

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

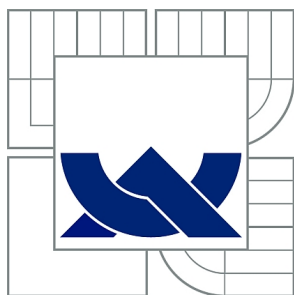
MĚŘICÍ PRACOVISTĚ PRO ANALÝZU VLASTNOSTÍ VLÁKNOVÝCH
MŘÍŽEK

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

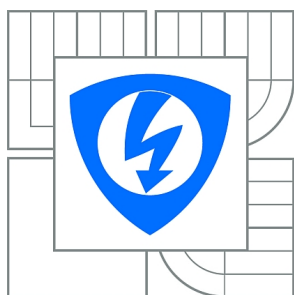
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

FRANTIŠEK URBAN

BRNO 2012



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

MĚŘICÍ PRACOVISTĚ PRO ANALÝZU VLASTNOSTÍ VLÁKNOVÝCH MŘÍŽEK

MEASURING UNIT FOR ANALYSIS OF FIBRE GRID PROPERTIES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

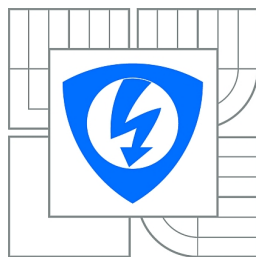
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

FRANTIŠEK URBAN

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. MILOSLAV FILKA, CSc.

BRNO 2012



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav telekomunikací

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Teleinformatika

Student: František Urban

ID: 125680

Ročník: 3

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Měřicí pracoviště pro analýzu vlastností vláknových mřížek

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principy funkce a aplikacemi optovláknových Braggových mřížek. Navrhněte měřicí pracoviště pro analýzu spektrálních vlastností optických vláknových mřížek s užitím tepelného ladění úzkopásmového polovodičového laseru. K návrhu využijte komerční řízený teplotní kontrolér. Sestavte funkční vzorek řídicího bloku s modulem teplotního a proudového řízení laserové diody a fotodetektoru. Realizujte vláknovou měřicí sestavu s Braggovou mřížkou a ověřte princip měření.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] FILKA, M. Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku. CENTA, Brno 2009.
- [2] Othonos, A., Kalli, K. Fiber Bragg Gratings, Fundamentals and applications. Artech House, Notwood, 1999. ISBN 0-89006-344-3.
- [3] HELÁN, R. Modelování a optimalizace komplexních vláknových difrakčních struktur. VUT FEKT, Brno 2009.

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 31.5.2012

Vedoucí práce: prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

Konzultanti bakalářské práce:

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.

ABSTRAKT

Práce se zabývá měřením vlastností optických Braggových mřížek pomocí skenování spektra tepelně přeladovanou laserovou diodou. V práci je navržena optická sestava pro měření mřížky a je navržen elektronický řídicí modul pro řízení laserové diody a snímání odezvy Braggovy mřížky.

KLÍČOVÁ SLOVA

Braggova mřížka, fotodioda, fotocitlivý, laser, optické vlákno, spektrum

ABSTRACT

Thesis focuses on measurement of the properties of the Bragg fiber gratings. The method of measurement is based on the spectral scanning by use of the thermal tuning of the laser diode. The optical fiber set for evaluation of the Bragg grating spectrum is designed. The thesis contains the design of the electronic control board for laser diodes and photodetectors.

KEYWORDS

Bragg grating, photodiode, photosensitive, laser, optical fiber, spectrum

URBAN, František *Měřící pracoviště pro analýzu vlastností vláknových mřížek*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2012. 54 s. Vedoucí práce byl prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Měřicí pracoviště pro analýzu vlastností vláknových mřížek“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu prof. Ing. Miloslavu Filkovi, CSc. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Milanu Holíkovi za odbornou pomoc při sestavení mechanické části bakalářské práce. Na závěr bych rád také poděkoval mé rodině, která mě podporovala v průběhu studia.

Brno

.....

(podpis autora)

OBSAH

Úvod	11
1 Úvod do problematiky	12
2 Braggovy mřížky	14
2.1 Technika Braggových mřížek	14
2.2 Výroba Braggovy mřížky	16
2.2.1 Výroba mřížky pomocí interferometrické metody	17
2.2.2 Bod po bodu	17
2.2.3 Metoda fázové masky	17
2.3 Jaké jsou typy Braggových mřížek a čím se vyznačují	18
3 Měření spektrálních vlastností	
Braggových mřížek	19
3.1 Vlastnosti měřených mřížek	19
3.2 Měření optického spektra rozkladem světla	20
3.3 Měření optického spektra skenováním	21
4 Měřicí pracoviště a konstrukce	
měřicího modulu	24
4.1 Popis měřicího pracoviště a konstrukce	
optického a elektronického měřicího modulu	24
5 Schéma a deska plošného spoje měřicího přípravku	30
5.1 Výroba desky plošného spoje	
měřicího přípravku	32
5.2 Rozpiska použitých součástek.	35
6 Ovládání elektronického měřicího modulu	37
6.1 Software pro mikrokontroler	37
6.2 Ovládání elektronického měřicího modulu pomocí počítače	38
7 Experiment	42
7.1 Měření mřížky	44
8 Závěr	48
Literatura	50

Seznam symbolů, veličin a zkratk	52
9 Přílohy	54
9.1 Obsah příloh vložených na CD	54

SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1	Znázornění Braggovy mřížky	15
2.2	Odraz Braggovy mřížky	15
2.3	Jednotlivé typy vláknových mřížek	18
3.1	Spektrum dlouhé a krátké mřížky	19
3.2	a) Laserová dioda C-1550A-DFB2.5-PD-SFCMI/APC-K	22
3.3	a) Blokové schéma zařízení pro odražený směr	23
3.4	b) Blokové schéma zařízení pro prostupný směr	23
4.1	Uložení vláken do kazety cirkulátoru	24
4.2	Měřicí pracoviště pro analýzu vlastností vláknových mřížek	25
4.3	Svářečka optických vláken Fujikura FSM – 100P	26
4.4	Optická soustava tvořená cirkulátorem a Braggovými mřížkami	27
4.5	Optický konektor FC/APC	27
5.1	a) Deska plošného spoje pohled Top	32
5.2	b) Deska plošného spoje pohled Bottom	32
5.3	b) Osazovací výkres pohled Top	33
5.4	b) Osazovací výkres pohled Bottom	33
5.5	b) DPS ze strany osazovacích součástek	34
5.6	b) DPS ze strany SMD součástek	34
6.1	Blokové schéma komunikace	37
6.2	Vývojový diagram komunikace	38
6.3	Dialogové okno pro ovládání laserové diody	39
7.1	Kalibrační křivka Watt – Amper	42
7.2	Kalibrační křivka výkonu laserové diody a proudu monitorující foto- diody	43
7.3	Kalibrační křivka výkonu na fotodiodě a proudu fotodiody	44
7.4	Spektrum Braggovy mřížky měřené napřímo	45
7.5	Spektrum Braggovy mřížky měřené s cirkulátorem	46
7.6	Teplotní přeladění laserové diody	46

SEZNAM TABULEK

5.1	Rozpiska použitých součástí hlavního schématu	35
-----	---	----

ÚVOD

V zadání mé bakalářské práce bylo požadováno seznámit se s principy funkce opto-vláknových Braggových mřížek. Dále jsem měl navrhnout a sestavit měřící pracoviště pro analýzu spektrálních vlastností optických vláknových mřížek s užitím tepelného ladění úzkopásmového polovodičového laseru.

Měřící pracoviště bylo sestaveno z modulu fotodetektoru a teplotního a proudového řízení laserové diody, které jsem v rámci mé bakalářské práce navrhl a sestavil. Elektronický modul je navržen pro spolupráci s komerčním teplotním kontrolérem pro nastavování teploty a ladění laserové diody, který je možno ovládat ručně i pomocí počítače.

V bakalářské práci jsem pracoval zejména s optickými vlákny, dále také s optickými vláknovými zdroji a detektory světla. V zadání je klíčovým prvkem optická vláknová Braggova mřížka. S jejími principy funkce, typy a vlastnostmi je nutné se seznámit.

Na základě znalostí fungování optických Braggových mřížek jsem navrhl optické-vláknové části měřícího systému. Zde je požadováno využití laserové diody a jejího tepelného přeladování. Na základě studia vlastností a chování laserových diod bylo třeba vybrat vhodné prvky pro návrh, navrhnout a zkonstruovat elektronický modul pro řízení vybraného optického zdroje z hlediska stability výkonu a přeladování vlnové délky. Modul také musel umět zpracovávat signály z detektorů snímajících odezvu Braggovy mřížky. Jednou z částí mé bakalářské práce bylo vytvoření řídicího programu pro mikroprocesor umístěný na elektronickém měřícím modulu, jehož činnost je ovládána počítačem.

Poslední část mé bakalářské práce byla realizace bloků a sestavení měřícího zařízení a změření spektra Braggovy mřížky, čímž se také ověřil princip měření.

1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY

Použití optických vláken znamenalo v minulosti převrat v telekomunikačních technologiích a později i v nových aplikacích v sensorice. V šedesátých letech minulého století byla poprvé vyvinuta optická vlákna, jejichž útlum se přiblížil vlastnostem tehdy široce používaných koaxiálních a párových kabelů pro telekomunikace. V průběhu dalších 20 let technického vývoje a zlepšování technologie výroby optických vláken se optická vlákna stala vážným konkurentem metalických kabelů.

Dnes jsou synonymem moderních telekomunikací i optické sensoriky. K rozvoji technologie optických vláken přispělo i jejich masové využití a klesající ceny optických vláken i vláknových prvků. Přenosy po optických vláknech nyní umožňují realizovat datové kanály s přenosovou rychlostí až 100 Gb/s a optovláknové přenosové systémy s vlnovým multiplexem dnes nezřídka přenáší simultánně až 80 nezávislých datových duplexních kanálů. Jak v telekomunikační, tak i v sensorové technice se za krátký čas od jejich zrodu začaly používat moderní a nové optické polovodičové zdroje. Původní luminiscenční diody byly nahrazovány polovodičovými injekčními lasery. Technologie polovodičových laserů se rychle rozvíjela a umožňovala tak využívat stále větší měrou vlastnosti optických vláken.

V dálkových telekomunikacích se začalo využívat výhradně jednovidové vlákno, které svým nízkým útlumem a nepřítomností vidové disperze mnohokrát výkonově překonalo možnosti vláken mnohovidových. Stálé zvyšování nároků na výkony telekomunikačních systémů však ukázalo, že i vlastnosti jednovidových vláken mohou omezovat přenosové možnosti. Tato omezení jsou v útlumu vláken, který lze kompenzovat optickými zesilovači, a pak v chromatické a polarizační vidové disperzi, které způsobují degradaci přenášeného signálu. Cestou k potlačení vlivu chromatické disperze na přenos byl vývoj a použití koherentních optických zdrojů, laserových diod s úzkou šířkou spektrální čáry. I zde jsou však technické i teoretické limity a vývoj ukázal, že chromatickou disperzi ve vláknech lze kompenzovat vřazením disperzně kompenzačních členů.

Jednou z možností jak konstruovat disperzní kompenzátory je využití Braggových mřížek ve vláknech. Také v technice snímání elektrických i neelektických veličin přinesla optická vlákna revoluční možnosti. Jsou zde využívána jak mnohovidová, tak jednovidová vlákna. Velmi vysoké citlivosti na mechanické a tepelné působení na vlákna dosahujeme využitím vysoce koherentních zdrojů světla s dobře definovanou polarizací. Pro zachování koherenčních i polarizačních vlastností světla ve vlák-

nových snímačích se opět používá nejčastěji jednovidové vlákno. V řadě případů se senzory konstruují s využitím prvků, které upravují spektrum světla podle působení měřené/snímané veličiny. K úpravám optického spektra a k jeho vyhodnocování se většinou používají frekvenčně závislé optické vláknové prvky jako jsou již zmiňované – vláknové Braggovy mřížky. Technika Braggových mřížek je tedy velmi významná pro konstrukce telekomunikačních i snímacích vláknových systémů.

Měřicí pracoviště, které má tento projekt pomoci vybudovat, je zaměřeno na jednoduché zjišťování frekvenčních či spektrálních vlastností optických Braggových mřížek. Má sloužit jako zařízení v laboratoři optoelektroniky v Ústavu mikroelektroniky pro výukové účely, kdy je cílem měření spektra mřížek ověřit, jak různé konstrukce mřížek mohou vykazovat specifické vlastnosti, např. z hlediska šířky pásma odrazu nebo potlačení postranních kmitočtů při odrazu. Dalším předpokládaným využitím přípravku je měření chování optických senzorů založených na fyzikálním působení na vláknovou mřížku. Toto použití přípravku určuje i nároky na přesnost a případnou opakovatelnost měření. Vysoce přesné spektrální měření optického signálu by bylo možné provádět zařízením jako je optický spektrální analyzátor. Takové zařízení obvykle pracuje na principu vlnového rozkladu světla na difrakční mřížce. Zařízení tohoto typu jsou obvykle velice nákladná, nabízejí však vysoké rozlišení ve měřeném spektru až v řádu desetin pm. Pro požadovaný účel však taková přesnost není nezbytná a měřená spektra stačí vyhodnocovat s rozlišením až stonásobně horším – v desítkách pm. Stejně tak doba pro měření spektra není kritická, a je proto možné využít principu navrženého v zadání, tedy sekvenčního přeladování úzkospektrální laserové diody. Tímto způsobem tedy skenujeme spektrum měřeného signálu a v každém skenovacím cyklu zjistíme nezávislý průběh spektra optického výkonu. Lze předpokládat, že jeden cyklus skenování může v závislosti na počtu měřících kroků trvat řádově minuty až desítky minut, proto se použití navrhovaného přípravku bude hodit jen pro časově stálé signály. Princip snímání spektra bod po bodu ale umožňuje, aby byly výsledky měření pro jednotlivé po sobě jdoucí snímací cykly sčítány a průměrovány, což by mohlo pomoci ke zvýšení citlivosti takového měření a rozšířit jeho využití. Považuji za užitečné, aby vzniklý přípravek byl flexibilní pro měření na opticko-vláknových prvcích. Setkáváme se se situacemi, kdy principy opticko-vláknového snímání vyžadují použití dvou optických zdrojů, či dvou optických detektorů. Proto je dle mého názoru vhodné návrh přípravku přizpůsobit i těmto potenciálním požadavkům.

