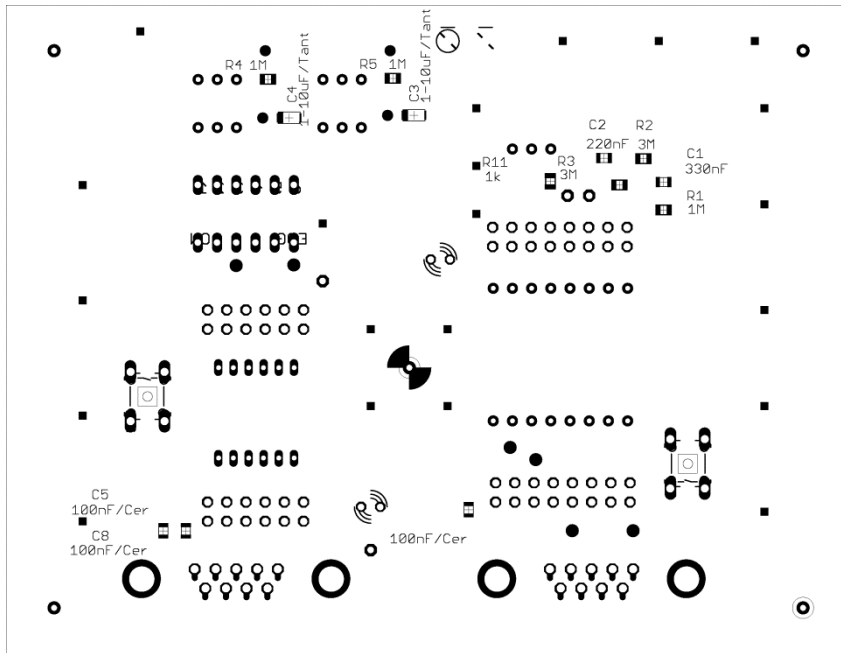
C Predloha plošného spoja č.1 spodná strana



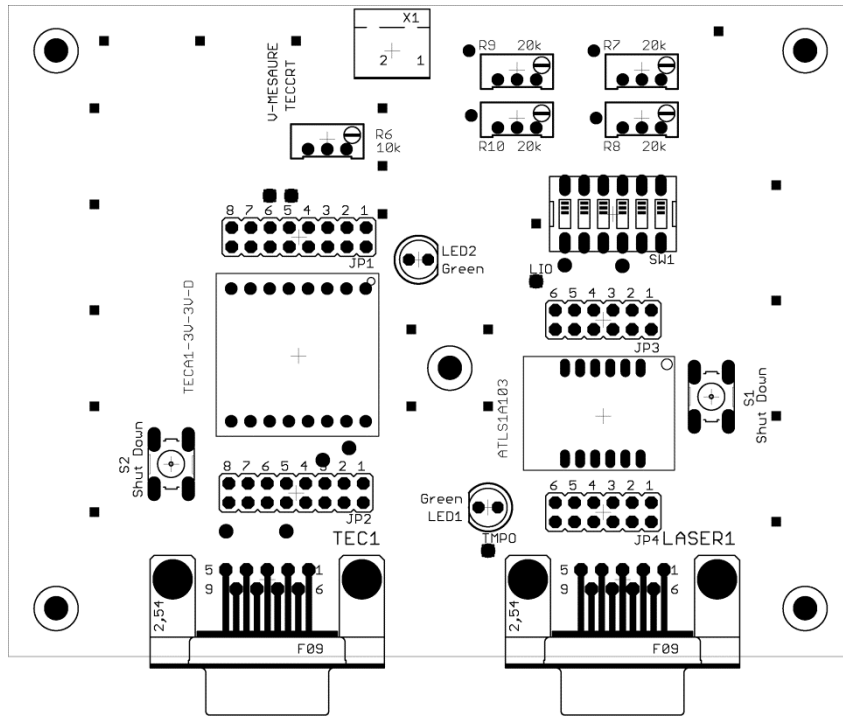
D Predloha plošného spoja č.1 vrchná strana