2 BRAGGOVY MŘÍŽKY

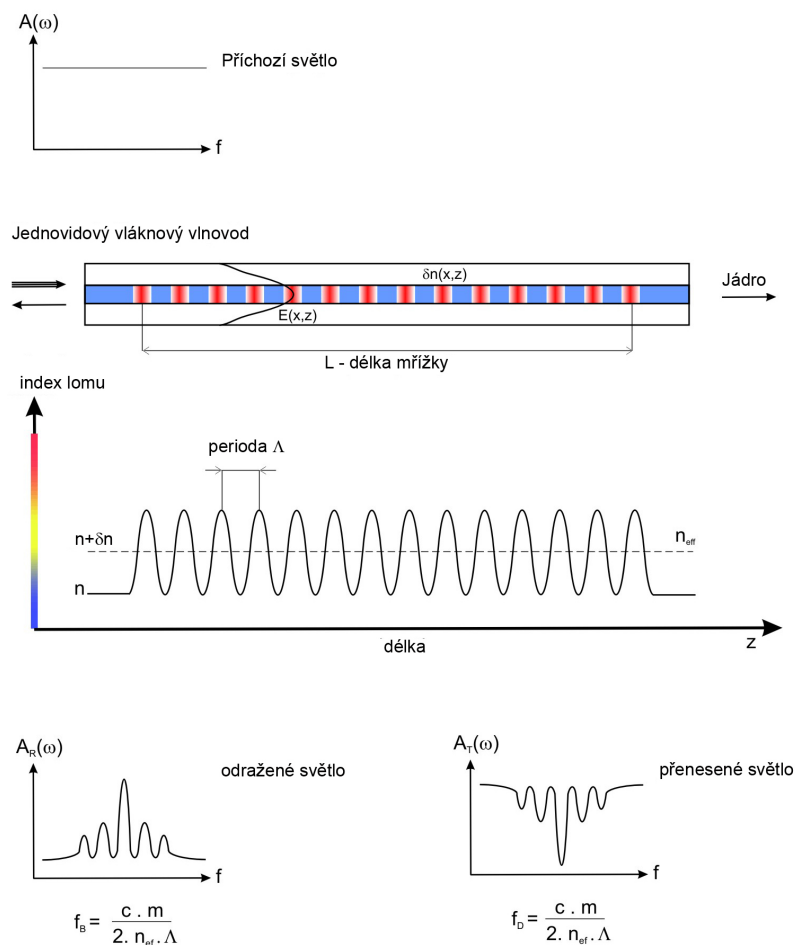
V této kapitole se budu věnovat Braggovým mřížkám. Jak jejich konstrukci, tak i jejich využití.

2.1 Technika Braggových mřížek

Při zpracování optických signálů či v senzorové technice je často zapotřebí provádět operace odrazů, difrakce, prostorové, frekvenční a polarizační filtrace atd. Tyto operace se prováděly pomocí prostorových optických prvků (Bulk optics). Bylo vždy potřeba vyvázat záření z optického vlákna a poté ho do optického vlákna znovu zavést. Takové způsoby zpracování signálů však byly náročné na prostor, mechanickou přesnost, stabilitu a vykazovaly citlivost na chvění a na teplotní změny. Vykazovaly také velký útlum v řádech jednotek až desítek decibelů. Náhrada prostorových optických prvků prvky vláknovými může velmi zvýšit stabilitu a odolnost optických systémů a tak zajistit přechod laboratorních aplikací do prostředí průmyslového využití. Takovým prvkem, který umožnil přechod některých prostorových způsobů zpracování optických signálů do vlákna, je i Braggova mřížka.

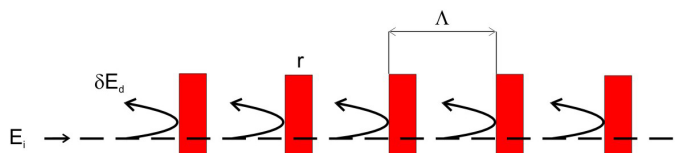
Vláknová optická Braggova mřížka je prvek, jehož funkce je založena na existenci periodických nebo kvaziperiodických změn indexu lomu v jádře optického vlákna podél osy vlákna. Je-li těchto opakujících se změn indexu lomu dostatečný počet (alespoň několik tisíc) a je-li také dostatečně velký rozdíl v indexu lomu maxima a minima změn, světelná vlna s mřížkou interaguje. Vlna se šíří jádrem vlákna a dopadne na tuto podélně modulovanou strukturu indexu lomu. Od této struktury se vlna může částečně nebo úplně odrazet či částečně nebo úplně procházet. Odraz nebo průchod strukturou mřížky se řídí tím, je-li optické záření složeno z vlnových délek, které interferují na periodické struktuře mřížky.

Je-li například prostorová perioda indexových změn mřížky rovna polovině délky vlny světla ve vláknu, nebo celistvému násobku této poloviny vlnové délky, na mřížku dopadající optické záření se účinně odráží a pokračuje ve vláknu zpětným směrem. Této podmínce se říká Braggova podmínka odrazu a frekvenci (či vlnové délce), která jí vyhovuje říkáme, Braggova frekvence (či vlnová délka). Odraz nastává přesně při splnění této podmínky a ve velmi úzkém okolí kolem Braggovy frekvence. Pro světlo s vlnovou délkou mimo Braggovu frekvenci odraz prakticky nenastává, nebo se odráží jenom nepatrná část světla, o níž hovoříme jako o postranních lalocích. Popsaná situace je na obr. 2.1. Braggova podmínka odrazu vyžaduje, aby se částečné odrazy



Obr. 2.1: Znázornění Braggovy mřížky

postupující vlny od jednotlivých změn indexu v mřížce vzájemně sečítaly, tzv. interferovaly konstruktivně. To znamená, že částečný odraz od následující indexové změny musí přijít k předchozí indexové změně v mřížce v přesně stejné fázi jakou má odraz vlny od této předchozí indexové změny. Fázové zpoždění mezi předchozí a následující částečně odraženou vlnou měřené ve stejném místě musí být nula radiánů nebo celistvý násobek 2π . To je ukázáno na obrázku 2.2.



Obr. 2.2: Odraz Braggovy mřížky

2.2 Výroba Braggovy mřížky

Pro výrobu Braggovy mřížky potřebujeme změnit index lomu ve vláknech. Vlastnost vlákna, která tuto změnu umožňuje, se nazývá fotocitlivost. Pomocí fotocitlivosti vlákna můžeme vytvořit stálé změny indexu lomu v jádru optického vlákna. Metoda k získání změn indexu lomu je založena na principu osvitů fotocitlivého vlákna UV zářením správně určené intenzity a příslušné vlnové délky. V dnešní době se pro výrobu mřížek používají většinou vlákna s obsahem germania v jádru. Příměsí germania v jádru vlákna nebyly zvoleny náhodně, bylo zjištěno, že jádra s příměsí germania vykazují největší fotocitlivost.

Postup výroby mřížek závisí nejen na účelu použití, ale také na volbě vlákna a jeho fotocitlivosti. Pro největší škálu užití by bylo nejvhodnější zejména standardní telekomunikační optické vlákno. Standardní telekomunikační vlákna však vykazují velmi nízkou fotocitlivost. Ke zlepšení fotocitlivosti jsou využívány různé techniky.

Jednou z nejpoužívanějších metod pro zvyšování fotocitlivosti ve vláknu je zvyšování obsahu germania v jádře optického vlákna. Fotocitlivost ve vláknu souvisí s vytvářením tzv. poruchových vazeb mezi atomy germania. Standardní telekomunikační vlákna mají obsah germania velmi malý a jejich fotocitlivost je také velmi malá. Pro dosažení vysoké fotocitlivosti se tedy připravují speciální vlákna s vysokým obsahem germania, která vykazují zvýšení fotocitlivosti až o dva řády oproti standardu.

Další metodou pro zvýšení fotocitlivosti je metoda hydrogenizace. Metoda je založena na principu vpravení molekul vodíku do jádra vlákna. Při hydrogenizaci vlákna se vlákno umístí po dobu několika dnů do tlakové komory, jež obsahuje vodík v plynném stavu a ve vysokém tlaku. Teploty uvnitř tlakové komory, při kterých se hydrogenizace provádí, jsou v rozmezí 20 – 75°C a tlak vodíku uvnitř komory je okolo 150 atm. Tuto metodu zvýšení fotocitlivosti lze aplikovat téměř u všech druhů vláken.

Třetí metodou zvýšení fotocitlivosti je metoda žárového žíhání. Je použitelná v germano–křemičitých vláknech. Vlákno zahříváme kyslíko–vodíkovým hořákem až na teplotu 1700°C, tím dosáhneme vpravení atomů vodíku do vlákna a fotocitlivost se několikanásobně zvýší. Jde o stejný princip jako u metody hydrogenizace.

Vláknovou mřížku (tedy periodické změny indexu lomu ve fotocitlivém vláknu) můžeme vytvořit osvitěním UV zářením opět několika způsoby. Některé poznatky ohledně Braggových mřížek jsem čerpal z anglické i české literatury [2], [4].

2.2.1 Výroba mřížky pomocí interferometrické metody

Při výrobě mřížky interferometrickou metodou používáme vysoce koherentní kontinuální laser, jehož paprsek se rozdělí do dvou stejně výkonných svazků. Tyto svazky se soustavou optických zrcadel promítnou do prostoru, kde je umístěno vlákno. V tomto prostoru dva svazky interferují a vytvářejí interferenční obrazec periodicky se střídajících maxim a minim. Vzdálenost maxim a minim se dá měnit vzájemným úhlem dvou interferujících svazků. Změnou úhlu se tedy může měnit perioda vyráběné mřížky. Nevýhodou této metody je nezbytná vysoká stabilita celé optické sestavy. Expoziční časy bývají až několik minut a po celou tuto dobu se interferenční obrazec nesmí měnit. Optická sestava se tedy musí velmi důkladně izolovat od mechanických chvění a dokonce i od možných proudění vzduchu.

2.2.2 Bod po bodu

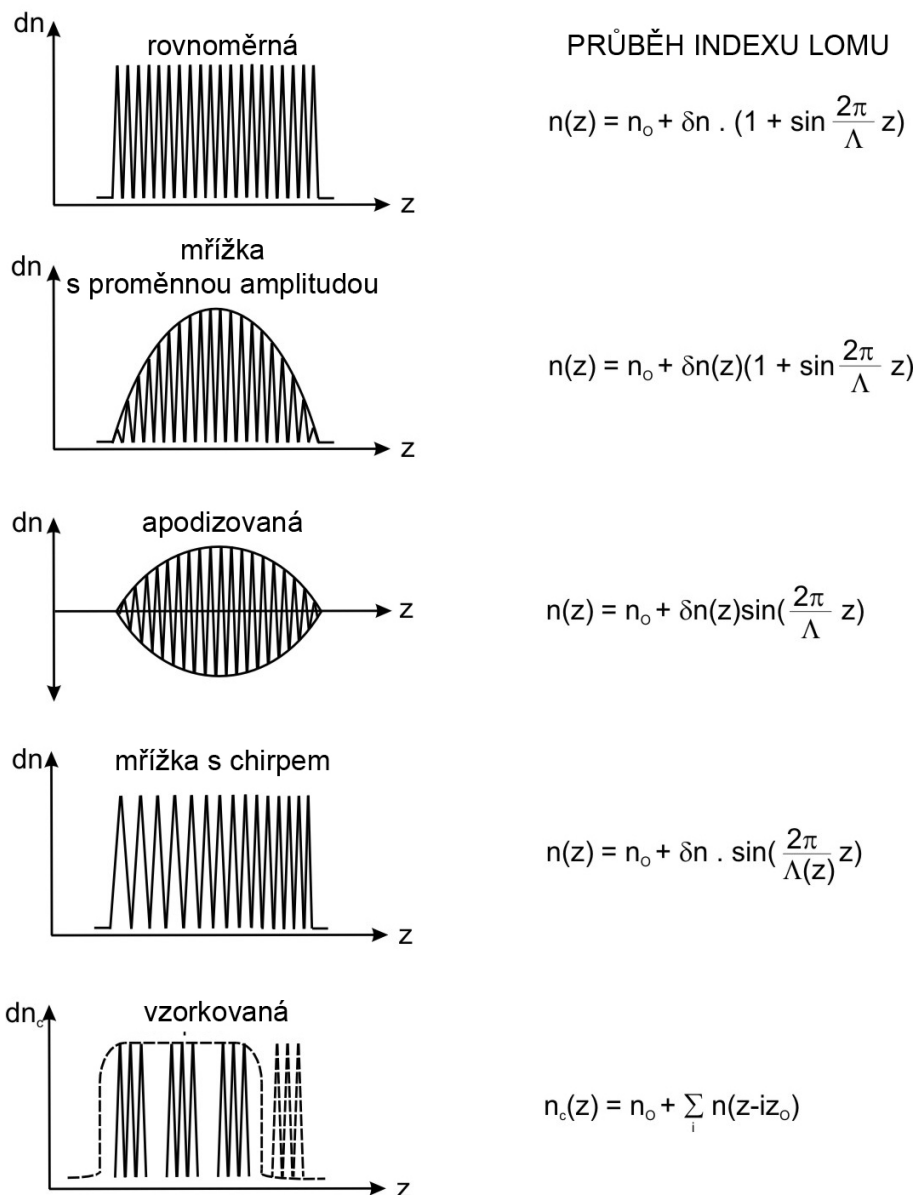
Při výrobě mřížky bod po bodu používáme velmi výkonný pulsní laser, jehož svazek je upraven soustavou čoček do velmi tenkého nerozbíhavého paprsku. Tento paprsek prochází štěrbinou, která ho zúží do potřebné šířky, již odpovídající rozměru jedné oblasti zvýšeného indexu lomu v mřížce. Vlákno je umístěno pod štěrbinou na motorizovaném posuvném stolku, pohybuje se určenou rychlostí a frekvence impulsů laseru určuje vzdálenost maxim indexu lomu a tím i periodu mřížky. Výhodou této metody výroby mřížky je, že změnou rychlosti posuvu vlákna nebo změnou frekvence impulsů laseru můžeme měnit periodu exponované mřížky. Můžeme tak vyrábět mřížky s velmi dlouhou periodou nebo s proměnnou periodou tzv. čířpované.

2.2.3 Metoda fázové masky

Při výrobě mřížky metodou fázové masky ozařujeme optické vlákno koherentním UV zářením přes průhlednou destičku – masku, na níž je vytvořena reliéfní optická mřížka. Reliéf optické mřížky zajišťuje zpoždění záření mezi prohlubněmi a výstupky mřížky přesně 180° , to je $\lambda/2$. Světlo vystupující z tohoto reliéfu interferuje a vytváří zóny s maximální a minimální intenzitou, které jsou od sebe vzdálené polovinu periody optické mřížky na masce. Těmito světelnými maximy je exponováno optické vlákno umístěné těsně pod reliéfní mřížkou masky. Tato metoda nevyžaduje, ani příliš vysokou koherenci světla ani extrémní mechanickou stabilitu, celá mřížka je exponována současně. Nevýhodou této metody je, že pro každou mřížku s odlišnou Braggovou vlnovou délkou je třeba připravit individuální fázovou masku. Výroba masky je nákladná a používá se u ní technologie elektronové litografie.

2.3 Jaké jsou typy Braggových mřížek a čím se vyznačují

Jednotlivé typy optických mřížek jsou znázorněny na obrázku 2.3.



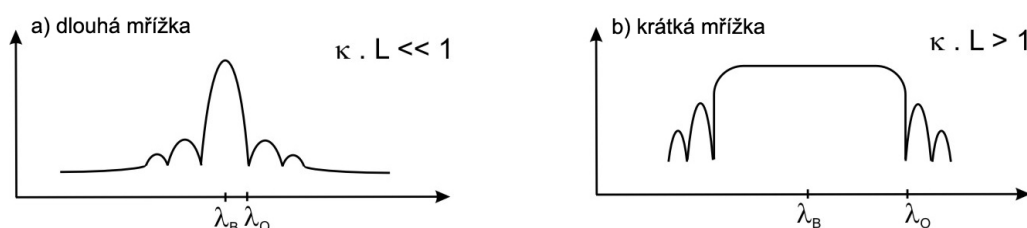
Obr. 2.3: Jednotlivé typy vláknových mřížek

3 MĚŘENÍ SPEKTRÁLNÍCH VLASNOSTÍ BRAGGOVÝCH MŘÍŽEK

3.1 Vlastnosti měřených mřížek

Braggovy optické mřížky vykazují odraz záření na vlnové délce vyhovující Braggově podmínce, kterou jsme probrali v předešlé kapitole. Záření se také odrazí na vlnových délkách blízkých Braggové podmínce. V odraženém světle se tak vytváří tzv. hlavní odrazný lalok. V maximu se dosahuje odrazivost od několika desítek procent do 99,9%. Šířka tohoto hlavního laloku i odrazivost maxima souvisí s výrobními parametry mřížky a s jejím návrhem.

Vlastnosti mřížky, které zásadně ovlivňují spektrum odrazu, jsou délka mřížky a hloubka modulace efektivního indexu lomu ve vlákne δn_{ef} . Zejména parametr δn_{ef} výrazně ovlivňuje chování mřížky. Bývá v rozmezí hodnot 10^{-5} až 10^{-3} , a jeho hodnota závisí na způsobu výroby mřížky. Při vysokých hodnotách δn_{ef} se záření na Braggové vlnové délce odráží od mřížky velmi intenzivně a od začátku mřížky se vzdáleností rychle klesá intenzita postupujícího záření. V místech, kde intenzita postupujícího záření klesne téměř k nule, mluvíme o efektivním konci mřížky a vzdálenost tohoto místa od začátku mřížky udává tzv. efektivní délku mřížky. Tato délka může být podstatně menší než je skutečná délka celé mřížky. Šířka hlavního laloku ve spektru odraženého záření je tím větší, čím menší je efektivní délka mřížky, viz obrázek 3.1. Na obou stranách vedle hlavního laloku se vyskytují postranní maxima s odstupem intenzity 30 až 50 dB. Nejužší spektrum hlavního maxima získáme v mřížce s malým δn_{ef} , dlouhou geometrickou délkou a malou celkovou odrazivostí. Úroveň postranních maxim se často snižuje použitím tzv. apodizace, kdy se hodnota δn_{ef} po délce mřížky řízeně mění, viz obrázek 3.1 typy mřížek.



Obr. 3.1: Spektrum dlouhé a krátké mřížky

Šířka hlavního laloku odrazného spektra může být od několika desítek pm až do několika nm, u čířpovaných mřížek pak i více. Spektrum procházejícího záření

by mělo být teoreticky inverzní k odraženému spektru, ale ve skutečnosti je toto spektrum ovlivněno rozptylem záření a konverzí vedeného jádrového vidu do vidů plášťových. Deformace spektra plášťovými vidy je pozorovatelná hlavně u mřížek s velkým δn_{ef} a vyskytuje se na krátkovlnné straně spektra procházejícího signálu, kde vzniká výrazné zvýšení útlumu v oblasti několika jednotek až desítek nm.

Měření spektra tedy musí zajistit dostatečné rozlišení pro zjištění průběhu hlavního laloku bez zkreslení. Toto rozlišení by mělo být lepší než 10 pm. Dále je při měření nutno zajistit dostatečný rozsah vlnových délek, alespoň 10 nm a více. Konečně je při měření nutno zajistit potřebnou vysokou dynamiku rozsahu měřených intenzit, aby bylo možné spolehlivě zjišťovat amplitudy postranních laloků a hodnotit případnou přeměnu záření do plášťových vidů. Je třeba zajistit dynamiku rozsahu měření spektrální hustoty intenzity záření cca 60 dB.

3.2 Měření optického spektra rozkladem světla

Nejčastější metoda, která při měření spekter mřížek zajistí potřebnou přesnost a ostatní parametry, je metoda spektrálního rozkladu záření. Mřížka je přes optický vláknový cirkulátor ozařována širokospektrálním zdrojem. Lze použít širokospektrální diodu nebo lépe zdroj ASE, což je zdroj využívající spontánní emise světla v erbium dopovaném zesilovacím vlákně. Záření se od mřížky odráží a v cirkulátoru je tento odraz veden do spektrálního analyzátoru, v něm měřené záření dopadá na difrakční mřížku a zde se odráží různými směry podle vlnových délek v záření obsažených. Toto rozložené záření je vedeno na lineární CCD detektor, na jehož každou buňku dopadá jiná vlnová délka. Sejmutím a vyhodnocením signálu ze všech buněk CCD detektoru získáme hodnoty spektrální hustoty výkonu měřeného záření pro každou vlnovou délku z rozsahu vymezeného funkcí difrakční mřížky a velikosti a počtem buněk CCD detektoru. Má-li např. CCD detektor 1024 buněk, pak získáme 1024 vzorků spektrální hustoty výkonu rovnoměrně rozložených v celém měřicím rozsahu. Pokud je tedy měřicí rozsah 1 nm, získáme spektrální rozlišení 1 pm. Existují jednodušší spektrální analyzátory s pevnou konfigurací, jejichž měřicí vlastnosti jsou omezeny zmíněnou vazbou mezi velikostí rozsahu a rozlišením. Cena takovýchto kompaktních jednotek bývá přes 5 tisíc eur. Na trhu jsou také komplikované měřicí systémy pro optickou spektrální analýzu s rekonfigurovatelnou optickou sestavou, které umožňují měnit rozsah měření od stovek nm až do jednotek nm. Cena takovýchto zařízení přesahuje 50 tisíc eur.

3.3 Měření optického spektra skenováním

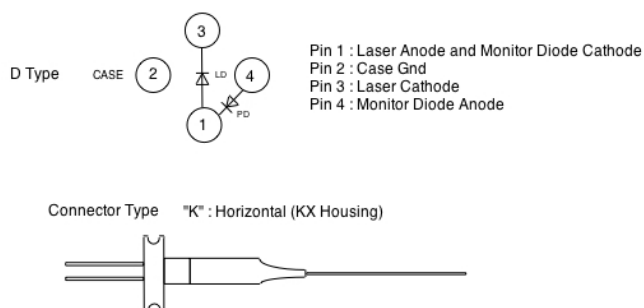
Optické spektrum mřížky v odraženém či procházejícím světle lze zjišťovat také metodou skenování spektra. K tomu, abychom mohli využít skenování potřebujeme přeladitelný optický zdroj s úzkou spektrální čarou nebo přeladitelný úzkopásmový optický filtr.

Měření s přeladitelným filtrem vychází z možností moderní součástkové základny založené na Braggových mřížkách. V nedávné době začaly být komerčně nabízeny Braggovy přeladitelné filtry založené na úzkopásmové Braggově mřížce ovládané piezoelektrickým aktuátorem. Vlastnosti mřížky a posun Braggovy frekvence se zde řídí změnou axiálního mechanického napětí ve vláknu s mřížkou a dosahuje se přeladění Braggovy vlnové délky až o 20 nm. Šířka hlavního laloku bývá kolem 0,2 nm. Měřená mřížka se pak přes cirkulátor ozařuje širokopásmovým zdrojem a odražené záření je filtrováno zmíněným přeladitelným filtrem. Výsledné záření je pak snímáno fotodiodou. Tento systém vykazuje jistou nevýhodu malého spektrálního rozlišení.

Druhou možností skenování spektra je měření s přeladitelným optickým zdrojem. Princip této metody vychází z toho, že měřenou mřížku ozařujeme opět přes cirkulátor zářením z úzkopásmové laserové diody vybavené termoelektrickým chladičem, viz obrázek měření spektra skenováním. Dioda s vhodnou konstrukcí rezonátoru, např. Fabry–Perrot nebo DFB, se dá změnou provozní teploty přeladovat v rozmezí několika nanometrů až několika desítek nanometrů. Změnou teploty čipu se u F–P diody mění délka rezonátoru a tím i vlnová délka vyzařovaného světla, u DFB diody se mění perioda zpětnovazební mřížky na čipu a tím opět vlnová délka vyzařovaného světla. Diodu se zabudovaným termoelektrickým chladičem lze podle orientace proudu ochlazovat až do mínus 40°C a nebo naopak ohřívat až do cca 80 či 100°C. Ke stabilizaci teploty lze využít standardně zabudovaný termistor v pouzdře laserové diody. Takovéto laserové moduly jsou na trhu v různých základních vlnových délkách od 800 nm do 1600 nm, jejich cena souvisí s maximálním výkonem a kvalitou spektra (šířkou čáry). Jsou k dispozici diody s šířkou čáry pod 10 pm. Ceny jsou v rozmezí několika set eur až cca 1500 eur. Postupně tepelně přeladované záření takovéto diody se odráží od měřené mřížky, viz. obrázek 3.3, popřípadě mřížkou prochází, viz. obrázek 3.4, a dopadá na fotodetektor, kde je pro každou vlnovu délku individuálně vyhodnocováno. Přeladováním diody se skenuje měřící interval spektra cca 10 nm. Úzká spektrální čára diody zajistí dostatečné spektrální rozlišení kolem 10 pm.

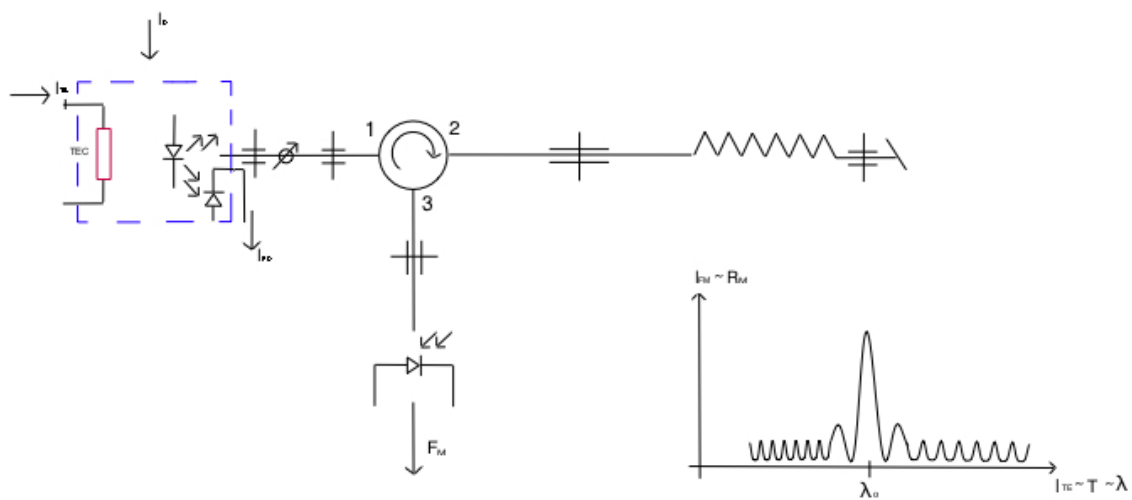
Z důvodu nejnižší ceny potřebných součástek a jejich relativně dobré dostupnosti budeme pro vyhodnocování spektra Braggových mřížek používat metodu skenování spektra přeladitelnou laserovou diodou. Jako měřící optický zdroj jsem vybral

laserovou diodu Luminent OIC C-1550A-DFB2.5-PD-SFCMI/APC-K viz Obrázek3.2.

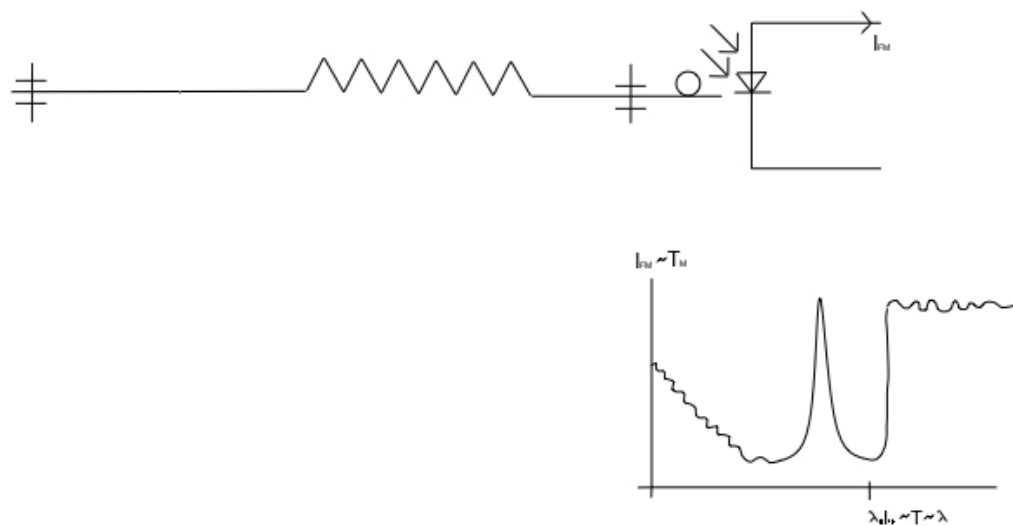


Obr. 3.2: a) Laserová dioda C-1550A-DFB2.5-PD-SFCMI/APC-K

Pouzdro kromě DFB čipu s výkonem cca 0,5 mW a šířkou spektra 59 pm obsahuje monitorovací fotodiodu pro řízení vysílaného výkonu, Peltierův termoelektrický chladič a termistor jsou umístěny na chladiči laserové diody, viz obrázek 3.2 a datový list v příloze[7].



Obr. 3.3: a) Blokové schéma zařízení pro odražený směr

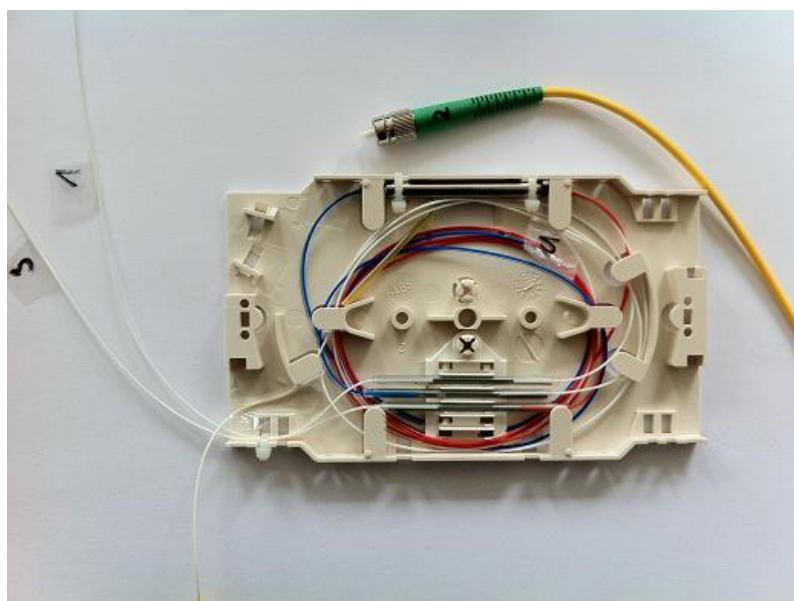


Obr. 3.4: b) Blokové schéma zařízení pro prostupný směr

4 MĚŘÍCÍ PRACOVNÍŠTĚ A KONSTRUKCE MĚŘICÍHO MODULU

4.1 Popis měřicího pracoviště a konstrukce optického a elektronického měřicího modulu

Měřicí pracoviště je složeno z optovláknové sestavy pro měření v odraženém či propuštěném světle, viz obrázek 3.3 a 3.4, z elektronického modulu buzení diody a snímání proudu fotodiody, z teplotního kontroleru a z řídicího počítače. Optovláknová sestava je tvořena modulem laserové diody, která je při měření v odraženém světle připojena k rameni číslo 1 optického vláknového cirkulátoru. Ke druhému rameni cirkulátoru je připojena měřená mřížka a k rameni 3 je připojena měřící fotodioda.