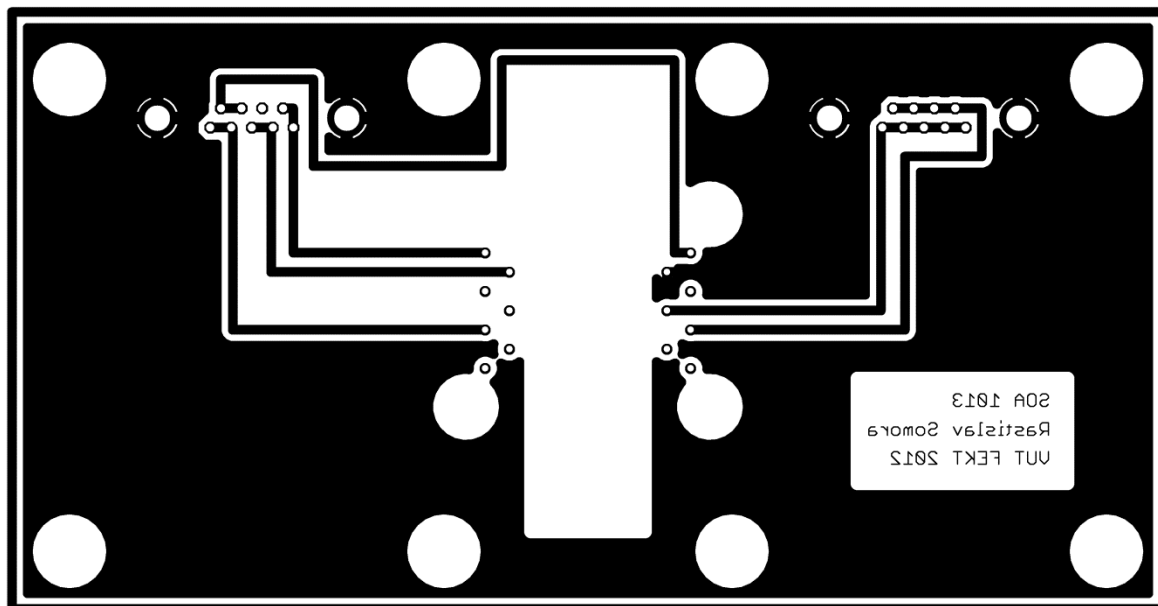
E Osadenie plošného spoja č.1 spodná strana



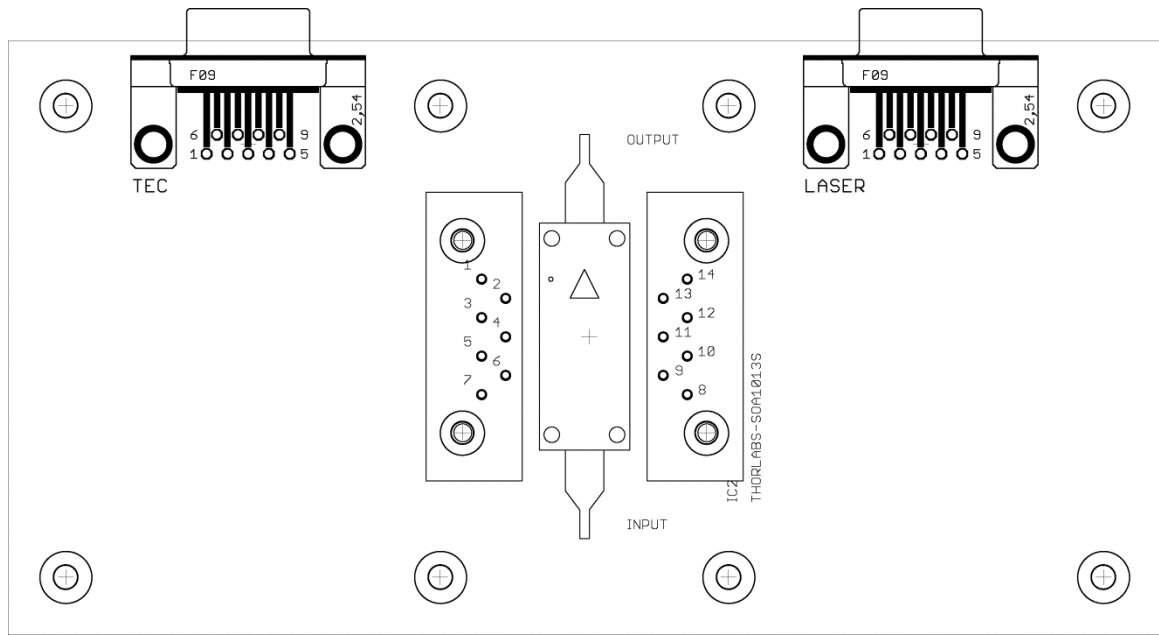
F Osadenie plošného spoja č.1 vrchná strana