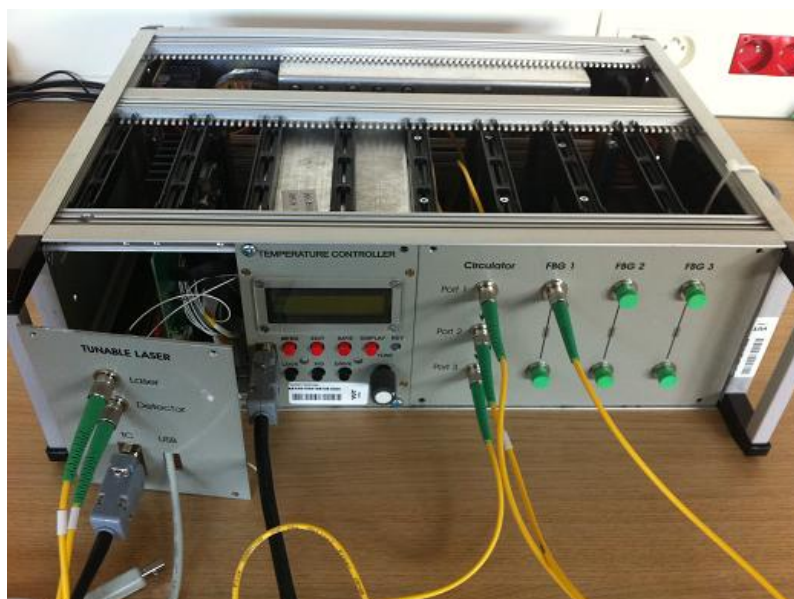
Obr. 4.1: Uložení vláken do kazety cirkulátoru

Záření z laserové diody prochází cirkulátorem do měřené mřížky, od níž se odráží v závislosti na naladění vlnové délky laserové diody vzhledem ke spektru odrazivosti mřížky. Záření, které mřížkou prochází, je přivedeno do bezodrazného vláknového zakončení – tvořeného APC konektorem či úhlově zalomeným vláknem. Záření odražené od mřížky se vrací zpět do cirkulátoru a je přesměrováno do vláknového ramene s fotodiódou, kterou je vyhodnoceno. Pro měření v propustném směru je záření z laserové diody vedeno přímo do měřené mřížky. Procházející záření je dále zavedeno do fotodiody, kde je vyhodnocováno. Je důležité, aby záření přivedené do fotodiody

nevykazovalo odraz ve vazbě z vlákna do fotodiody. V případě, kdy se experimentálně ukáže, že takový odraz vzniká, bude potřebné vřadit mezi mřížku a fotodiodu vláknový izolátor k zamezení parazitních rezonancí.

Spoje mezi jednotlivými členy optické soustavy jsem realizoval bezodraznými vláknovými konektory APC.

Měřicí pracoviště je vestavěno do přístrojové skříně se zdrojovou jednotkou, s napájecím rozvodem a rozvodem sériového rozhraní. Do přístrojové skříně je vsazen blok teplotního kontroléru UPT ČSAV. Přístrojová skříň dále obsahuje bloky, které vznikly jako výsledek mé bakalářské práce.



Obr. 4.2: Měřicí pracoviště pro analýzu vlastností vláknových mřížek

Prvním z nich je blok vláknové optiky s cirkulátorem a optickým mřížkami, tzv. optický měřicí modul. Optický modul obsahuje trojramenný optický vláknový cirkulátor a optické vláknové Braggovy mřížky. Všechny tyto vláknové součástky používají jednovláknová vlákna a jsou navrženy pro práci ve vlnovém pásmu 1550 nm. Optický vláknový cirkulátor zajistí oddělení budícího signálu z laserové diody do Braggovy mřížky a odražené světlo směrem do fotodiody, viz. blokové schéma odraženého směru. Braggovy mřížky byly navrženy podle výsledků disertační práce UMEL Ing. Radka Helána Ph.D. Optický cirkulátor i mřížky jsou uloženy v optovláknových kazetách. Optické kazety slouží k zajištění mechanické stability optického systému a zajištění optických mřížek proti poškození. Mřížky jsou uloženy v kazetách bez recoatingu – tj. bez obnovení primární ochrany vlákna. Mřížky byly z výroby dodány s provedením vývodů osazených konektorů FC –APC. Optický cirkulátor byl dodán s provedením vývodů s volnými vlákny. Pro montáž cirkulátoru

do optického modulu bylo nutno osadit ramena cirkulátorů pigtaily FC – APC. Toto osazení jsem provedl optickým svárem volného vlákna a pigtailu v automatickém svářecím zařízení Fujikura FSM – 100P.



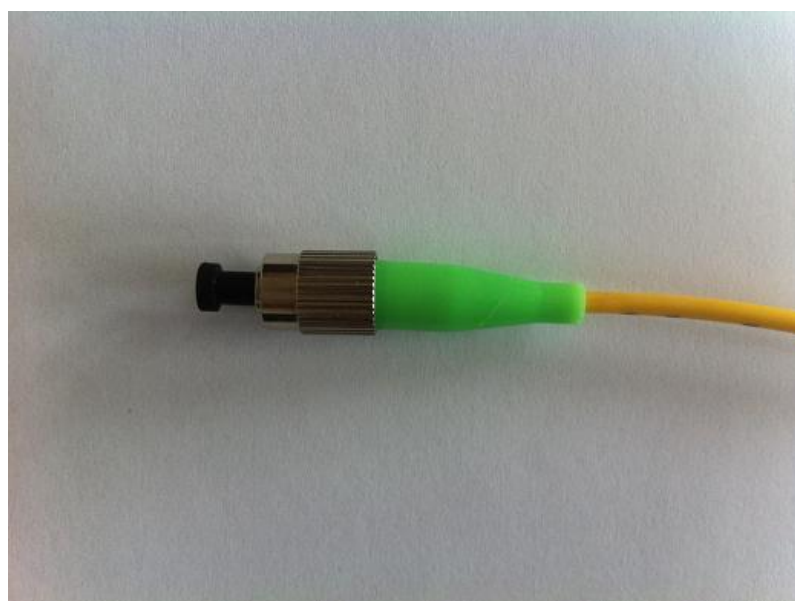
Obr. 4.3: Svářečka optických vláken Fujikura FSM – 100P

Optické sváry jsou opatřeny termokompresní ochranou svárů, která brání jejich zlomení. Sváry s ochranami jsou také uloženy v optické kazetě. Použil jsem tři optické mřížky s různými průběhy spekter. Optické vývody mřížek i cirkulátoru jsou umístěny na čelním panelu optického bloku. Pro zajištění robustnosti a stálosti optických parametrů při propojování jednotlivých optických komponentů jsem volil univerzální typ optických konektorů FC – APC. Jde o jenovidový konektor s úhlovým zakončením a šroubovaným zajištěním s vysokou stabilitou, s nízkým vložným útlumem a malým zpětným odrazem.

Na obrázku 4.4 vidíme čtyři optické kazety vložené do přístrojové skříně. Braggovy mřížky jsou uloženy v černých kazetách a cirkulátor v bílé kazetě. Všechna optická vlákna jsou zakončena FC/APC konektorem zapojená do adaptérů umístěných na čelním panelu. Adaptéry se využívají k propojení dvou optických vláken zakončených stejným konektorem FC/APC. Konektor FC/APC můžeme vidět na obrázku 4.5



Obr. 4.4: Optická soustava tvořená cirkulátorem a Braggovými mřížkami



Obr. 4.5: Optický konektor FC/APC

Dalším blokem vloženým do přístrojové skříně a řešeným v mé práci je elektronický měřicí modul.

Elektronický modul má za úkol řídit napájecí proud laserové diody tak, aby mohl zajistit režim buzení s konstantním proudem nebo režim buzení diody s konstantním optickým výkonem. Dále má zajistit zpracování signálu z přijímací fotodiody. Od řídicího modulu očekáváme flexibilní možnosti jeho využití i v měřicích sestavách, které vyžadují dva optické zdroje nebo dvě vyhodnocovací diody (jako např. při práci s moduly polovodičových optických zesilovačů SOA). Řídicí modul tedy

obsahuje dva identické bloky řízení laserové diody a dva identické bloky pro vyhodnocování signálu z fotodiod.

Blok řízení laserové diody je složen ze tří částí.

První část je řízení proudu laserové diody. Laserové diody jsou k desce připojeny přes konektory JP3, JP4, viz schéma. Vstupní veličinou pro řízení proudu laserové diody je hodnota napětí z D/A převodníku řízeného mikroprocesorem. Toto napětí je zpracováno diferenčním zesilovacím stupněm tvořeným operačním zesilovačem. Řídící signál z D/A převodníku je přiveden do neinvertujícího vstupu operačního zesilovače. Výstup operačního zesilovače je přiveden k bázi budícího tranzistoru v zapojení se společným emitorem, v jehož kolektoru je obvod laserové diody. Emitorový proud budícího tranzistoru je veden na zem přes zpětnovazební odpor. Na něm se vytváří úbytek napětí úměrný budícímu proudu laserovou diodou. Tento úbytek je veden do A/D převodníku a dále zpět do řídicího mikroprocesoru.

Druhá část bloku řízení laserové diody je vyhodnocování optického výkonu. Optický výkon je vyhodnocován monitorovací fotodiodou zabudovanou v modulu laserové diody. Proud z této fotodiody je veden na zem přes zatěžovací odpor. Úbytek napětí na zatěžovacím odporu je zaveden do neinvertujícího vstupu operačního zesilovače zapojeného jako napěťový sledovač. Výstupní napětí ze sledovače je zpracováno A/D převodníkem a je zavedeno do řídicího mikroprocesoru. Do invertujícího vstupu diferenčního zesilovače řízení proudu laserové diody je přes jumper přepínač přiveden buď úbytek napětí z emitorového zpětnovazebního odporu budícího tranzistoru, nebo úbytek napětí ze zatěžovacího odporu monitorovací fotodiody. Podle polohy propojení jumper konektoru můžeme zapojit obvod buzení laserové diody tak, abychom vstupním signálem z D/A převodníku řídili buď proud laserové diody – propojeny špičky 1 a 2 jumperu, nebo optický výkon laserové diody – propojeny špičky 2 a 3 jumperu.

Třetí část bloku řízení laserové diody je řízení teploty. Na elektronickém modulu je připevněn chladič, ve kterém je umístěna laserová dioda a termistor, kterým snímáme teplotu laserové diody. Signál z termistoru je zaveden do teplotního kontroleru, kterým nastavujeme teplotu laserové diody. Na chladič je tepelně vodivým tmelem přilepen Peltierův článek, který funguje na principu Peltierova jevu. Obvod Peltierova článku je tvořen spojením dvou vodičů s rozdílnými výstupními pracemi. Dochází zde na jedné straně styku k ochlazování a na druhé straně dochází k zahřívání. Článek má tedy dvě strany, jednu pro topení a druhou pro chlazení. Na desku je připevněn chladič, který je zasazený do čtvercové díry vykrojené do desky plošného spoje. Ke chladiči s Peltierovým článkem je z druhé strany plošné desky při-

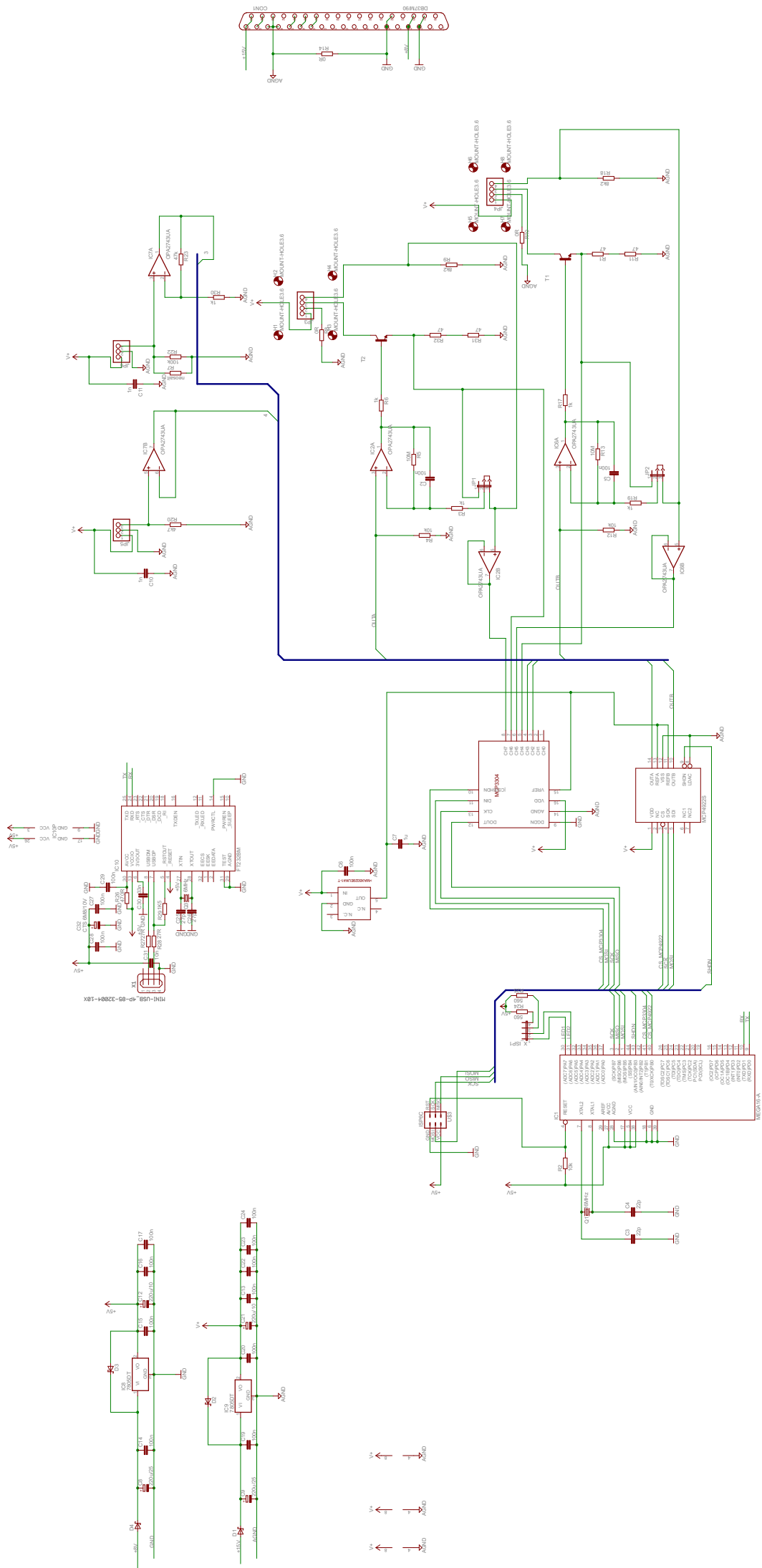
šroubováno chladicí žebro. Vývody termistoru a Peltierova článku jsou přivedeny na konektor DB9 umístěný na čelním krytu elektronického modulu. Pomocí propojovacího kabelu DB9/DB9 je připojeno teplotní řízení laserové diody do modulu komerčního teplotního kontroleru, který je výrobkem UPT ČSAV. Teplotní kontroler, stejně jako elektronický modul s řídicím mikroprocesorem budou dále připojeny USB rozhraním k řídicímu počítači.

Blok vyhodnocování signálu z fotodiod je tvořen napájecím obvodem fotodiody, zatěžovacím odporem a operačním zesilovačem zapojeným jako neinvertující napěťový sledovač. Napětí ze zatěžovacího odporu oddělené napěťovým sledovačem je zavedeno do vstupu A/D převodníku a dále do řídicího mikroprocesoru. Elektronický modul obsahuje obvod MCP3304, který funguje jako osmikanálový 13-bitový A/D převodník, z něhož využíváme 6 kanálů. Dále je zde obvod MCP4922S, který pracuje jako dvoukanálový 12-bitový D/A převodník. Referenční napětí 4,096V k A/D a D/A převodníku vytváříme obvodem MAX6029EUK41 – T. Jádrem řídicího elektronického obvodu je řídicí mikroprocesor MEGA16 – A, který je doplněn o obvod USB interface FT232BM. Řídicí počítač, který je k elektronickému modulu připojen USB rozhraním, ovládá výstupní napětí D/A převodníku pro řízení proudu nebo výkonu diod. Využíváme signál SHDN pro blokování buzení laserových diod. Dále zde odečítáme hodnoty z šesti kanálů A/D převodníků určující velikosti proudu laserových diod, velikosti optických výkonů na výstupu laserových diod, a velikosti optických signálů dopadající na měřicí fotodiody. Řídicí počítač, jak už jsem uvedl, je také propojen s teplotním kontrolerem, pomocí kterého nastavujeme požadovanou hodnotu teploty laserové diody. Program řídicího počítače udržuje konstatní optický výkon laserové diody a vyhodnocuje odpovídající optický signál z měřicí fotodiody. Výsledky jsou poté uspořádány do grafů.

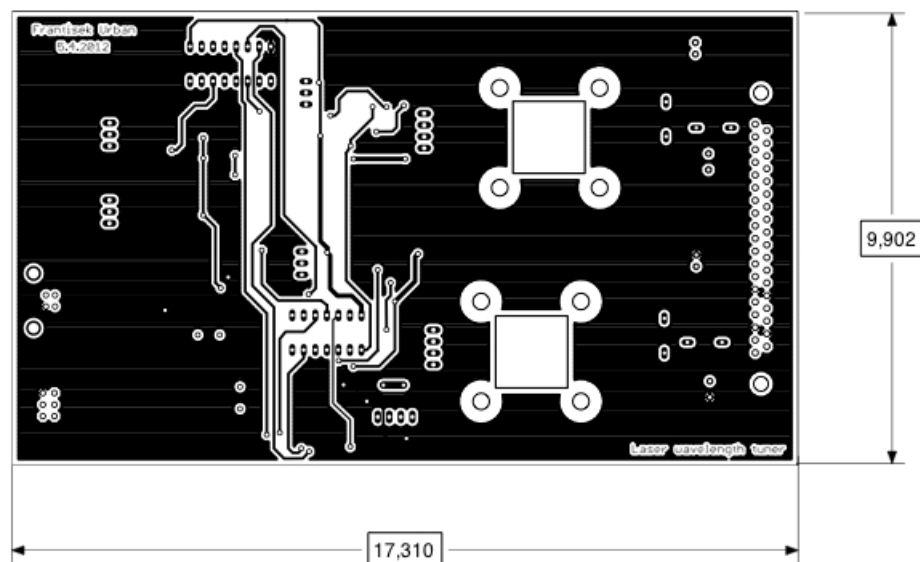
Důležitou částí elektronického modulu je USB rozhraní, pomocí kterého naprogramujeme všechny funkce procesoru a ovládání D/A a A/D převodníků a který bude pak sloužit ke komunikaci mezi procesorem a počítačem.

5 SCHÉMA A DESKA PLOŠNÉHO SPOJE MĚŘÍČÍHO PŘÍPRAVKU

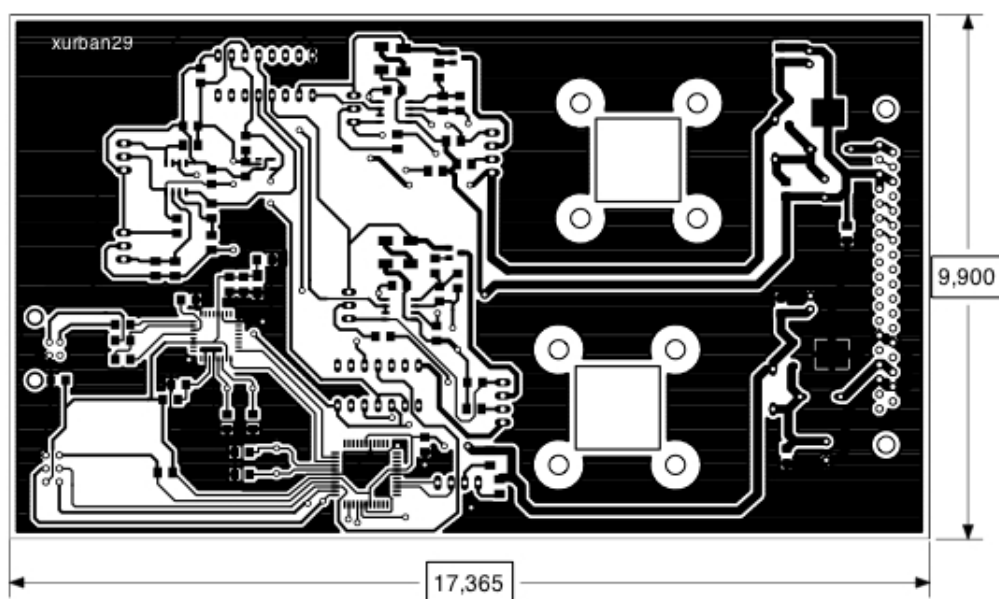
Při tvorbě schématu jsem použil program EAGLE, který je jedním z nejčastěji používaných programů pro tvorbu schémat a následně desek plošných spojů. Výsledné schéma pro elektronický modul vzniklo mým vlastním návrhem jednotlivých funkčních bloků a mou úpravou doporučeného zapojení ovládání laserové diody, procesoru, A/D a D/A převodníku a USB rozhraní [5]. Jednotlivé součástky schématu jsou uvedeny v rozpisce použitých součástek. Při návrhu desky plošného spoje jsem vycházel ze zásad konstrukce plošných spojů. Využil jsem dvouvrstvé desky z důvodu složitosti a velké hustoty propojovaných vývodů procesoru a D/A, A/D převodníků. Rozmístění jednotlivých součástek jsem volil tak aby bylo dosaženo minimálních délek spojů, tak aby nedošlo ke vzniku významných parazitních vlastností (odporů, kapacit, indukčnosti spojů). V návrhu desky jsem odděloval země analogové části zapojení a digitálních obvodů. Využitím funkce polygon v návrhovém systému Eagle jsem provedl rozlití digitální země po volných plochách obou stran desky tak, abych na minimum snížil důsledky vysokofrekvenčních proudů a napětí v napájecích i signálních obvodech číslicových integrovaných obvodů. Ve většině případů jsem ke konstrukci volil SMD prvky. Výjimkami jsou veškeré konektory, elektrolytické kondenzátory, Schottkyho diody, A/D, D/A převodníky, krystaly, moduly laserových diod a fotodiod. Plošný spoj je navržen tak, aby ze strany konektorů byly osazeny všechny vývodové součástky. Všechny SMD součástky byly umístěny ze spodní strany desky tzv. Bottom. Při výrobě prototypu desky byly SMD součástky osazeny do pasty a spájeny přetavením v peci a poté z horní strany osazeny ručně vývodové součástky a ručně zapájeny. Výroba dvouvrstvé desky byla podle mého návrhu provedena ve firmě ČEMEBO Blansko. Deska plošných spojů byla z obou stran opatřena nepádivou ochranou maskou. Osazení součástek kromě konektorů a chladičů bylo podle mého návrhu provedeno firmou NETWORK GROUP s.r.o., finální osazení konektorů, laserové diody, chladiče s Peltierovým článkem, fotodiody a realizaci optického vláknového zapojení jsem provedl vlastními silami. Sám jsem také prováděl oživení desky, její programování jsem prováděl za asistence technika laboratoře optoelektroniky UMEL.



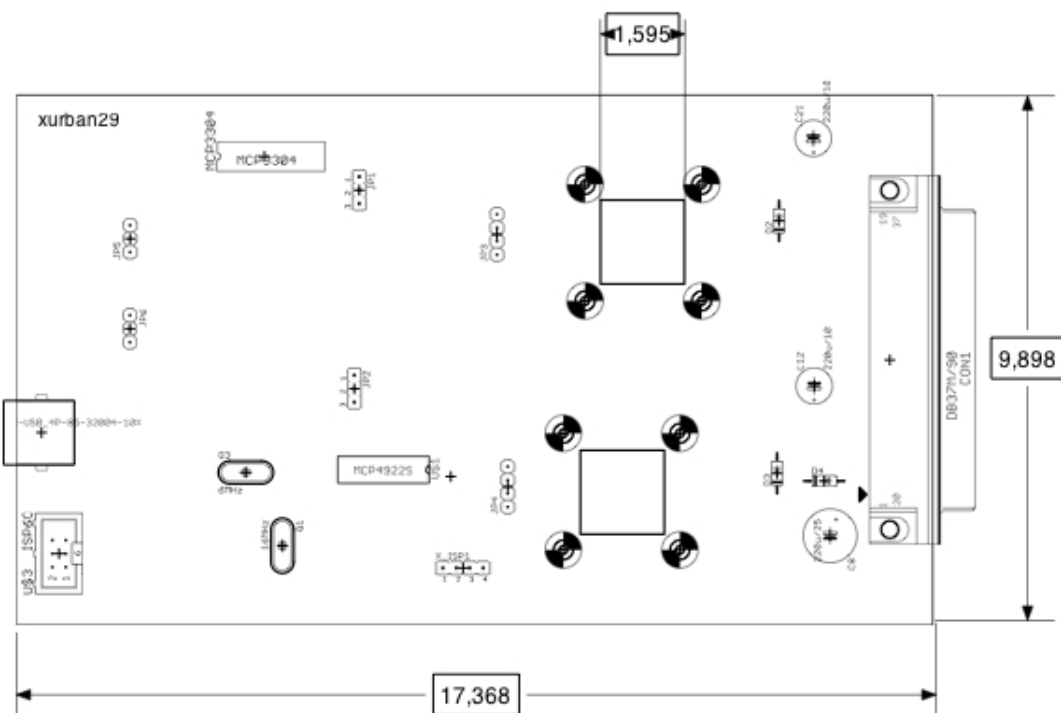
5.1 Výroba desky plošného spoje měřicího přípravku



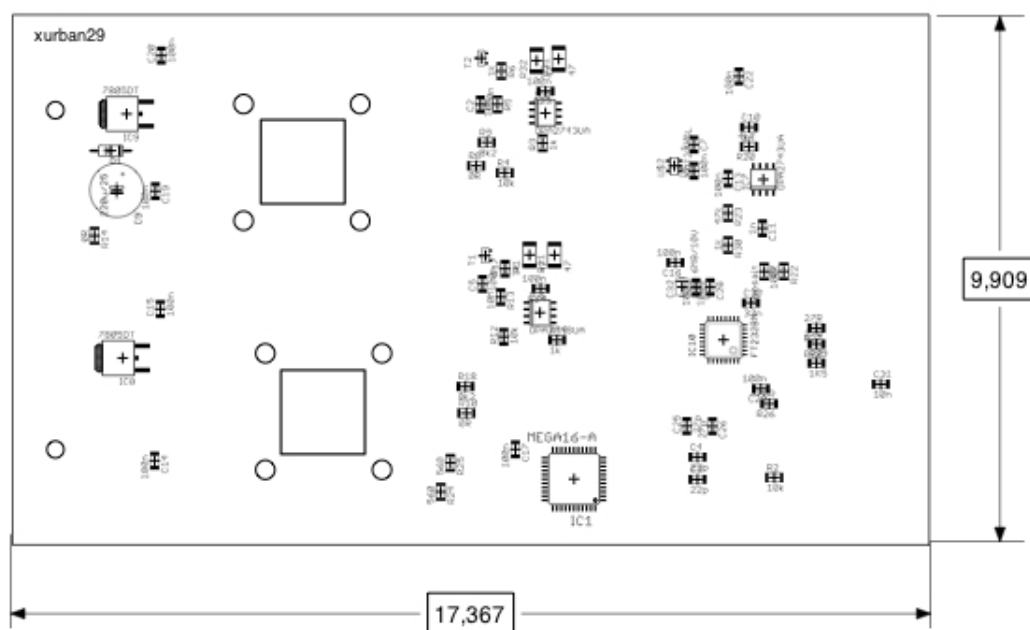
Obr. 5.1: a) Deska plošného spoje pohled Top