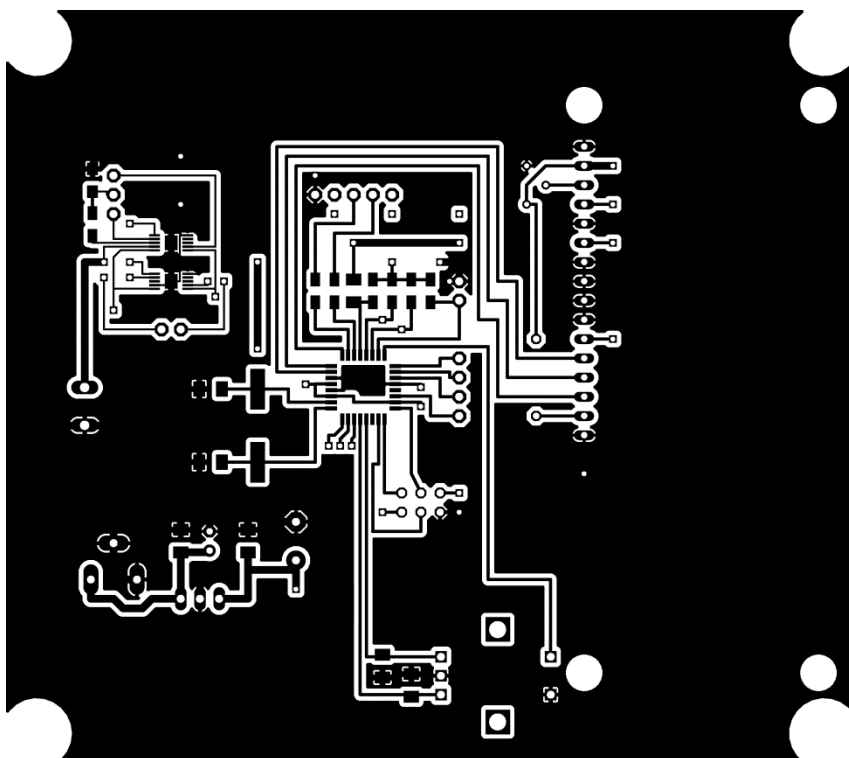
G Predloha plošného spoja č.2 spodná strana



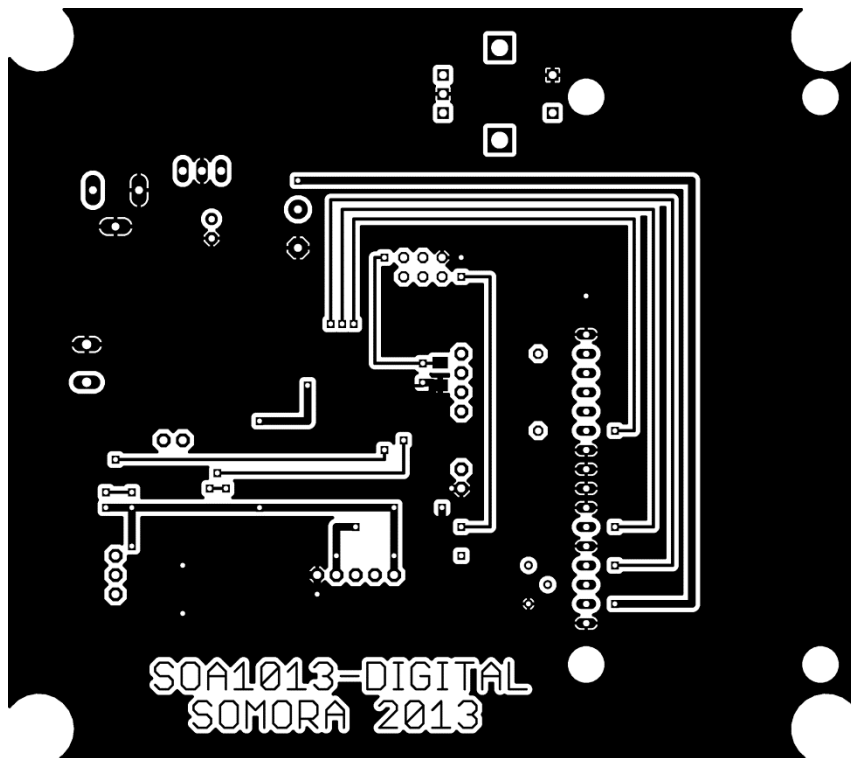
H Osadenie plošného spoja č.2 vrchná strana