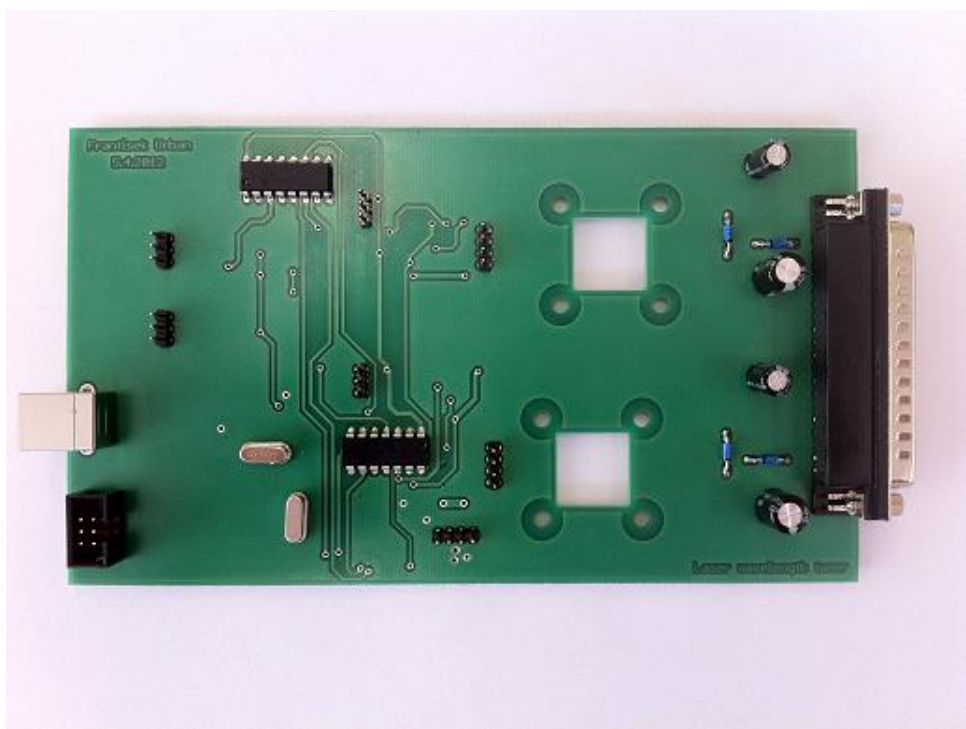
Obr. 5.2: b) Deska plošného spoje pohled Bottom



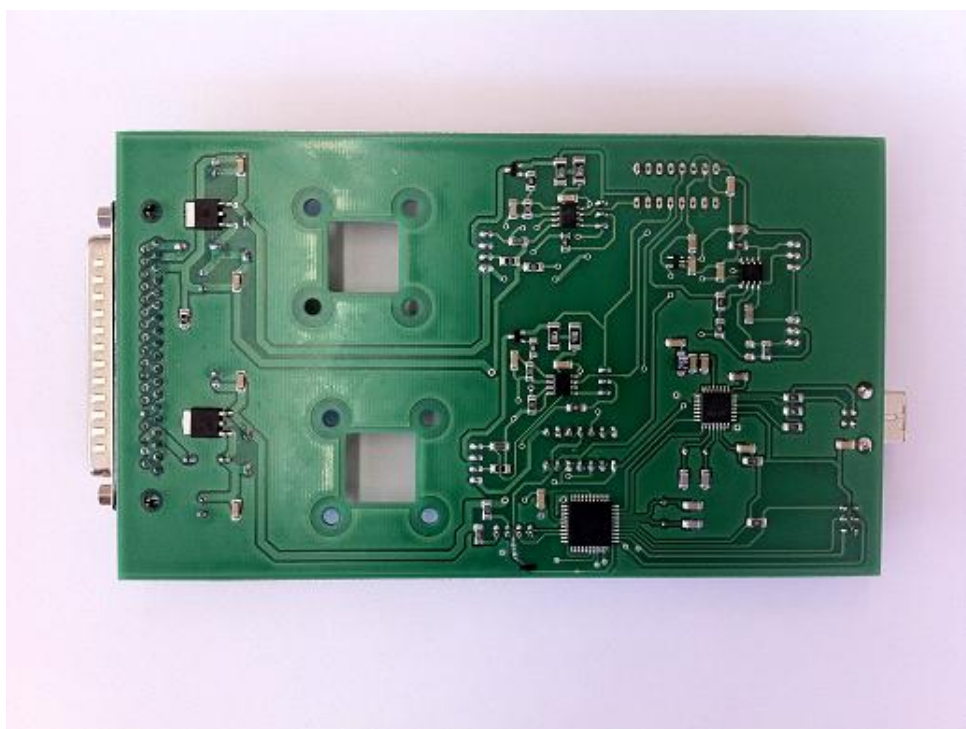
Obr. 5.3: b) Osazovací výkres pohled Top



Obr. 5.4: b) Osazovací výkres pohled Bottom



Obr. 5.5: b) DPS ze strany osazovacích součástek



Obr. 5.6: b) DPS ze strany SMD součástek

5.2 Rozpiska použitých součástek.

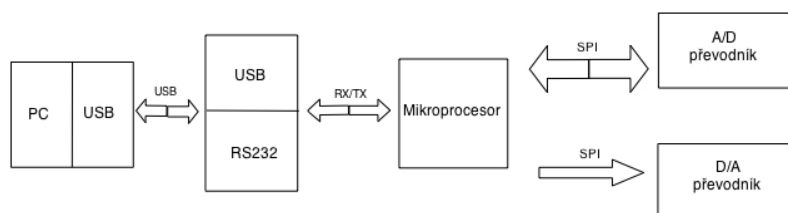
Tab. 5.1: Rozpiska použitých součástek hlavního schématu

Součástky	Hodnota	Pouzdro	Množství
Rezistory			
R _{2,4,12}	10k	M1206	1x
R _{24,25}	560	M1206	1x
R _{8,10,14}	0	M1206	1x
R ₂₉	1k5	M1206	1x
R _{3,6,17,19,30}	1k	M1206	1x
R _{5,13}	10M	M1206	1x
R _{1,11,31,32}	47	M2010	1x
R _{9,18}	8k2	M1206	1x
R _{27,28}	27	M1206	1x
R ₂₂	100k	M1206	1x
R _{20,28}	4k7	M1206	1x
R ₂₆	480	M1206	1x
R ₂₃	47k	M1206	1x
Kapacitory			
C _{2,5,6,13,14,15,16,17}	100n	C1206	1x
C _{19,20,22,23,24,27,28,29}	100n	C1206	1x
C ₇	1u	C1206	1x
C _{10,11,31}	1n	C1206	1x
C _{8,9}	220u/25	E3,5-10	1x
C _{12,21}	220u/10	E2,5-7	1x
C _{25,26}	27p	C1206	1x
C _{3,4}	22p	C1206	1x
C ₃₀	33n	C1206	1x
C ₃₁	10n	C1206	1x
C ₃₂	CTS 6M8/10V	B/3528-21W	1x
X _{ISP1}		JP4	1x
Laserová dioda	C-1550A-DFB2.5-PD-SFCMI/APC-K	PINHD-1X4	2x
Fotodioda	R-11-040A-P-SFC/APC	PINHD-1X3	2x
A/D převodník	MCP3304	DIL16	1x
D/A převodník	MCP4922S	DIL14	1x
IC1	MEGA16-A	TQFP44	1x

MX6029EUK41-T		SOT23-5L	1x
JP3	PINHD-1X4	1X04	1x
JP4	PINHD-1X4	1X04	1x
JP5	PINHD-1X3	1X03	1x
JP6	PINHD-1X3	1X03	1x
IC8	7805DT	TO252	1x
IC9	7805DT	TO252	1x
IC10	FT232BM	LQFP-32	1x
ISP6C	Konektor	PINHEAD6	1x
CON1	DB37M/90	D-37M/90sam	1x
IC6 _{A,B}	OPA2743UA	SOIC8	1x
IC2 _{A,B}	OPA2743UA	SOIC8	1x
IC7 _{A,B}	OPA2743UA	SOIC8	1x
Q ₁	16MHz	HC49/S	1x
Q ₃	6MHz	HC49/S	1x
T _{1,2}	BC817-40-NPN	SOT23-BEC	1x
JP _{1,2}	Jumper	JP2	1x
X ₁	MINI-USB	úhlový 90	1x
D _{1,2,3,4}	SCHOTTKY-DIODED	DO35-7	1x

6 OVLÁDÁNÍ ELEKTRONICKÉHO MĚŘÍČÍHO MODULU

V této části navazuji na diplomovou práci Ing. Milana Holíka, který se ve své práci mimo jiné zabýval komunikací pro mikroprocesor a na bakalářskou práci Ing. Mariána Pristacha, jenž se zabýval řízením laserové diody, a od nichž jsem převzal část softwarového řešení. Před oživením mikroprocesoru jsem provedl měření, zdali se někde nevyskytuje chyba a proměřil jsem proudy jdoucí obvodem. Sestavil jsem program, který zajišťuje komunikaci a ovládání D/A a A/D převodníku. Pro vytvoření programu jsem použil freewarové programovací prostředí CodeVision. Program v CodeVision je napsaný pro komunikaci s procesorem Atmega – 16. K oživení a naprogramování procesoru Atmega – 16 firmy Atmel, který řídí měřicí elektronický modul, jsem využil programátor sestavený podle specifikace výrobce AVR910. Programátor je kompatibilní s programy AVR studio a CodeVision. AVR studio jsem využil pro simulaci hardwaru elektronického měřicího modulu a pro ověření chování procesoru při průběhu programu. Programátor je osazený mini USB rozhraním, pomocí kterého komunikuje s počítačem. Pro komunikaci programátoru s deskou elektronického modulu je použita seriová linka RS232 viz.obrázek 6.1.

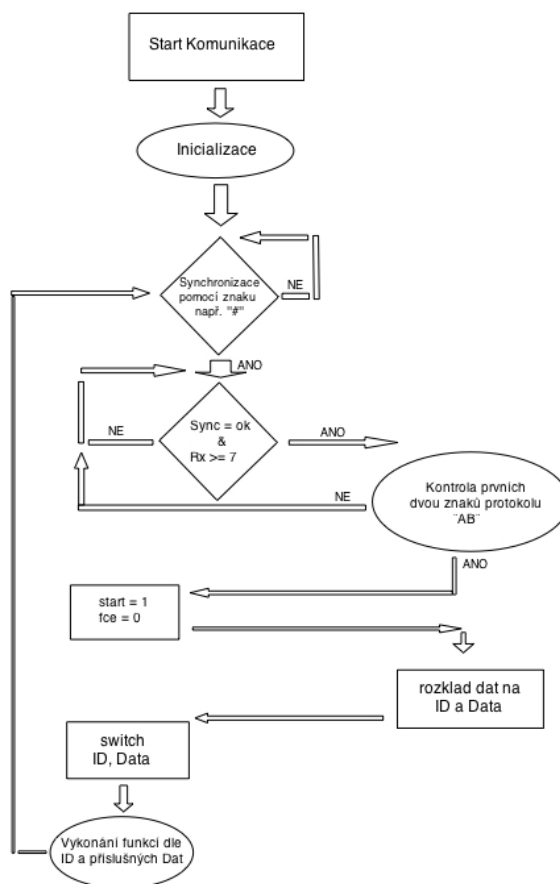


Obr. 6.1: Blokové schéma komunikace

6.1 Software pro mikrokontroler

Mikrokontroler ovládá s externí A/D a D/A převodníky přes sběrnici a komunikační standard SPI, při řízení a obsluze A/D a D/A převodníku, procesor odesílá data vyčtená z A/D převodníku pomocí hardwarového zařízení USART do USB portu. Nastavení USARTu jsem provedl v CodeVision, kdy komunikace využívá asynchronní přenos a rychlost přenosu je nastavena na 19200 Bd. Komunikační paket přenosu obsahuje osm bitů pro data a jeden stopbit. Na obrázku 6.2 je vývojový diagram procesu komunikace.

Vývojový diagram komunikace mikrokontroleru nám znázorňuje jak jdou za sebou jednotlivé fáze procesu. Po startu procesu následuje inicializace. Při inicializaci



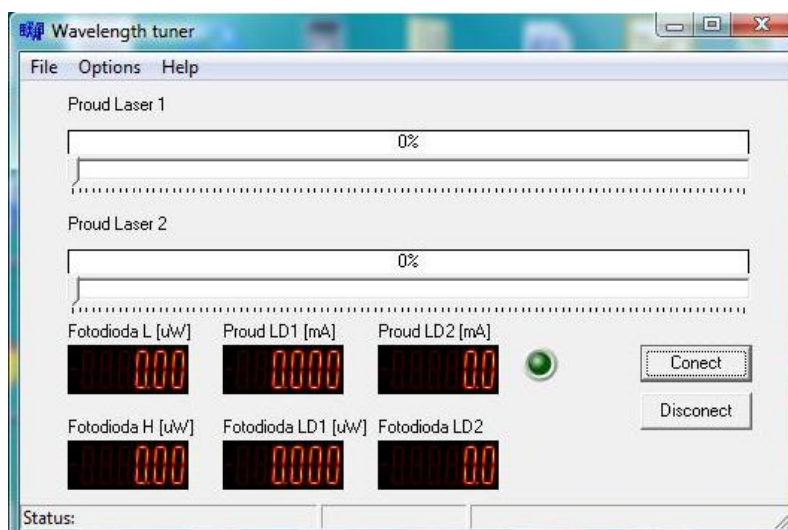
Obr. 6.2: Vývojový diagram komunikace

dochází k nastavení USART komunikace, časovačů, eventuálně dalších bloků, které procesor obsahuje. Synchronizace v komunikaci probíhá v nekonečné smyčce, v níž se čeká na příchozí znak synchronizace. Dále pak dochází k identifikaci rámce pomocí dvou uvozovacích znaků. Tyto znaky se používají zejména jako bezpečnostní prvek informující nás o případném problému spojení. Komunikační paket obsahuje nejprve dva uvozovací znaky, dále pak znaky ID, ty obsahují také dva bity a data, která jsou realizována čtyřmi bity. V poslední fázi diagramu, kdy jsou ID a data již rozdělená, dochází k realizaci funkcí, kde ID charakterizuje funkce, které mají být vykonány, ty jsou pomocí dat parametrizovány.

6.2 Ovládání elektronického měřicího modulu pomocí počítače

K ovládání elektronického měřicího modulu bylo zapotřebí vytvořit program řízení laserové diody. K vytvoření softwaru jsem využil freewarovou verzi

programu C++ Builder. Jedná se o hardwarově řízenou komunikaci master – slave, což znamená, že posílám požadavky procesoru a on je plní podle pořadí a odpovídá na ně odpovídající hodnotou. V programu jsem vytvořil grafické prostředí pro lepší orientaci v ovládání. Software zajišťuje komunikaci s mikrokontrolerem, zprostředkovává ovládání D/A převodníku a vyčítání hodnot z A/D převodníku. Při spuštění programu se objeví dialogové okno programu.



Obr. 6.3: Dialogové okno pro ovládání laserové diody

V levém horním rohu dialogového okna najdeme hlavní menu, které se dále dělí do tří sekcí. První z nich je sekce „file“, kde je několik funkcí, avšak pro ovládání nevyužívám funkce „new, open, save as..“, využívám zde jen funkci „exit“, pomocí které lze program korektně opustit.

V druhé sekci „options“, se nachází funkce pro zvolení ComPortu v závislosti na připojení do počítače. Důležitou složkou je také Communication view ve lze vidět znázorněnou komunikaci mezi procesorem a programem. Poslední sekcí je „help“, která také obsahuje funkce, které pro řízení nevyužíváme.

Hlavní funkce celého softwaru jsou zejména nastavování proudu laserovou diodou a odečítání hodnot. Software umožňuje vyčítat hodnoty proudu laserové diody, proudu monitorovací fotodiody integrované v laserové diodě a tím i výkonu laserové diody a optického výkonu přivedeného k fotodiodě. Grafické okno softwaru obsahuje dva posuvníky (TrackBar). Posuvníky jsou použity pro ovládání dvou nezávislých kanálů D/A převodníku. Tyto dva výstupy D/A převodníku nastavují nezávisle na sobě proudy či výkony laserových diod v závislosti na poloze jumper/přepínačů JP1, 2. Grafické okno obsahuje také šest displejů, které zobrazují měřené hodnoty z A/D převodníků. Procesor posílá hodnoty z A/D převodníku jako 12-bitové číslo v

binárním tvaru, z tohoto důvodu jsem musel přepočítat číselné výstupy A/D převodníků do požadovaného tvaru. Tyto přepočty vycházejí z následujících přepočítacích vztahů do nichž musíme dosadit změřené kalibrační konstanty.

První displej vlevo nahoře zobrazuje optický výkon na fotodiodě při zapojení pro měření nízkých optických výkonů. Další displej umístěný pod předcházejícím displejem zobrazuje optický výkon na fotodiodě při zapojení pro měření vysokých optických výkonů. Optický výkon se zobrazuje v $[\mu W]$. Pro přepočet na požadované hodnoty jsem použil rovnici 6.1

$$[V \text{ A/D } I_P] * k = \text{optický výkon } [\mu W] \quad (6.1)$$

Tato rovnice popisuje jak vypočítat optický výkon z hodnoty $V \text{ A/D } I_P$, což je číselný výstup z A/D převodníku, k jehož analogovému vstupu vede napětí ze zatěžovacího odporu fotodiody. Násobící konstanta k je vyčíslena z kalibrační křivky 7.3 podle vztahu 6.2.

$$k = \sum_n \left(\frac{\text{Výkon laserové diody } P [\mu W]}{V \text{ A/D } I_P} \right) \div (\text{Početem změřených hodnot } n \text{ } I_P) \quad (6.2)$$

Další dva displeje v horní řadě, a to displej umístěný uprostřed a displej vpravo, zobrazují proudy procházející laserovými diodami LD1, LD2. Tyto proudy jsou přepočteny a zobrazeny v jednotkách $[mA]$. Pro přepočet jsem využil koeficient 6.3.

$$\left[\left(\frac{V_{REF}}{2^{12}} * V \text{ A/D } I_E \right) \div \text{odpor emitoru budícího tranzistoru} \right] * 1000 \quad (6.3)$$

Pro vyčíslení koeficientu 6.3 je zapotřebí znát veličiny uvedené ve vzorci. Za V_{REF} dosadíme $4,096 [V]$. Hodnota 2^{12} nám v rovnici vyjadřuje počet úrovní převodníku. Pro určení přesné hodnoty emitorového odporu jsem použil digitální multimetr/ohmmetr Agiltec, díky tomu jsem mohl určit hodnotu odporu až na tři desetinná místa. Změřená hodnota odporu činila $93,516 [\Omega]$ oproti nominální hodnotě $94 [\Omega]$. Celý výraz v $[\]$ násobím hodnotou 1000, abych dostal zobrazované hodnoty v jednotkách $[mA]$. Hodnoty $V \text{ A/D}$ jsou zde číselné hodnoty výstupu A/D převodníku, na jehož analogovém vstupu je napětí na emitorovém odporu budícího tranzistoru.

Poslední dva displeje umístěné v dolní řadě uprostřed a vpravo zobrazují optické výkony na monitorujících fotodiodách uvnitř laserových diod LD1 a LD2. Pro výpočet požadovaného výstupu, kterým je optický výkon v jednotkách $[\mu W]$, jsem použil výraz 6.4

$$\left[\left(\frac{V_{REF}}{2^{12}} * V_{A/D} I_{MD} \right) \div \text{zatěžovací odpor monitorovací fotodiody} \right] * 1000 * a \quad (6.4)$$

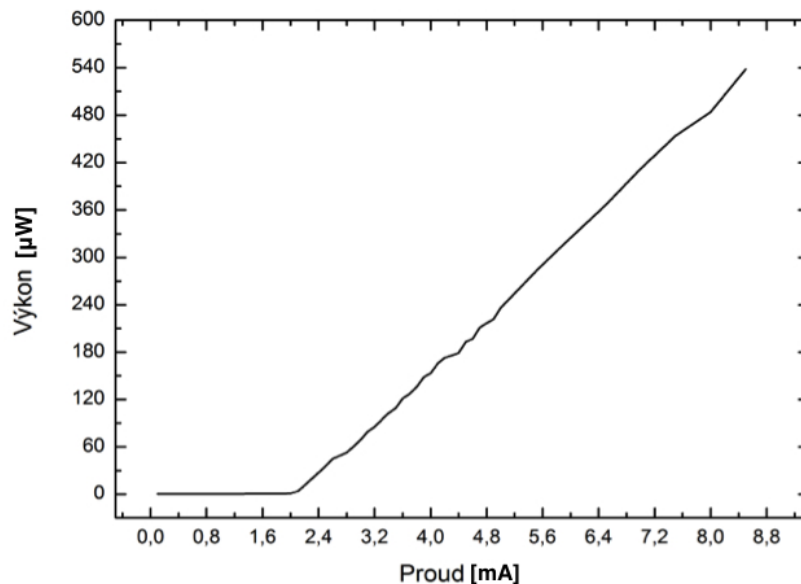
Pro dosazení do výrazu 6.4 musíme znát všechny hodnoty. Hodnota zatěžovacího odporu integrované monitorovací fotodiody je $8k2 [\Omega]$. Rovnice také obsahuje konstantu **a**, kterou jsem vypočítal z kalibrační křivky závislosti výkonu laserové diody na proudu procházejícím monitorovací fotodiodou umístěnou v laserové diodě. Pro výpočet konstanty **a** jsem použil výraz 6.5

$$a = \sum_n \left(\frac{\text{Výkon laserové diody } P [\mu W]}{\text{Proud monitorovací fotodiody } I_{MD} [mA]} \right) \div (\text{Počet změřených hodnot } n \cdot I_{MD}) \quad (6.5)$$

V grafickém okně je dále start/stop tlačítko a současně indikátor, který se při aktivování rozsvítí zeleně a spustí periodické vyčítání hodnot z A/D převodníku. Vyčítané hodnoty si můžeme zobrazovat v okně, které si vyvoláme z hlavního menu Options/Communication View. V grafickém prostředí jsou dále dvě tlačítka Connect a Disconnect, pomocí kterých se inicializuje a popřípadě ukončuje komunikace s elektronickým měřicím modulem.

7 EXPERIMENT

Pro správnou funkčnost a realizaci celého měřicího přípravku jsem nejprve musel změřit několik kalibračních křivek, pomocí kterých jsem mohl dále realizovat měření spektra Braggovy mřížky. Jako první kalibrační křivku jsem změřil Watt/Amperovou charakteristiku laserové diody. K měření proudu diody jsem využil několika poznatků. V budícím obvodu diody, viz schéma zapojení elektronického měřicího modulu, je použit tranzistor v zapojení se společným emitorem se zpětnovazebním emitorovým odporem, jde o zápornou zpětnou vazbu proudovou. Napětí z emitorového odporu je jednak vedeno do A/D převodníku a procesoru, a jednak se přes mechanický jumper/přepínač vede do invertujícího vstupu vstupního operačního zesilovače budícího obvodu. Z přesně změřené hodnoty emitorového odporu jsme stanovili přepočítací konstantu pro zobrazení hodnoty proudu na displeji, viz výraz 6.3. Takto vyčíslený proud je poněkud vyšší než skutečný proud laserovou diodou tekoucí v kolektoru budícího tranzistoru. Vycházel jsem z úvahy, že tranzistor má proudový zesilovací činitel větší jak 300, a proto můžeme v jeho emitorovém proudu zanedbat příspěvek jeho bázeového proudu. Tím můžeme proud emitoru považovat jako přibližně rovný budícímu proudu laserové diody.



Obr. 7.1: Kalibrační křivka Watt – Amper

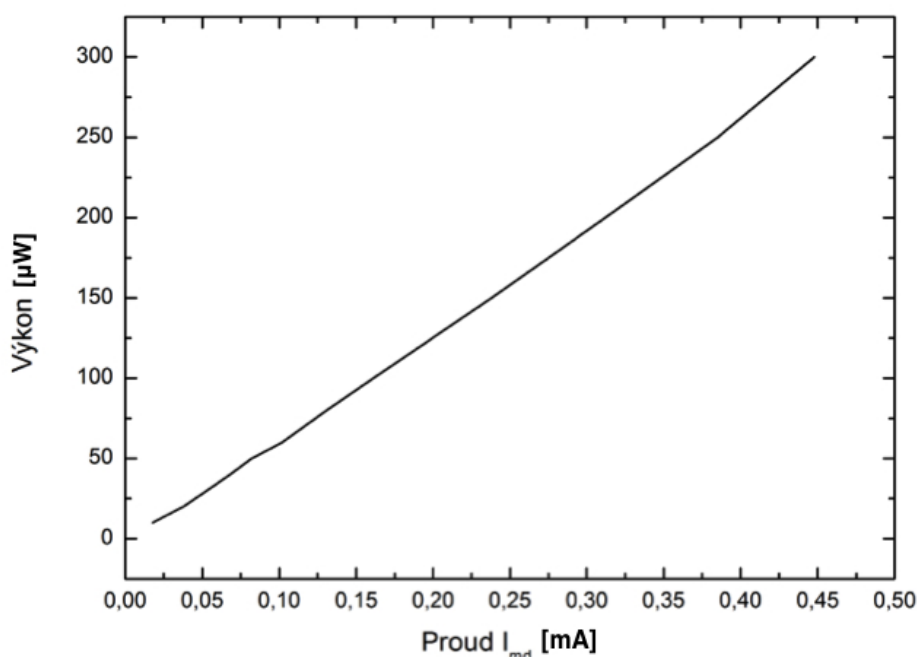
Optický výkon laserové diody jsem měřil laboratorním měřičem výkonu. Optické vlákno navázané k čipu laserové diody jsem zapojil napřímo do vstupu měřiče výkonu. Nastavoval jsem proud laserové diody postupně po desetínách od 0 až do

8,5 [mA] a odečítal jsem hodnoty z měřiče výkonu. Při dosažení hodnoty proudu 2 [mA] začne laserová dioda výrazně zvyšovat svoje vyzařování. Tento proud se označuje jako prahový proud laserové diody.

Druhou změřenou kalibrační křivkou je závislost výkonu laserové diody na proudu procházejícím monitorovací fotodiodou umístěnou v pouzdře laserové diody. Měření jsem realizoval tak, že vláknový výstup laserové diody jsem připojil k laboratornímu měřiči výkonu a jumper/přepínač JP1 jsem umístil do polohy s konstantním výkonem. Ovládacím programem jsem nastavoval vstupní napětí z D/A převodníku do budícího obvodu laserové diody a odečítal hodnotu napětí U ze zatěžovacího odporu monitorující diody. Toto napětí bylo přepočítáváno na proud monitorovací diodou I_{MD} podle vztahu 7.1.

$$I_{MD} = \frac{U}{R_9} \quad (7.1)$$

Výsledná závislost je téměř přímková. Můžeme z ní stanovit průměrnou hodnotu kalibrační konstanty a pro přepočet proudu monitorovací diody na výstupní výkon laserové diody, viz vztah 6.5.

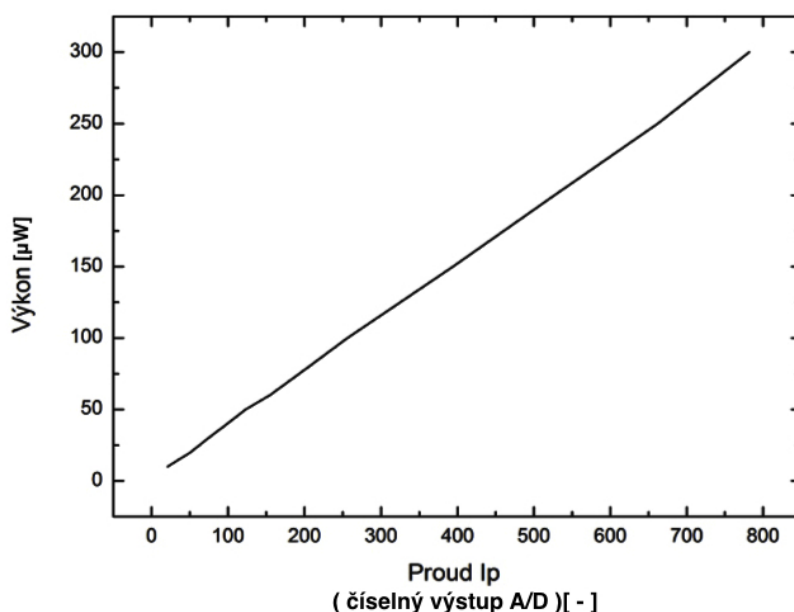


Obr. 7.2: Kalibrační křivka výkonu laserové diody a proudu monitorující fotodiody

Po dosazení změřených hodnot této kalibrační křivky do vztahu 6.5 dostáváme hodnotu $a = 0,64068 [\mu W/mA]$. Tato hodnota je nižší než bychom očekávali u běžné

fotodiody, vliv který to způsobuje je zřejmě ztráta výkonu ve vazbě z čipu laserové diody do jednovídného vlákna.

Třetí kalibrační křivka popisuje závislost proudu procházejícího fotodiodou I_P na optickém výkonu přiváděném do fotodiody. Proud fotodiodou je v tomto případě udáván číselným výstupem z A/D převodníku, na jehož analogový vstup je přivedeno napětí ze zatěžovacího odporu fotodiody $V_{A/D} I_P$. Změřená závislost je opět téměř přímková.



Obr. 7.3: Kalibrační křivka výkonu na fotodiodě a proudu fotodiody

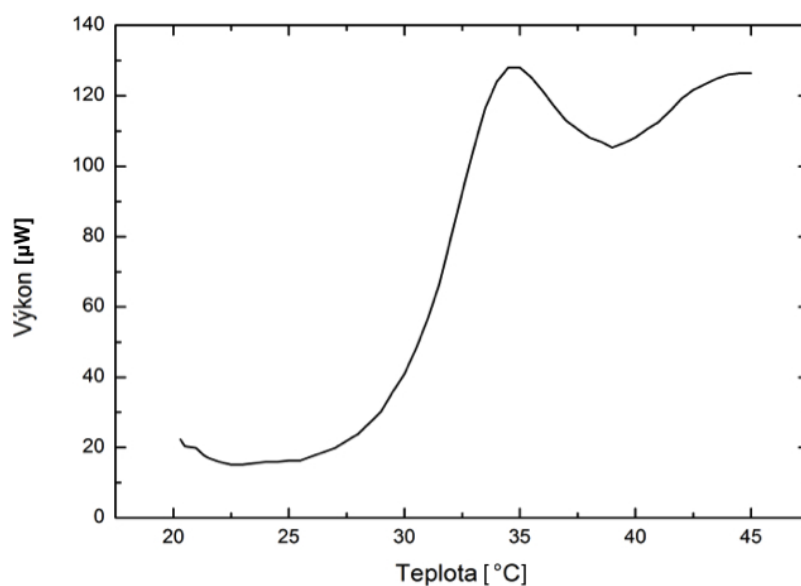
Pomocí této kalibrační křivky jsem vypočítal z výrazu 6.2 kalibrační konstantu k , jež slouží pro přepočet $V_{A/D} I_P$ na optický výkon na fotodiodě. Vypočtená hodnota činila 0,390625 a udává tedy poměr

1 kvantovací úroveň = 0,390625 [μW] výkonu na fotodiodě.