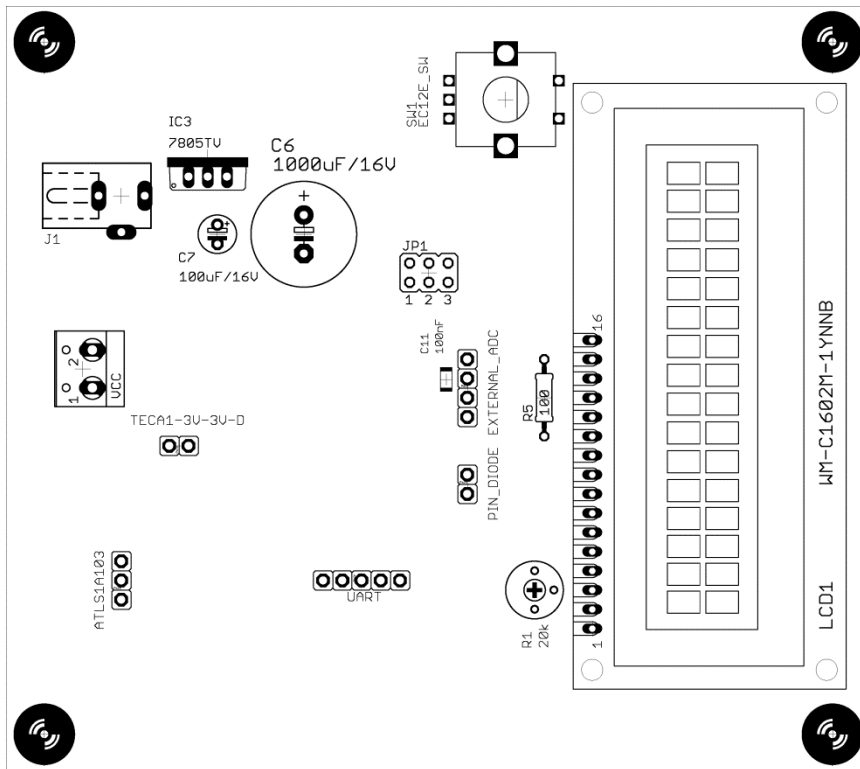
I Predloha plošného spoja č.3 spodná strana



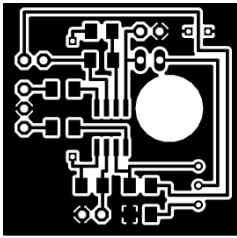
J Predloha plošného spoja č.3 vrchná strana



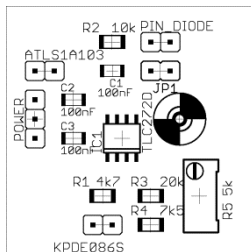
L Osadenie plošného spoja č.3 vrchná strana