7.1 Měření mřížky

Po zkalibrování elektronického měřicího modulu a číselných displejů jsem provedl dvě srovnávací měření spektrálních charakteristik optické Braggovy mřížky, která jsou současně experimentálním výsledkem a dokladem funkčnosti elektronického řídicího modulu, optického systému, řídicího programu i komerčního teplotního regulátoru. Teplotní regulátor je v měřicím zařízení spojen s elektronickým měřicím modulem a připojen k Peltierově článku a termistoru na chladiči laserové diody. Pro měření první

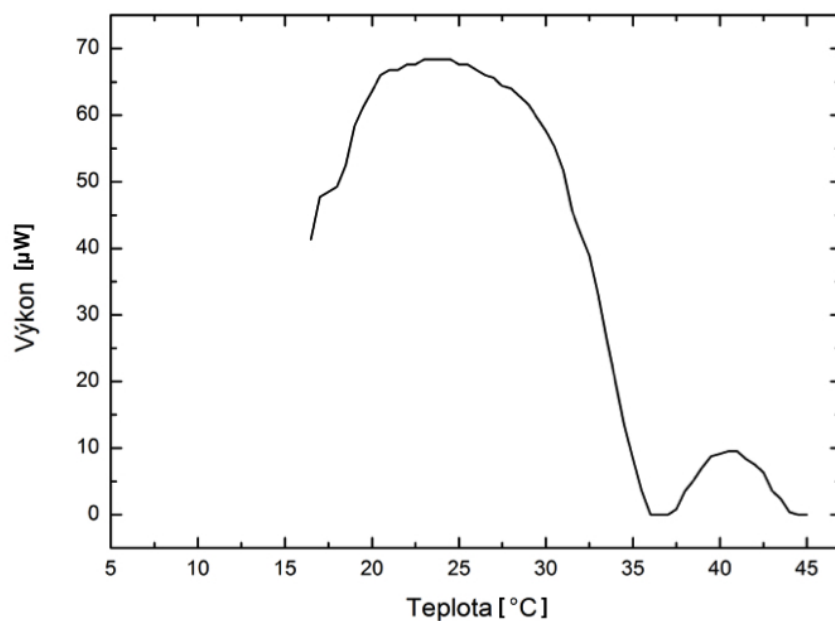
charakteristiky spektra mřížky v propouštěném světle jsme optický výstup laserové diody připojili přímo k okonektorované vláknové mřížce FBG1. Druhý konec FBG1 jsme připojili přímo na vstup měřící fotodiody, viz 3.4. Na elektronickém měřícím modulu, jsem nastavil režim konstantního výkonu laserové diody a nastavil konstantí výkon $200[\mu W]$. Manuálně jsem teplotním kontrolérem nastavoval teploty laserové diody v rozsahu 45°C až $20,3^{\circ}\text{C}$. Výsledný průběh výkonu na fotodiodě je zobrazen v grafu 7.4



Obr. 7.4: Spektrum Braggovy mřížky měřené napřímo

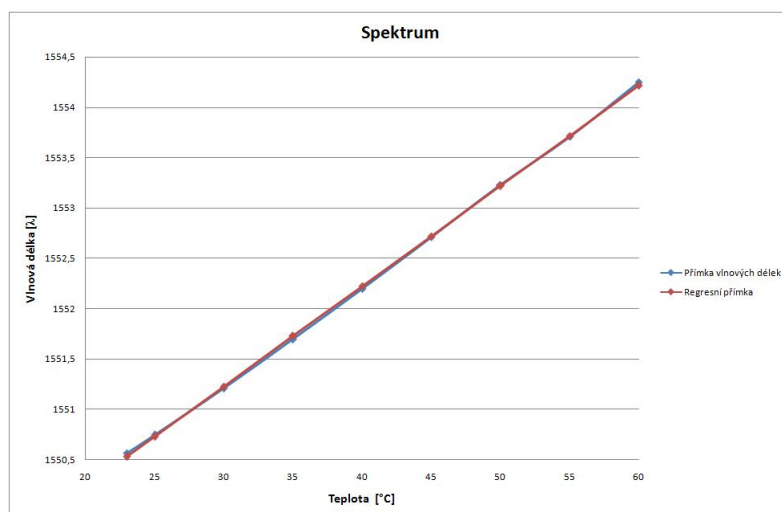
Tento graf ukazuje dobrou shodu se spektrem měřené mřížky udávaným výrobcem, které přikládám v příloze na CD. Je zde také vidět, že teplotní rozsah přeladění, jehož jsem dosáhl, neumožnil změřit celé spektrum hlavního laloku mřížky. K tomu bychom potřebovali ochlazení laserové diody až na teploty kolem 10°C , což nám výkon Peltierova článku nedovolil. V dalším kroku jsem tutéž mřížku měřil v režimu odraženého světla viz obrázek 3.3. Elektronicky měřící modul byl nastaven jako v předchozím měření, stejně tak jako výkon laserové diody byl nastaven na hodnotu $200[\mu W]$. Manuálním nastavováním teploty laserové diody se mi za použití ofukování chladiče stlačeným vzduchem podařilo dosáhnout rozsahu teplot $16,5^{\circ}\text{C}$ až 45°C . Odečtené hodnoty výkonu na měřící fotodiodě ukazuje graf 7.5.

Posledním krokem v kalibraci měřícího zařízení bylo stanovení závislosti vlnové délky záření emitovaného laserovou diodou na její teplotě. Tuto závislost jsem stanovil tak, že jsem pro několik hodnot teploty v rozsahu 23°C až 60°C změřil



Obr. 7.5: Spektrum Braggovy mřížky měřené s cirkulátorem

spektra laserové diody a stanovil vlnové délky středu spektrální charakteristiky. Spektrální charakteristiky laserové diody byly sejmuty optickým spektrálním analyzátozem EXFO s rozlišením 1,5 pm. Závislost centrálních vlnových délek spekter laserové diody na teplotě ukazuje graf 7.6.



Obr. 7.6: Teplotní přeladění laserové diody

Na grafu je také znázorněna regresní přímka aproximující změřenou závislost.

Ze změřených hodnot a grafu regresní přímky lze určit rovnici regresní přímky 7.2.

$$y = ax + b \quad (7.2)$$

Pro vypočítání koeficientů **a** a **b** rovnice regresní přímky dostaneme vztahy 7.3, 7.4

$$a = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (7.3)$$

$$b = y_1 - \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} * x_1 \quad (7.4)$$

Po dosazení koeficientů **a** a **b** a teploty, kterou představuje neznámá **x**, dostaneme výslednou proměnnou **y**. Tato proměnná charakterizuje vlnovou délku λ .

Pro rozsah teplot $T \in \langle 0^\circ\text{C}; 60^\circ\text{C} \rangle$ dostaneme rozsah vlnových délek

$\lambda \in \langle 1548.238 \text{ nm}; 1554.21544 \text{ nm} \rangle$, což je přeladění laserové diody až o 6 nm. Toto přeladění je dostatečné pro měření optických senzorů založených na optických mřížkách.

8 ZÁVĚR

V bakalářské práci jsem se seznámil s problematikou optických Braggových mřížek a s možnostmi měření jejich spektrálních charakteristik. Podle pokynů v zadání jsem se soustředil na měření spektrálních charakteristik pomocí skenování spektra přeladováním úzkopásmové laserové diody. Pro tuto měřicí metodu jsem vybral vhodný laserový modul s termoelektrickým chladičem pro teplotní ladění vlnové délky a monitorovací fotodiodou pro stabilizaci optického výkonu diody. Navrhl jsem a sestavil optickou měřicí sestavu s přeladovaným laserovým modulem o vlnové délce 1550 nm, cirkulátorem, měřenou Braggovou mřížkou a fotodetektorem. Dále jsem na základě užívaných zapojení navrhl a vyrobil elektronický řídicí modul pro řízení až dvou nezávislých laserových diod a odečítání optického signálu ze dvou nezávislých detektorů. Při návrhu tohoto elektronického bloku jsem se seznámil s funkcí, zapojením a vlastnostmi modulů laserových diod a fotodetektorů, s použitím řízených D/A a A/D převodníků a operačních zesilovačů a řídicího mikroprocesoru.

Při realizaci měřicího pracoviště jsem se setkal s některými problémy, které jsem musel vyřešit. Bylo to zejména při sestavování optické trasy, kde docházelo k lámání vláken při přivařování konektorových pigtailů a nebylo snadné nalézt a odstranit takto vzniklé chyby. Musel jsem se tím pádem seznámit i s metodami diagnostiky ve vláknových systémech. K nalezení problémů jsem použil tzv. fault locator, výkonový laser, který svítí viditelným červeným světlem.

Další problém vznikl při samotném měření a tepelném přeladování laserové diody. Zde jsem zjistil že zařízení není schopné dosáhnout nižších hodnot teploty laserové diody než 16° C. Tento problém se objevil zřejmě díky teplotnímu mostu, který vzniká mezi chladičem, na němž byla umístěna laserová dioda, a chladičím žebrem pro odvod tepla. Teplený most zde vznikl kvůli kovovým šroubům, pomocí kterých byly jednotlivé díly chladiče připevněny k sobě. Pro vyřešení tohoto problému bych navrhl vyměnit tepelně vodivé šrouby za šrouby z tepelně izolačního plastu. Pro další práci bych také doporučil zdvojení Peltierova článku, což by nám zajistilo větší tepelný rozsah. Z důvodu nedostatečného rozsahu přeladění nebylo možné zachytit celé spektrum měřené Braggovy mřížky. Nicméně měření spektra přeladováním laserové diody teplotou prokázalo, že tímto způsobem jsem schopen spolehlivě a korektně změřit spektrum Braggovy mřížky. Lze to doložit dobrou shodou změřeného spektra s odpovídajícím spektrem Braggovy mřížky přiložené výrobcem. Z provedených měření lze říct, že přeladováním laserové diody lze pokrýt měřicí rozsah 6

nm pro rozsah teplot 0°C až 60°C . Dále lze říci, že měření spektra skenováním umožní měřit optické mřížky s šířkou spektra větší než cca 0,1 nm. To vychází z použitého laserového zdroje, jehož šířka spektrální čáry, kterou jsem změřil spektrálním analyzátozem, je cca 0,06 nm. Navržené zařízení tedy může sloužit k podpoře experimentů při využití optických mřížek ve vývoji senzorů a bude mít také využití jako laboratorní úloha ve výuce.

LITERATURA

- [1] FILKA, M. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Brno: CENTA, 2009.
- [2] HELÁN, R. *Modelování a optimalizace komplexních vláknových difrakčních struktur*. Brno: FEKT VUT BRNO, 2009.
- [3] HOLÍK, M. *Automatické optická inspekce*. Brno: FEKT VUT BRNO, 2011.
- [4] OTHONOS, A., KALLI, K. Artech House, Notwood, 1999. ISBN 0-89006-344-3 *Fiber Bragg Gratings, Fundamentals and applications*. Notwood: Artech House, 1999. ISBN 0-89006-344-3
- [5] PRISTACH, M. *Systém pro přesné ovládání laserových diod*. Brno: FEKT VUT BRNO, 2008.
- [6] ATMEL Corporation. *ATMEGA16-A*, [online datasheet]. Dostupné z WWW: http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2466.pdf 2010.
- [7] LuminentOIC. *C-1550A-DFB2.5-PD-SFCMI/APC-K*, [online datasheet]. Dostupné z WWW: http://www.datasheetcatalog.org/datasheets2/40/403846_1.pdf
- [8] LuminentOIC. *R-11-040A-P-SFC/APC*, [online datasheet]. Dostupné z WWW: http://download.siliconexpert.com/pdfs/2004/0516/semi_a/1/lmn/ds/ds542.pdf
- [9] MAXIM. *MAX6029EUK41 - T*, [online datasheet]. Dostupné z WWW: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/maxim/MAX6029.pdf> 2003.
- [10] Microchip Technology In. *MCP3304*, [online datasheet]. Dostupné z WWW: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21697e.pdf> 2008.
- [11] Microchip Technology In. *MCP4922*, [online datasheet]. Dostupné z WWW: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/21897a.pdf> 2004.

- [12] Texas Instruments Incorporated. *OPA2743UA*, [online datasheet]. Dostupné z WWW:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa2743.pdf>
2001.
- [13] VISHAY Semiconductors. *BAT48*, [online datasheet]. Dostupné z WWW:
<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/vishay/85664.pdf>
2002.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

A/D – analogově digitální převodník

APC – Typ konektoru

ASE – Zdroj využívající emise světla v erbiem dopovaném zesilovacím vláknu

Bd – Baud

CCD – Obvody s nábojovou vazbou

CD – compact disc

D/A – digitálně analogový převodník

dB – Decibel

DFB – Dioda s rozloženou zpětnou vazbou

DPS – digitální signálový procesor

FC-APC – fiber optic connector

ID – identifikace ve výpočetní technice

I_e – Emitorový proud

I_p – Proud fotodiody

mA – miliAmper

mV – miliVolt

μ W – microWatt

nm – nanometr

pm – pikometr

SHDN – shutdown, low-power standby mode

SMD – surface mount device, součástka pro povrchovou montáž spojů

SPI – Serial Peripheral Interface

USART – Universal Synchronous / Asynchronous Receiver and Transmitter

USB – univerzální sériová sběrnice

UV – Ultrafialové záření

V A/D – Číselný výstup z A/D převodníku

9 PŘÍLOHY

9.1 Obsah příloh vložených na CD

- **Spektra Braggových mřížek**
 - Jednotlivá spektra tří Braggových mřížek udávaná výrobcem jsou přiložená na CD pdf/mrizky
- **Spektra laserové diody**
 - Měřená spektra laserové diody jsou přiložena na CD pro teploty v rozsahu $T \in \langle 0^\circ; 60^\circ \rangle$.
pdf/23
pdf/25
pdf/30
pdf/35
pdf/40
pdf/45
pdf/50
pdf/55
pdf/60
- **Data sheet**
 - Na CD jsou přiloženy jednotlivé data sheety.
pdf/bat48schotkydiode
pdf/MAX6029
pdf/ATMEL
pdf/Fotodioda
pdf/Laserovadioda
pdf/opa2743UA
pdf/mcp4922S
pdf/MCP3304
- **Software pro komunikaci mikroprocesoru**
 - Software je přiložený na CD
- **Software ovládání laserové diody**
 - Software je přiložený na CD
- **Schéma a návrh DPS**
 - Schéma je uloženo v souboru .sch a návrh plošného spoje v .brd; oba přiložené na CD