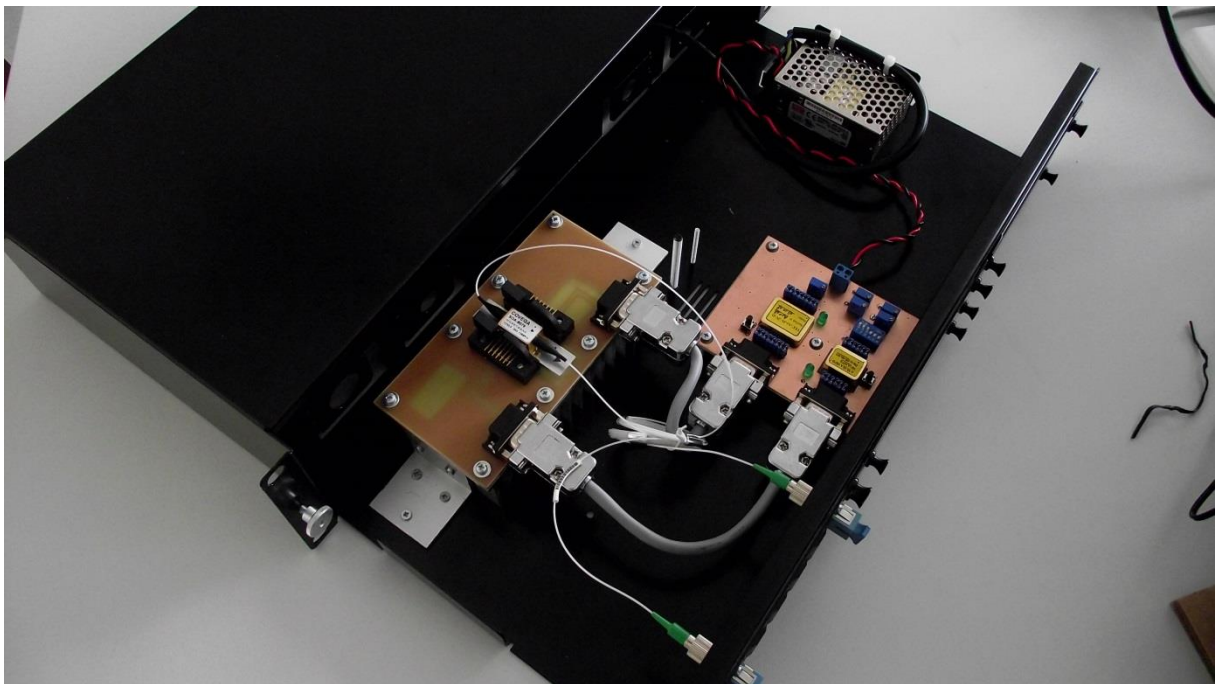
M Predloha plošného spoja č.4 vrchná strana



N Osadenie plošného spoja č.4 vrchná strana



O Fotografia hotového produktu



P Zoznam súčiastok pre dosku analógového riadenia a modul s SOA

Súčiastka	Hodnota	Označenie	Puzdro
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
C1	330nF		C0805
C2	220nF		C0805
C3	1-10uF/Tant		C0805
C4	1-10uF/Tant		C0805
C5	100nF/Cer		C0805
C7	100nF/Cer		C0805
C8	100nF/Cer		C0805
LED1	Zelená	LED5MM	LED5MM
LED2	Zelená	LED5MM	LED5MM
S1	Shut Down		B3F-10XX
S2	Shut Down		B3F-10XX
SW1			EDG-06
X1		W237-102	W237-102
LASER		CANON 9 V 90	
LASER1		CANON 9 V 90	
TEC		CANON 9 V 90	
TEC1		CANON 9 V 90	
JP1,2,3,4		S2G72	Obojstranný kolík

Q Zoznam súčiastok digitálnej dosky riadenia a modul s PIN diódou

Súčiastka	Hodnota	Označenie	Puzdro
U1	ATMEGA328P-AU		32 TQFP
U2	LTC2635HMSE	LTC2635HMSE	10 MSOP
U3	LTC2635HMSE	LTC2635HMSE	10 MSOP
IC3	7805		TO220
R1	20k		R1206W
R2	1K		R1206W
R3	1k		R1206W
R4	10k		R1206W
R5	100		0207/10
R6	1k5		R1206W
R7	1k5		R1206W
R8	1M		R1206W
R9	33		R1206W
C1	22pF		C1206K
C2	22pF		C1206K
C3	100nF		C1206K
C4	100nF/Cer		C1206K
C5	100nF/Cer		C1206K
C6	1000uF/16V		E5-13
C7	100uF/16V		E2,5-5
C8	1/10uF Tantal		SMC_A
C9	10nF		C1206K
C10	10nF		C1206K
C11	100nF		C1206K
LCD		WM-C1602M	
Q1	16MHz		HC49UP
SW1	EC12E_SW		ALPS_EC12E_SW
Jumpers		S2G72	Obojstranný kolík
PIN dióda			
IC1	TLC272D		SOIC 8
IC2	KPDE086S		
R1	4k7		M1206
R2	10k		M1206
R3	20k		M1206
R4	7k5		M1206
R5	5k		RTRIM64W
C1	100nF		C1206K
C2	100nF		C1206K
C3	100nF		C1206K
Jumpers		S2G72	Obojstranný kolík

